الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENYAHIA JIJEL

Faculté des sciences et de la technologie

Département d'Electrotechnique

N°...../2024

Thème

Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque

Présenté Par : ALLOUTI AMINE

BENAZIZA AYOUB

Encadré Par : Dr. DERAI SAMIR

Date de soutenance : 25/09/2024

Jury de Soutenance

Président : AOMAR LYES	**Grade** …….....	**Univ MSB jijel**
Encadreur : DERAI SAMIR	**Grade :** MCB	**Univ MSB jijel**
Examinateur : BOULASSEL AMMAR	**Grade** ……	**Univ MSB jijel**

Promotion : 2023 /2024

Remerciements

Le plus grand merci s'adresse au bon Dieu, le tout puissant de nous avoir accordé le courage et la volonté pour accomplir ce travail.

Nous remercions nos familles et tous nos amis qui nous ont toujours encouragé et soutenu durant toutes nos études.

Nous tenons également, à exprimer nos forts remerciements à notre encadreur **Mr. Derai Samir** pour son aide, son encouragement, ses conseils et surtout ses orientations, qu'ils trouvent ici le témoignage de notre haute considération et de notre profond respect.

Nous remercions les membres de jury qui ont bien voulu accepter d'examiner ce mémoire et à ces égards nous leurs présentons nos profonds respects, et notre grande gratitude.

Nous rendons grâce à tous les enseignants du département Electromécanique, qui nous ont suivis durant notre cursus, et tous ceux qui ont contribué, à ce que ce travail prenne forme.

SOMMAIRE

Introduction générale 12

Chapitre I : Sources d'énergies en Algérie

I.1. Introduction 15
I.2. Histoire de l'énergie 15
I.3. Différentes sources d'énergie 16
I.3.1. Énergies non renouvelable 16
I.3.2. Énergies renouvelables 18
I.4. Potentiel des énergies renouvelables 21
I.4.1. Potentiel Solaire 21
I.4.2. Potentiel Eolien 22
I.4.3. Potentiel géothermique 23
I.4.4. Potentiel Hydraulique 24
I.4.5. Potentiel de biomasse 24
I.4.6. Potentiel Hydraulique 24
I.5. Problématique énergétique 25
I.5.1. Réchauffement climatique 26
I.5.2. Effet de serre 27
I.6. Contexte énergétique mondial 28
I.6.1. Qu'est-ce que la transition énergétique 28
I.6.2. Impact de la transition énergétique 29
I.7. Programme de développement des énergies renouvelables en Algérie 30
I.8. Conclusion 31

Chapitre II : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

II.1. Introduction 34

II.2. Rayonnement solaire 34
II.3. Spectre solaire 35
II.4. Principe de la conversion photovoltaïque 36
II.5. Systèmes Photovoltaïques 37
II.5.1. Cellule photovoltaïque 37
II.5.2. Le module photovoltaïque 38
II.5.3. Le champ photovoltaïque 40
II.6. Différents types des systèmes photovoltaïques 41
II.6.1. Cellule en silicium amorphe 41
II.6.2. Cellule en silicium monocristallin 42
II.6.3. Cellule en silicium polycristallin 42
II.7. Modélisation d'un générateur photovoltaïque 43
II.8. Types de systèmes photovoltaïques 48
II.8.1 Système isolé ou autonome 48
II.8.2 Système raccordé au réseau 48
II.8.3 Système hybride 49
II.9. Avantages et inconvénients d'une installation PV 50
II.9. Conclusion 51

Chapitre III : Étude des Différents Eléments d'un Système Photovoltaïque

III.1. Introduction 53
III.2. Convertisseur statique Continu-Continu (DC/DC) 53
III.2.1. Hacheur Buck 54
III.2.2. Hacheur Boost 57
III.2.3. Hacheur Buck-Boost 59
III.4. Différents commandes de MPPT 61
II.4.1. Méthode « Perturbation et Observation » 63
III.4.2. Principe des commandes « Hill Climbing » 64
III.4.3. Méthode de la « Conductance Incrémentielle » 65
III.5. Algorithmes de recherche du point de puissance maximale 66
III.5.1. Algorithme de perturbation et d'observation 66
III.5.2. Principe des commandes « Hill Climbing » 68

III.5.3. Méthode incrémentale de la conductance 69
III.7.Conclusion 71

Chapitre VI : Simulation et Comparaison entre les techniques de commande MPPT

VI.1. Introduction 73
IV.2 Simulation du système photovoltaïque 73
IV.2.1 Simulation d'un PV 73
IV.2.2 Simulation du convertisseur Boost 77
IV.2.3. Simulation des algorithmes MPPT connues 78
IV.3. Interprétation des résultats 81
IV.4. Conclusion 81

Conclusion générale 83

Bibliographie 85

Liste des tableaux

Chapitre I : Sources d'énergies en Algérie

Tableau I.1 : Émissions de CO_2 par kwh électrique produit pour différentes sources d'énergies.....27

Chapitre II : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

Tableau II.1 : Principaux types de cellule 41

Liste des figures

Chapitre I : Sources d'énergies en Algérie

Figure. I.1 : Irradiation globale et durée d'ensoleillement annuel en Algérie.....22
Figure. I.2 : Carte du Vent Annuel Moyen à 50m (Période 2001-2010… 23
Figure. I.3 : Localisation et température des ressources géothermiques de l'Algérie 24
Figure. I.4 : Pollution environnementale 26
Figure. I.5 : Accroissement de CO2 depuis le 19ème siècle..... 26
Figure. I.6 : Cercle vicieux de la notion (transition énergétique).....29
Figure. I.7 : Consistance du programme de développement des énergies renouvelables (Période 2015-2030) 31

Chapitre II : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

Figure. II.1 : Irradiance ou spectre solaire à la surface de l'atmosphère terrestre (AM0) et au sol (AM1.5D et AM1.5G)..... 35
Figure. II.2 : Coupe transversale d'une cellule PV typique.....36
Figure. II.3 : Composantes d'un champ de panneaux photovoltaïques.....37
Figure. II.4 : Structure basique d'une cellule solaire 38
Figure. II.5 : Module photovoltaïque 39
Figure. II.6 : Caractéristique électrique d'un module photovoltaïque.....39
Figure. II.7 : Cellules en série.....40
Figure. II.8 : Cellules en parallèles 41
Figure. II.9 : Principaux types de cellule.....43
Figure. II.10 : Schéma électrique idéal d'une cellule photovoltaïque..... 43
Figure. II.11 : Caractéristique I (V) d'une cellule photovoltaïque..... 44
Figure. II.12 : Schéma électrique réel d'une cellule photovoltaïque.....45
Figure. II.13 : Principe d'un système solaire autonome..... 48
Figure. II.14 : Schéma d'une installation PV connectée au réseau..... 49
Figure. II.15 : Principe d'un système autonome hybride 51

Chapitre III : Convertisseurs statiques et la commande MPPT

Figure. III.1 : Circuit électrique d'un convertisseur DC/DC de type Buck.....37
Figure. III.2 : Circuits équivalents du convertisseur Buck.....37
Figure. III.3 : Courant traversant la self du convertisseur Buck.....38
Figure. III.4: Circuit électrique d'un convertisseur DC-DC de type Boost 40
Figure. III.5 : Circuits équivalents du convertisseur Boost.....42
Figure. III.6 : Circuit électrique d'un convertisseur DC/DC de type Buck-Boost 44
Figure. III.7 : Circuits équivalents du convertisseur Buck-Boost 44
Figure. III.8 : Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur (DC-DC) contrôlé par Une commande (PPM) sur charge DC 45
Figure. III.9 : Classification des différentes méthodes MPPT.....45
Figure. III.10 : Principe de la commande P&O.....46
Figure. III.11: Relation entre PPV et le rapport cyclique D du convertisseur statique 46
Figure. III.12 : Evolution de la puissance disponible en fonction de la tension aux bornes d'un panneau 47
Figure. III.13: Organigramme de l'algorithme de perturbation et d'observation (P&O).....48
Figure. III.14: Algorithme type de la commande Hill Climbing 48
Figure. III.15: Organigramme de l'algorithme IncCond.....48

Chapitre VI : Simulation et Comparaison entre les techniques de commande MPPT

Figure. VI.1 : Schéma de simulation du système globale en Matlab 73
Figure. VI.2 Caractéristique courant-tension (I-V) d'un panneau solaire 74
Figure. VI.3 : Caractéristique puissance-tension (P-V) du panneau solaire.....74
Figure. VI.4: Caractéristiques (I-V) en fonction de l'éclairement 75
Figure. VI.5 : Caractéristiques (P-V) en fonction de l'éclairement.....76
Figure. VI.6 : Influence de la température sur les caractéristiques (I-V) d'un panneau solaire.....76
Figure. VI.7 : Influence de la température sur les caractéristiques (P-V) d'un panneau solaire.....77
Figure. VI.8 : Courbe du courant à la sortie du hacheur BOOST.....78
Figure. VI.9 : Courbe de tension à la sortie du hacheur BOOST.....78

Figure. VI.10: Courbe de puissance à la sortie de l'hacheur BOOST.....78
Figure. VI.11: Résultats de la méthode P&O..... 79
Figure. VI.12: Résultats de la méthode INC.....80

Introduction Générale

Introduction générale :

La consommation mondiale d'énergie ne cesse de croitre, posant des questions cruciales sur le problème du réchauffement climatique, dû aux gaz à effet de serre, et sur l'épuisement prochain des ressources fossiles. Suite à cette prise de conscience, un développement économique respectueux de l'environnement s'avère absolument nécessaire [1].

La production mondiale d'énergie électrique repose sur l'utilisation massive de sources d'énergie fossiles polluantes, qui ne sont pas éternelles avec des réserves limitées. L'utilisation de ces énergies cause des dégâts environnementaux considérables ; où les températures augmentent et les périodes de sècheresse s'allongent dans plusieurs régions du monde, les glacières fondent et provoquent des déséquilibres qui causent des catastrophes naturelles qui deviennent de plus en plus fréquentes. Toutes ces menaces donnent aux sources d'énergies renouvelables une place importante, et présagent un développement accéléré pour remplacer les sources conventionnelles, ce qui peut constituer une solution durable aux émissions de gaz à effet de serre [2].

Souvent, la révolution des énergies renouvelables est avancée comme un dénouement à tous nos problèmes de production d'énergie électrique. Mais il serait plus raisonnable de voir ces nouvelles solutions techniques comme un simple frein au réchauffement climatique à condition que notre consommation énergétique ne continue pas d'augmenter exponentiellement. Cela éviterait ainsi de reproduire les mêmes erreurs du passé en pensant à des solutions "miracles" qui seraient inépuisables et sans impact sur notre mode vie ou sur l'environnement [3].

Dans ce scénario, les énergies renouvelables participent pour près de la moitié à l'augmentation de la production électrique mondiale jusqu'en 2035 et les sources intermittentes, à savoir le solaire photovoltaïque et l'éolien, comptent pour 45% de la croissance des énergies renouvelables. Revenant à l'énergie solaire qui est notre sujet de base en effet, Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante. Dans les pays industrialisés, les lois sur les énergies renouvelables ont permis de booster fortement le marché du photovoltaïque. L'Algérie, pays du soleil et de l'espace, peut s'inspirer de ces programmes pour une exploitation à grande échelle de l'énergie solaire. Elle a les moyens humains et financiers à la mesure de ces programmes. L'enjeu est grand, et vital. L'Algérie est dans le monde l'un des pays de fort potentiel d'exportation de l'énergie électrique solaire. Le gisement solaire en Algérie est le plus important au niveau mondial, surtout dans le grand sud ou toutes les applications solaires

peuvent voir le jour. C'est pour cela que l'Algérie amorce une dynamique d'énergie verte en lançant un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables.

Dans ce contexte plusieurs critères d'optimisation de l'efficacité des systèmes photovoltaïques ainsi que des techniques ont été appliquées afin d'avoir une bonne adaptation et un rendement élevé. Parmi ces techniques, on trouve la technique de "Poursuite de Point de Puissance Maximale" où "Maximum Power Point Tracker (MPPT)" [4].

Notre mémoire est divisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré sur les différentes sources d'énergie : les énergies renouvelables et les énergies non-renouvelables (énergies fossiles et l'énergie nucléaire). Ainsi, nous allons présenter le contexte énergétique mondial justifiant l'importance de la transition énergétique face à l'évolution du besoin mondial en termes d'énergie accompagné d'une diminution des réserves des sources fossiles et une augmentation du degré de pollution de la planète. De plus, ce chapitre mettra au clair le contexte énergétique algérien à travers la présentation du programme de développement des énergies renouvelables « EnR » en Algérie, avant de présenter le potentiel renouvelable algérien.

Dans le deuxième chapitre, nous avons abordé les systèmes photovoltaïques en général, ainsi que la production de cellules solaires, ainsi que l'effet photovoltaïque et le principe de fonctionnement.

Dans le troisième chapitre, elles sont représentés les différentes topologies des convertisseurs DC/DC pour la conception d'une interface de puissance et leurs principes de fonctionnement expliqués. Puis, sont décrites les différentes méthodes (MPPT) de recherche du point de fonctionnement à puissance maximale (PPM), qui permettent au champ photovoltaïque de fonctionner à sa puissance maximale.

Le quatrième chapitre, est consacré à l'étude comparative par simulation entre deux techniques de commande MPPT Perturbation & Observation (P&O) et la méthode de l'incrémentation de la conductance (IncCond)entre deux méthodes MPPT : P&O et INC.

Chapitre 1

Sources d'énergies en Algérie

I.1. Introduction :

L'énergie électrique est devenue de plus en plus primordiale pour l'humanité. En effet, l'accès à l'électricité est une condition indispensable pour le développement socio-économique d'un pays.

Le besoin en énergie électrique n'a pas cessé de croitre depuis plusieurs années consécutives exigeant en conséquence une consommation importante des énergies fossiles telles que le charbon, le gaz naturel, le pétrole, etc. Cependant, la consommation accrue de ce type de sources fossiles pour la production de l'électricité accentue l'émission de gaz à effet de serre et augmente la pollution [5].

En effet, les pays font face désormais, à un dilemme : d'un côté ils doivent diminuer la consommation des combustibles fossiles qui sont la principale source de gaz à effet de serre (GES), de l'autre côté ils doivent satisfaire le développement rapide de l'économie mondiale qui exige une croissance continue de la consommation d'énergie. Ainsi, le défi que les pays sont appelés à relever consiste à mettre en œuvre une transition vers un système énergétique tout en soutenant le développement économique et social [6].

Alors, produire de l'électricité à base d'énergies renouvelables est une solution prometteuse pour produire proprement et palier au problème du réchauffement climatique de la planète auxquels le monde est confronté.

I.2. Histoire de l'énergie :

L'énergie a joué un rôle clé dans le développement de la société. Dans le monde préindustriel, cette énergie était principalement fournie par l'homme et par la combustion du bois, pour le chauffage, la cuisine ou la fonte des métaux. Le charbon, grâce à la nouvelle technologie des machines à vapeur, a mécanisé la production, amélioré les transports et favorisé fortement la révolution industrielle. Les années entre les deux guerres mondiales ont vu la montée de l'exploration et de l'exploitation du pétrole. L'accès à ce type de carburant devint la clé de l'issue de la Seconde Guerre mondiale. La prospérité et l'expansion postindustrielle de l'après-guerre sont indéniablement liées à l'usage du pétrole, ainsi qu'au développement de l'industrie automobile. Plus récemment, on a pu constater une nouvelle phase de la croissance économique grâce à l'usage de plus en plus grand du gaz naturel. L'électricité est la forme « première » de l'énergie, grâce à la facilité de son usage et de sa distribution. La demande d'électricité dans le monde est en croissance

permanente, de par l'augmentation de l'activité industrielle et des consommateurs (qui y ont de plus facilement accès à mesure que leurs pays se développent économiquement) [7].

I.3. Les différentes sources d'énergie :

On classe les sources d'énergie en trois catégories différentes **: Les énergies fossiles** qui proviennent de la combustion de réserves naturelles, qui se sont formées en plusieurs millions d'années à partir de dépôts organiques (plantes ou minuscules animaux). **L'énergie nucléaire** ou atomique qui provient de l'énergie qui lie les particules des noyaux d'atomes entre eux. Elle est tirée d'un minerai radioactif : l'uranium. **Les énergies renouvelables** qui sont produites par des sources d'énergie naturelles, que la nature renouvelle sans cesse. **Les énergies non renouvelables :**

I.3.1. Les énergies non renouvelables

Une énergie non-renouvelable est une source d'énergie qui n'est pas inépuisable (pour l'homme), et qui ne se renouvelle pas ou qui se renouvelle mais pas en quantité suffisante. Les énergies non-renouvelables peuvent être divisées en deux catégories : les énergies fossiles et l'énergie nucléaire.

I.3.1.1. Les énergies fossiles :

L'énergie fossile ce renouvelle très lentement et est très consommée. Elle est composée principalement de pétrole, gaz naturel et le charbon.

Les énergies fossiles, qui comprennent le charbon, le pétrole et le gaz, sont issues de la matière vivante, végétale ou animale. Elles contiennent du carbone dont la combustion fournit de l'énergie et génère du gaz carbonique [8].

a- Le charbon :

Le charbon contient des matières organiques volatiles et du carbone en proportion variable. Plus il est ancien, plus il est riche en carbone. Les matières volatiles s'enflamment facilement mais dégagent moins de chaleur que le carbone qui, par contre, est plus difficile à brûler.

Au début du XXe siècle, le charbon était l'énergie fossile dominante. Il représentait plus de la moitié de la consommation énergétique mondiale en énergie primaire. Même si sa contribution est

encore importante, le charbon n'est plus la première source d'énergie. En 2000, il ne représentait plus que 25 % de la consommation d'énergie primaire commerciale [8].

b- Le gaz :

De nombreuses notions permettent de caractériser le gaz naturel : C'est un combustible fossile présent naturellement sous forme gazeuse dans les roches poreuses du sous-sol. Utilisé comme source d'énergie, le gaz est composé d'hydrocarbures : principalement du méthane (CH_4) mais aussi du propane (C_3H_8), du butane (C_4H_{10}), de l'éthane (C_2H_6) et du pentane (C_5H_{12}). Le dioxyde de carbone, l'oxygène, l'azote et l'hydrogène sulfuré sont souvent présents.

Le gaz naturel possède des qualités remarquables par rapport à d'autres énergies fossiles. Celles-ci ont rendu l'utilisation du gaz naturel de plus en plus large dans le monde. L'industrie du gaz s'est développée rapidement partout dans le monde. Une analyse des caractéristiques et du développement du gaz naturel dans le monde permet de clarifier le rôle du gaz dans le mix énergétique mondial [9].

c- Le pétrole :

La formation du pétrole et du gaz est un processus complexe dont le rendement est très faible. Le pétrole s'est formé à partir du plancton qui s'est déposé au fond des mers. Les matières organiques, mélangées aux sédiments, se sont accumulées en couches qui se sont déposées à grande profondeur. Le rendement est faible puisque la plus grande partie du carbone, 99,9 %, est recyclée dans la chaîne alimentaire. Dans les eaux pauvres en oxygène, les matières organiques piégées se sont transformées, sous l'action de micro-organismes anaérobies, en macromolécules carbonées, le kérogène. Sous l'effet de la pression et de la température, le kérogène a subi un craquage thermique qui a éliminé l'azote et l'oxygène pour laisser des composés contenant du carbone et de l'hydrogène, le pétrole brut. Plus le craquage se fait à haute température, plus on obtient des chaînes carbonées courtes [8].

I.3.1.2. L'énergie nucléaire :

Outre les combustibles fossiles, l'autre catégorie de ressources non renouvelables est celle des combustibles nucléaires. Ils sont principalement obtenus par l'extraction et le raffinage du minerai d'uranium, un élément radioactif présent naturellement sous la surface de la terre. L'uranium se trouve en petites quantités, et les mineurs rassemblent souvent les gisements d'uranium pour les

raffiner et les purifier. Le minerai produit de l'énergie grâce à un processus connu sous le nom de fusion nucléaire, qui crée une pression suffisante pour faire fonctionner des turbines et générer de l'énergie nucléaire [10].

I.3.2. Les énergies renouvelables :

Une énergie renouvelable est une source d'énergie se renouvelant assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de temps humain. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le Soleil (rayonnement), mais aussi la Lune (marée) et la Terre (énergie géothermique). Soulignons que le caractère renouvelable d'une énergie dépend non seulement de la vitesse à laquelle la source se régénère, mais aussi de la vitesse à laquelle elle est consommée. Le comportement des consommateurs d'énergie est donc un facteur à prendre en compte dans cette définition. Les énergies renouvelables sont également plus « propres » (moins d'émissions de CO_2, moins de pollution) que les énergies issues de sources fossiles. Les principales énergies renouvelables sont :

- ✓ L'hydraulique.
- ✓ L'énergie solaire.
- ✓ L'énergie éolienne.
- ✓ L'énergie de biomasse.
- ✓ La géothermie. [11]

I.3.2.1. L'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 turbine. 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 (pas de rejet de GES lors de la production énergétique), de maîtriser le stockage de l'énergie potentiellement utilisable, de débarrasser les cours d'eau des déchets grâce aux différents filtres des barrages, et la technologie nécessaire à son utilisation est maîtrisée. Le bruit, l'impact sur la vie aquatique, des installations lourdes, et des sites limités pour l'exploitation sont ses principaux inconvénients [12].

I.3.2.2. L'énergie solaire :

Le flux lumineux en provenance du soleil est de 1368 W/m^2. C'est la quantité totale d'énergie reçue par unité de surface et de temps hors de l'atmosphère terrestre. La quantité d'énergie arrivant au niveau du sol est plus faible. Dans le meilleur des cas, on reçoit plutôt une énergie d'environ 1000 W/m^2 (lorsque le soleil est au zénith). À la surface de la terre, toutes les longueurs d'onde de la lumière solaire ne sont pas transmises avec la même probabilité et, heureusement, le rayonnement ultraviolet nocif est filtré par la couche d'ozone. Plusieurs raisons modulent le rayonnement solaire qui arrive au sol : le jour et la nuit, les saisons, la latitude de l'endroit et la couverture nuageuse.

L'énergie solaire peut être utilisée pour produire de la chaleur ou de l'électricité. Dans le premier cas, on parle de **solaire thermique**, dans le second de **solaire photovoltaïque**.

a- Le solaire thermique :

Le principe de l'énergie thermique consiste à transformer le rayonnement solaire en énergie thermique grâce à un fluide qui circule dans des panneaux exposés au soleil. Cette forme de conversion d'énergie peut être directe si on veut uniquement chauffer de l'eau sanitaire.

Par contre, si on veut générer de l'électricité, il faudra utiliser des générateurs qui convertissent l'énergie thermique générée en électricité (par exemple, moteurs à air chaud). L'énergie thermique utilise la chaleur du rayonnement solaire pour le chauffage de bâtiments ou de l'eau sanitaire. Pour cette dernière il est intéressant de savoir que dans certains pays le chauffage d'eau sanitaire représente environ 20% des dépenses énergétiques d'un foyer et que l'énergie solaire thermique peut subvenir à environ 80% de cette dépense énergétique [13].

b- Le solaire photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque a été mis en évidence en 1839 par Becquerel en illuminant une électrode plongée dans un liquide électrolyte. Après la découverte de la photoconductivité du sélénium, en 1873 par Smith, ce même effet a été observé sur un matériau solide par Adams et Day, en 1877. La première cellule photovoltaïque, construite en 1914, avait un rendement de 1 % ; elle était utilisée pour réaliser des posemètres pour la photographie. Il a fallu attendre 1954 pour que la production d'électricité par effet photovoltaïque commence à se développer, avec la réalisation d'une première cellule en silicium monocristallin d'un rendement de 6 %. Ce dernier augmenta

rapide ment pour atteindre, en laboratoire, 14 % en 1958. Les applications ont démarré vers le début des années 1960 avec des utilisations dans les satellites, les produits grand public comme des montres ou des calculettes ainsi que dans les systèmes de production de l'électricité pour des sites isolés.

La conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique est faite avec des matériaux semi-conducteurs. Le marché du photovoltaïque est dominé par le silicium monocristallin, poly-cristallin ou amorphe.

Les avantages du photovoltaïque sont sa fiabilité, sa modularité, son faible coût d'utilisation et le fait qu'il ne pollue pas en fonctionnement.

I.3.2.3. Éolienne :

Les énergies éoliennes sont notamment caractérisées par des déplacements de masse d'air à l'intérieur de l'atmosphère. C'est l'énergie mécanique de ces déplacements de masse d'air qui est à la base de l'énergie éolienne. L'énergie éolienne consiste ainsi à utiliser cette énergie mécanique par l'intermédiaire d'un rotor et de pales. Cette source est non polluante. Néanmoins l'énergie éolienne est intermittente, et l'installation de parc éolien engendre des impacts paysagés et sonores [14].

I.3.2.4. Énergie géothermique :

La géothermie désigne l'énergie géothermique issue de l'énergie de la Terre qui est convertie en chaleur. Classiquement, trois types de géothermie sont distingués selon le niveau de température disponible à l'exploitation :

- ✓ La géothermie à haute énergie.
- ✓ La géothermie de basse énergie.
- ✓ La géothermie de très basse énergie.

Pour utiliser cette énergie souterraine, on envoie de l'eau froide sous la Terre. Cette eau froide se réchauffe. Elle est alors pompée et ramenée à la surface où elle est utilisée soit pour produire de l'électricité dans une centrale, soit directement en tant qu'eau chaude dans les logements (eau chaude pour la douche, les radiateurs…) [13].

I.3.2.5. Biomasse :

La biomasse désigne toute la matière vivante d'origine végétale ou animale de la surface terrestre. Généralement, les dérivés ou déchets sont également classés dans la biomasse. Des différents types sont à considérer : le bois énergie, les biocarburants et le biogaz. Le bois énergie est une ressource très abondante, c'est la ressource la plus utilisée au monde. Il s'agit aussi d'énergie solaire stockée sous forme organique grâce à la photosynthèse ce qui est bien montré par la. Elle est exploitée par combustion. Cette énergie est renouvelable à condition que les quantités brûlées n'excèdent pas les quantités produites. Le problème plus important est que la biomasse n'est pas inépuisable [14].

I.4. Potentiel des énergies renouvelables :

Le potentiel de l'énergie renouvelable en algérie est le plus important d'Afrique du Nord. Le marché des énergies renouvelables est prometteur et leur promotion constitue l'un des axes de la politique énergétique et environnementale du pays.

Cependant, l'État algérien commence à adopter des solutions économiques et écologiques en investissant dans les énergies renouvelables. Selon le Programme algérien de développement des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique (PENREE), l'Algérie vise une puissance installée d'origine renouvelable de 22 000 MW d'ici 2030 par contre aujourd'hui en 2015, la puissance installée d'origine renouvelable est de l'ordre de 650 MW [15].

I.4.1. Potentiel Solaire :

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose de l'un des gisements solaires les plus importants du monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures sur les hauts plateaux et le Sahara. L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m2 est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit prés de 1700 kWh /m2/an au Nord et 2263 kWh/m2/an au sud du pays.

Les cartographies ci-après présentent la moyenne annuelle de l'irradiation globale reçue sur une surface horizontale en Algérie, ainsi que la durée d'ensoleillement annuel.

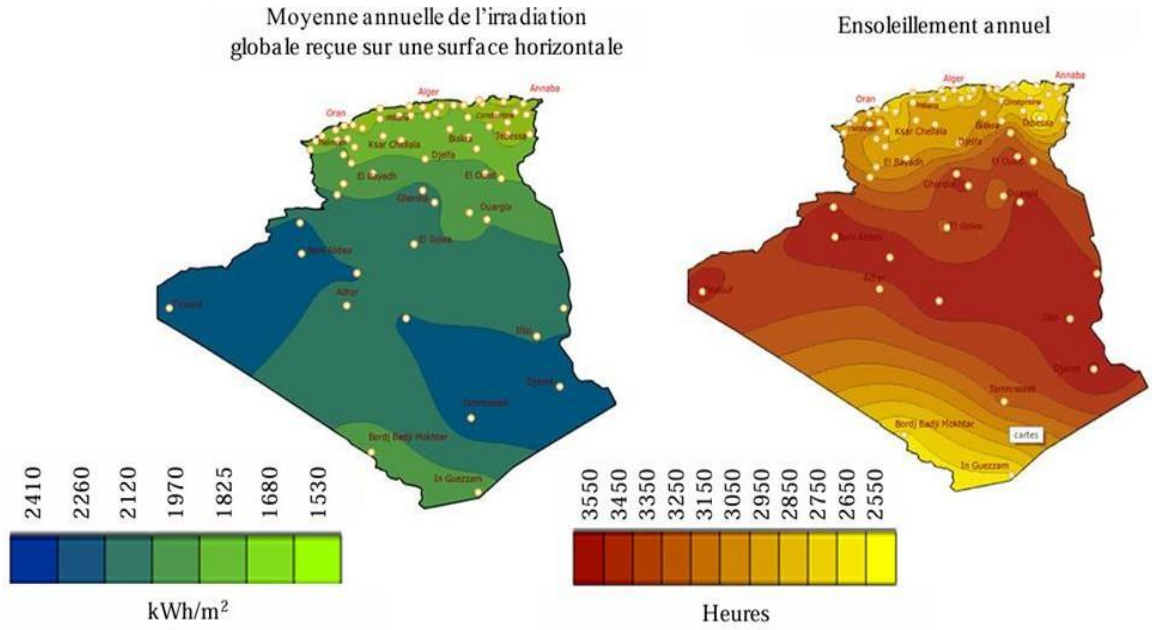


Figure I.1 : Irradiation globale et durée d'ensoleillement annuel en Algérie [16].

I.4.2. Potentiel Eolien :

La ressource éolienne en Algérie varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et un climat très diversifiés. En effet, notre vaste pays, se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes. Le Nord méditerranéen qui est caractérisé, par un littoral de 1200 Km et un relief montagneux, représenté par les deux chaines de l'Atlas tellien et l'Atlas saharien. Entre elles, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le Sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien. La carte représentée ci-dessous montre que le Sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement dans le Sud-Est, avec des vitesses supérieures à 7 m/s et qui dépassent la valeur de 8 m/s dans la région de Tamanrasset (In Amguel). Concernant le Nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaïa et Annaba, sur les hauts plateaux de Tébessa, Biskra, M'sila et El bayadh (6 à 7 m/s), et le Grand Sud (>8m/s).

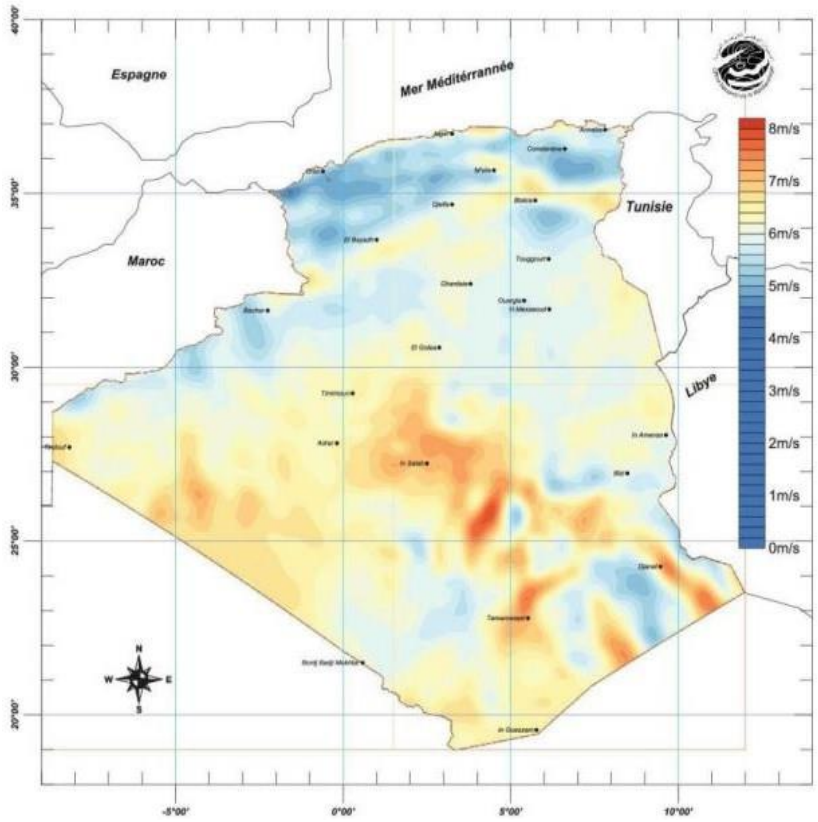


Figure I.2 : Carte du Vent Annuel Moyen à 50m (Période 2001-2010) [17].

I.4.3. Potentiel géothermique :

L'Algérie est caractérisée par un riche potentiel d'énergie géothermique.

Le Nord de l'Algérie renferme plus de 240 sources thermales réparties de l'Est à l'Ouest et qui sont de plus forte concentration à l'Est.

Le Sud de l'Algérie renferme une importante réserve d'eau thermale en profondeur dans l'Albien (aussi appelée la nappe albienne). L'aquifère albien constitue le réservoir géothermique principal du Sud de l'Algérie. Il s'étend en Algérie sur une superficie de 600.000km².

L'évaluation du potentiel géothermique constitue un support efficace aux responsables de la gestion des ressources en eau géothermale et milieu naturel pour les futures activités touristiques dans le domaine de l'hydrothermalisme.

Ainsi, des études d'évaluation permettent une expertes et une assistance technique pour les projets publics qui rentrent dans le domaine de la basse enthalpie en Algérie. Elles constituent également un support important dans le domaine de l'exploitation de la géothermie dans la

production de l'électricité, de la chaleur et du froid et dans le chauffage des serres agricoles et dans la pisciculture. Il est prévu de produire 15 mégawat d'électricité à partir de la géothermie dans le cadre du programme des énergies renouvelables.



Figure I.3 : Localisation et température des ressources géothermiques de l'Algérie [18].

I.4.4. Potentiel Hydraulique :

Les quantités globales tombant sur le territoire Algérien sont importantes et estimées à 65 milliards de m^3, mais finalement profitent peu au pays : nombre réduit de jours de précipitation, concentration sur des espaces limités, forte évaporation, évacuation rapide vers la mer. Les ressources de surface décroissent du nord au sud. On évalue actuellement les ressources utiles et renouvelables de l'ordre de 25 milliards de m^3, dont environ 2/3 pour les ressources en surface. 103 sites de barrages ont été recensés. Plus de 50 barrages sont actuellement en exploitation [17].

I.4.5. Potentiel de biomasse :

Le Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) a réalisé une étude préliminaire sur le potentiel énergétique des déchets ménagers et assimilé (DMA), des statons d'épurations des eaux usées (STEP) et des déchets issus de l'agriculture et des industries

agroalimentaires. Ces sources étant disponibles de manière durable et en quantité, dans la mesure où la population algérienne continue de croître, de même pour ses revenus moyens.

Les résultats de cette étude montrent que la valorisation énergétique de ces sources, permet la production d'un potentiel exploitable de près de 1 milliard de mètres cube de biogaz. Transformée en électricité, cette quantité de biogaz permet de produire plus de 1700 GWh/an, soit la consommation moyenne annuelle de 1,5 million d'algériens.

Potentiel de la forêt

Le potentiel actuel est évalué à environ 37 Millions de TEP (Tonnes Equivalent Pétrole). Le potentiel récupérable est de l'ordre de 3,7 Millions de TEP. Le taux de récupération actuel est de l'ordre de 10%.

Potentiel national des déchets ménagers et assimilés

05 millions de tonnes de déchets urbains et agricoles ne sont pas recyclés. Ce potentiel représente un gisement de l'ordre de 1.33 millions de TEP/an [18].

I.5. Problématique énergétique :

Avec le développement de l'industrie depuis plusieurs décennies, nous consommons de plus en plus de ressources d'énergies pour pouvoir satisfaire les besoins croissants en énergie de la population. Presque 80% de la production mondiale d'énergie provient du charbon, du pétrole, du gaz naturel et le reste du nucléaire, etc. L'épuisement de ces ressources devient être un problème qui préoccupe chacun d'entre nous, les questions énergétiques recouvrent à l'heure actuelle deux domaines. L'un est lié au risque d'épuisement des ressources fossiles et fissiles, notamment celle du pétrole qui au rythme actuel de consommation, est prévue pour dans un siècle ou moins. L'autre est le problème de la pollution environnementale, notamment l'émission de CO_2 (gaz à effet de serre) et de gaz polluants (SO_2, NO_x, CO, CH_4, photofluorographies, particules solides, etc.), provenant des véhicules de transport ou de l'entreprise industrielle (figure I.4).

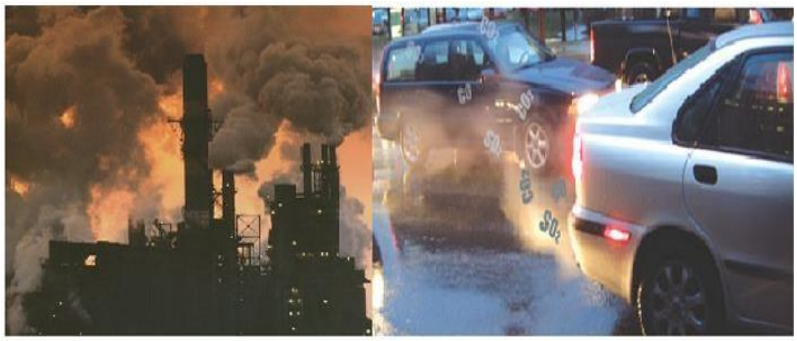


Figure I.4 : Pollution environnementale [19].

Depuis le 19ème siècle, de plus en plus de CO2 est libéré (figure 1.5), il est désormais important de stopper cette progression et de la réduire le plus possible [19].

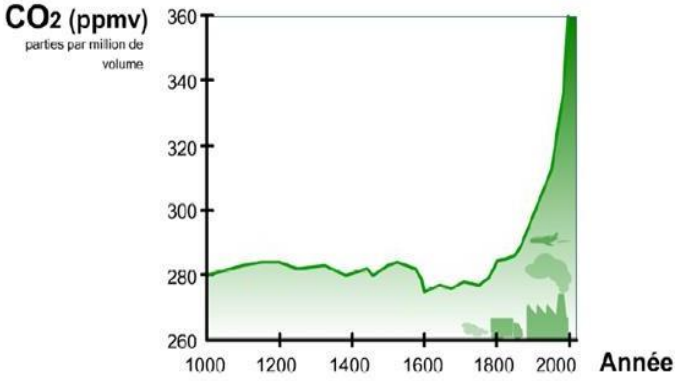


Figure 1.5: Accroissement de CO2 depuis le 19ème siècle [19].

I.5.1. Le réchauffement climatique :

Le réchauffement climatique fait partie des défis environnementaux, sociaux et économiques les plus importants que l'humanité doit affronter. L'effet de serre est un phénomène naturel important pour la survie de la planète. Il permet d'avoir une température moyenne sur Terre de 15° C contre -18°C si cet effet n'existait pas.

Cependant les concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre ont augmenté depuis l'époque préindustrielle en raison des activités humaines, principalement la combustion des combustibles fossiles et les changements d'affectation des terres et de la couverture terrestre. Des mesures d'adaptation aux changements climatiques doivent être adoptées pour promouvoir la conservation et l'utilisation durable de la diversité biologique et diminuer les incidences des changements climatiques et des extrêmes climatiques sur la diversité biologique.

Au cours de ces dernières décennies, différents symptômes du changement climatique ont déjà été observés :

- ✓ Le recul généralisé des glaciers dans le monde.
- ✓ La montée régulière du niveau des mers.
- ✓ La multiplication des épisodes de canicule et de sécheresse.
- ✓ Les cyclones et pluies torrentielles.
- ✓ La perte très marquée de biodiversité dans le monde [11].

I.5.2. L'effet de serre :

Tous les combustibles fossiles produisent du gaz carbonique (CO_2) en brûlant et contribuent à accroître l'effet de serre, ce qui peut avoir un impact négatif sur le climat. Toutefois, la quantité libérée dépend de la nature du combustible. Plus celui-ci contient d'hydrogène dans sa molécule, moins il rejette de gaz carbonique. Pour la même quantité d'énergie produite, le charbon, composé essentiellement de carbone pur C, est celui qui en produit le plus. Le gaz, composé majoritaire ment de CH_4, est le combustible fossile qui en rejette le moins. Le pétrole, approximativement $(CH_2)_x$, émet des quantités intermédiaires. Le tableau I.1 indique les fourchettes d'émissions pour la production d'un kWh électrique.

Mode de production	**Émission (g/kWh)**
Charbon	860-1290
Pétrole	700-800
Gaz	480-780
Nucléaire	4-18
Éolien	11-75
Solaire photovoltaïque	30-280
Biomasse	0-116

Tableau I.1 : Émissions de CO_2 par kWh électrique produit pour différentes sources d'énergie[8].

On tient compte de la chaîne complète de production et non seulement des émissions en fonctionnement.

Dans le tableau I.1, nous avons aussi indiqué les fourchettes de production pour d'autres sources d'énergie. Ces chiffres se rapportent, comme pour les combustibles fossiles, à l'ensemble de la chaîne énergétique. Ainsi, le nucléaire et le photovoltaïque ne produisent pas de CO_2 en fonctionnement. Toutefois, des gaz contribuant à accroître l'effet de serre sont émis lors de la construction des centrales nucléaires ou des panneaux photovoltaïques, des transports, etc [8].

I.6. Le contexte énergétique mondial :

Le XXIe siècle sera un siècle de transition énergétique. L'ensemble des experts spécialisés dans le domaine de l'énergie, s'accorde à le concevoir. Une transition entre : la situation actuelle, où les hydrocarbures (notamment le pétrole) tiennent une place prépondérante dans la consommation énergétique, particulièrement dans les transports, et un futur proche, où d'autres sources d'énergie (énergies renouvelables) viendront progressivement prendre le relais. Cette transition doit se concevoir dans une logique de développement durable, tant du point de vue de la préservation de l'environnement que de la pérennité des sources d'approvisionnement.

La situation actuelle est marquée par trois aspects, d'abord la demande énergétique mondiale devrait inévitablement progresser, en raison de la croissance démographique et économique, notamment dans les pays en voie de développement. Ensuite les ressources en énergies fossiles ne sont pas inépuisables. Les progrès technologiques ont permis et permettront encore de repousser les limites des réserves. Mais l'horizon d'un plafonnement de la production, puis d'une raréfaction du pétrole doit cependant être dès aujourd'hui pris en compte, même si la date du "pic pétrolier" reste incertaine. Enfin, aucune politique économique et énergétique ne peut ignorer la question du changement climatique, dû aux émissions de gaz à effet de serre. Même si la prise de conscience de ce phénomène peut sembler lente au regard des enjeux pour la planète, elle est néanmoins réelle et de plus en plus forte [20].

I.6.1. Qu'est-ce que la transition énergétique :

Parallèlement, la « transition énergétique » est entourée par le cercle vicieux commencé par l'explosion démographique qui fait augmenter la demande d'énergie. Elle est accentuée également par les inconvénients des énergies fossiles : les limites de ressources d'énergies fossiles, la dépendance énergétique, la crise de l'énergie comme le choc pétrolier, et les émissions de CO_2. La transition énergétique est accélérée par le réchauffement climatique rendu notamment par les gaz

à effet de serre dont le CO_2. Elle est soutenue également par la sortie du nucléaire à cause du danger par la gestion de déchets de combustibles fossiles et l'accident des centrales nucléaires. Le cercle vicieux de la transition énergétique peut être présenté sous forme de schéma des notions ci-dessous (Kanjanapinyowong 2019).

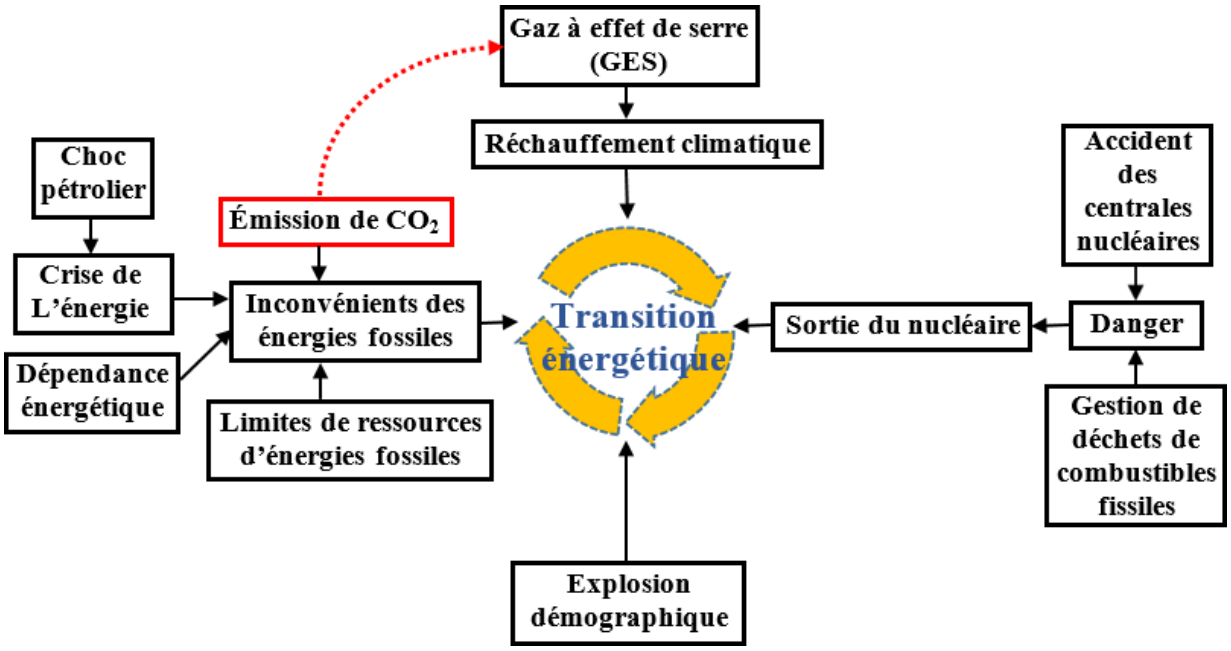


Figure I.6 : Cercle vicieux de la notion (transition énergétique) [21].

I.6.2. L'impact de la transition énergétique :

Une nouvelle considération est venue complexifier les prévisions. La transition énergétique, engagée dans de nombreux pays et formalisée au niveau mondial par l'Accord sur le climat, fait qu'il est n'est plus possible de raisonner seulement en termes d'offre, comme le faisait Hubbert. Les énergies fossiles seront encore nécessaires pendant des décennies, mais la demande devrait diminuer avec le temps. On peut maintenant raisonnablement espérer que la production mondiale de pétrole diminue suite à une baisse de la demande et non plus du fait de l'épuisement des gisements. Une nouvelle ère qui correspondrait à la formule célèbre : « on n'est pas passé de l'âge de pierre à l'âge de fer à cause d'un manque de pierres » (Inégalité répétition) Il est donc nécessaire d'adopter rapidement de nouvelles énergies pour remplacer les énergies fossiles, qui s'épuisent progressivement et qui sont polluantes. Les pays du Nord, qui ont les moyens techniques et

financiers, ont déjà entamé leur transition énergétique. Dans les pays du Sud, la situation est plus compliquée. Ils manquent encore de moyens financiers pour développer des énergies renouvelables. La question énergétique est donc un enjeu central du développement durable au (21e) XXIe siècle [21].

I.7. Programme de développement des énergies renouvelables en Algérie :

Par le biais de ce programme d'énergies renouvelables, l'Algérie entend se positionner comme un acteur majeur dans la production d'électricité à travers l'énergie photovoltaïque et éolienne en intégrant la biomasse, la cogénération, la géothermie et au-delà de 2021, le solaire thermique. Ce sont les filières énergétiques qui seront les ressorts d'un développement économique durable capable de conduire un nouveau modèle de croissance économique. En 2030, 37% de la capacité installée et 27% de la production d'électricité pour la consommation nationale seront d'origine renouvelable.

Dans la mesure où le potentiel national d'énergies renouvelables est fortement dominé par l'énergie solaire, l'Algérie considère cette énergie comme une potentialité et un moyen de développement économique et social. Les projets d'ER pour la production d'électricité dédiée au marché national seront réalisés en deux étapes :

Première phase 2015 - 2020 : Cette phase verra la réalisation d'une puissance de 4010 MW, entre photovoltaïque et éolien, ainsi que 515 MW, entre biomasse, cogénération et géothermie.

Deuxième phase 2021 - 2030 : Le développement de l'interconnexion électrique entre le Nord et le Sahara (Adrar), permettra l'installation de grandes centrales d'énergies renouvelables dans les régions d'In Salah, Adrar, Timimoune et Bechar et leur intégration dans le système énergétique national. A cette échéance, le solaire thermique pourrait être économiquement viable.

Les programmes d'énergie renouvelable à réaliser pour le marché national au cours de la période 2015-2030 ont une consistance de 22 000 MW, avec une répartition par filière comme l'indique la figure I.7 [22].

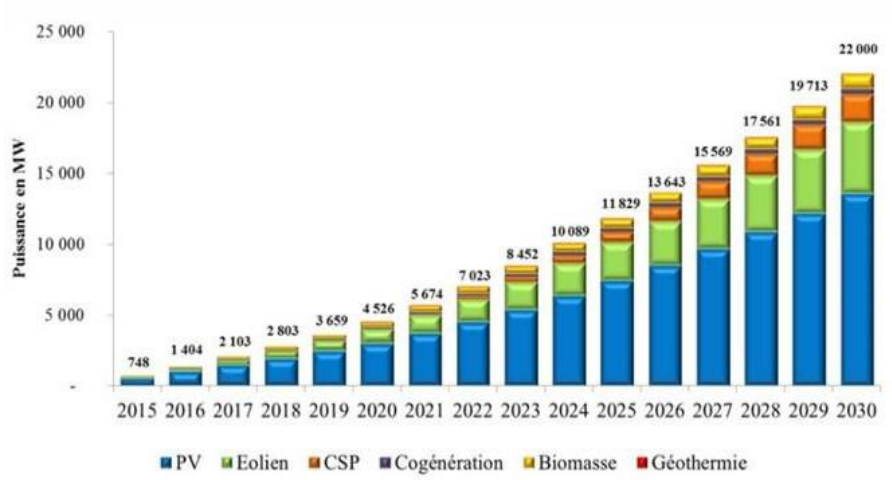


Figure I.7 : Consistance du programme de développement des énergies renouvelables (Période 2015-2030) [22].

I.8. Conclusion :

Par leur commodité et par le fait qu'ils ont une densité d'énergie élevée, les combustibles fossiles n'ont eu, dans le passé, aucun mal à s'imposer vis-à-vis des énergies renouvelables. **Le charbon** s'imposa ainsi dès le milieu du XIXe siècle, **le pétrole** au début du XXe. Malgré ces avantages, leur utilisation massive a un impact mesurable sur l'environnement : accroissement de l'effet de serre et pollutions diverses. Les combustibles fossiles sont, de plus, en quantité finie sur la terre, ce qui pose le problème de leur raréfaction prochaine. **Le charbon** est le plus polluant mais ses réserves sont considérables par rapport aux autres ressources fossiles. **Le pétrole** est le combustible le plus commode car il est liquide et facile à transporter. Il est encore irremplaçable pour les transports. Les principaux atouts du **gaz** sont son faible caractère polluant et le haut rendement des dispositifs de combustion. La consommation de gaz est en pleine expansion. Cette source d'énergie demande néanmoins des investissements et des infrastructures très lourds. Aussi le coût du transport est une part importante du prix du kWh final.

L'énergie nucléaire permet de produire des quantités considérables d'énergie à un coût très compétitif par rapport aux autres sources. Tout ce qui touche au nucléaire et à la radioactivité conduit parfois, chez certains de nos concitoyens, à une peur irraisonnée qui trouve sans doute une partie de ses origines dans l'utilisation de l'arme atomique en 1945. Il reste enfin le problème des déchets, problème qu'il ne faut pas sous-estimer.

Les énergies renouvelables font l'objet d'un regain d'intérêt grâce aux progrès de la technologie. Elles sont intéressantes dans certaines niches de marché comme les endroits isolés, en bout de réseau électrique, etc. Elles sont indispensables pour les pays en voie de développement à faible densité de population. Leur utilisation pour produire de la chaleur n'est sans doute pas assez exploitée et de gros progrès pourraient être faits dans ce domaine.

Chapitre 2

Généralités sur les systèmes photovoltaïques

II.1. Introduction :

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie provenant de photons, comprise dans le rayonnement solaire, en énergie électrique, par le biais de capteurs fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du visible (nommés cellules PV) [23].

La modélisation mathématique des cellules solaires est indispensable pour toute opération d'optimisation du rendement ou de diagnostic du générateur photovoltaïque et s'impose comme une étape cruciale et a conduit à une diversification dans les modèles proposés par les différents chercheurs.

Le but de ce chapitre est de présenter le principe de la conversion, types des cellules. Ainsi les caractéristiques du module PV, On va présenter aussi l'élément de base du système PV qui est la cellule PV, ainsi que les différents types du système photovoltaïque.

II.2. Rayonnement solaire :

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19 % d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus depuis que Langevin et Perrin, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance, il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène–hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium, la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement.

Sa lumière, à une vitesse de 300000 km/s, met environ 8 minutes pour parvenir à la terre, sa distribution spectrale de l'atmosphère présente un maximum pour une longueur d'onde d'environ 0.5µm, la température de corps noir à la surface du soleil est d'environ 5780°k :

Diamètre de soleil : $D_s = 1.39 \times 10^9 m$.

Diamètre de la terre : $D_t = 1.27 \times 10^7 m$.

Distance moyenne soleil-terre : $Lts = 1.5 \times 10^{11} m$. [24]

II.3. Spectre solaire :

Le spectre du soleil c'est sa décomposition en longueurs d'onde ou couleurs. La lumière solaire est en effet composée de toutes sortes de rayonnements de couleurs différentes, caractérisées par leur gamme de longueur d'onde. Des photons, grains de lumière composent ce rayonnement électromagnétique. Louis de Broglie en 1924 a confirmé la nature à la fois corpusculaire et ondulatoire de la lumière : présence de corpuscules (les photons) et propagation d'ondes avec une fréquence de vibration et une longueur d'onde. Le rayonnement émis par le soleil correspond à celui du corps noir à la température de 6000 °C. L'intensité du rayonnement au-dessus de l'atmosphère est de 1.35 kW/m^2, avec un spectre centré au voisinage de λ=0.48 μm. A la surface du sol la densité de puissance n'est plus que de 0.9 kW/m^2, en raison de l'absorption essentiellement par l'ozone, l'eau et le gaz carbonique. En outre, le spectre n'est plus continu mais présente des bandes d'absorption. Pour mesurer l'effet de l'atmosphère on utilise l'air masse, défini par AM=1/cosα ou α représente l'angle que fait la direction du soleil avec la verticale. AM_0 est utilisé pour préciser les conditions au-dessus de l'atmosphère. AM 1.5 étant celui atteignant le sol par temps clair (surface d'un mètre carré faisant un angle de 48° avec l'équateur). De plus, on distingue les spectres AM1.5D et AM1.5G qui correspondent respectivement au flux direct et au flux global (direct + diffus). Ces spectres sont donnés sur la figure II.1, sur laquelle sont aussi indiqués quelques semi-conducteurs utilisés pour les applications photovoltaïques et leurs énergies de gap E_g. [25]

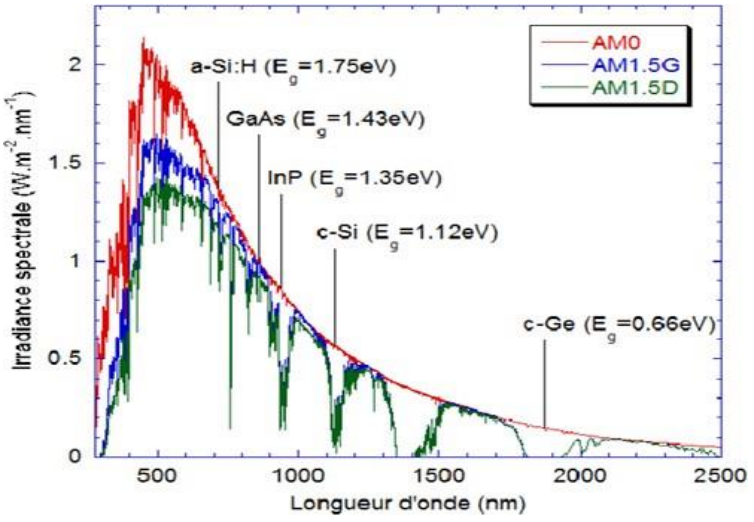


Figure II.1: Irradiance ou spectre solaire à la surface de l'atmosphère terrestre (AM0) et au sol (AM1.5D et AM1.5G) [25].

Les semi-conducteurs les plus couramment utilisés pour le photovoltaïque sont indiqués à la longueur d'onde correspondant à leur énergie de gap E_g à la température ambiante [25].

II.4. Principe de la conversion photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule. La figure II.2 illustre une cellule PV typique où sa constitution est détaillée. Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. A travers une charge continue, on peut en plus récolter des porteurs. La tension maximale de la cellule est d'environ 0.6 V pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert (V_{OC}). Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit (I_{CC}) et dépend fortement du niveau d'éclairement.

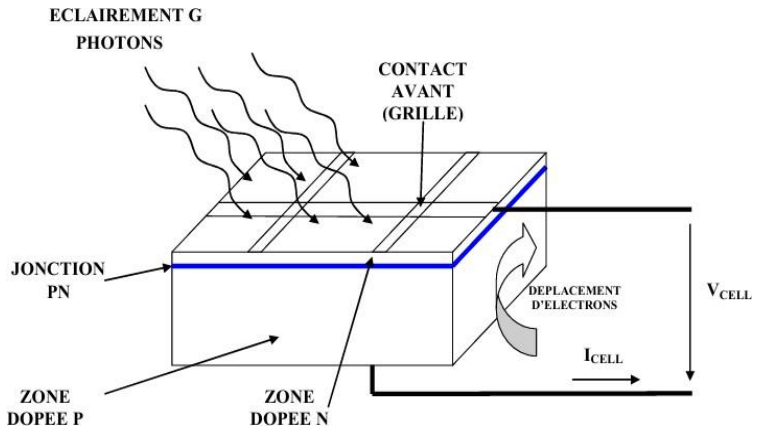


Figure II.2 : Coupe transversale d'une cellule PV typique [26].

II.5. Systèmes Photovoltaïques :

Les modules photovoltaïques (PV) sont les éléments de base de tout système photovoltaïque. Ils peuvent être branchés en série pour augmenter leur tension d'utilisation et en parallèle pour augmenter leur courant. Cet ensemble est appelé le champ de modules PV (Figure II.3). L'énergie fournie par le champ peut être utilisée pour charger des batteries qui fourniront l'électricité au moment voulu. Elle peut aussi être utilisée en reliant directement les modules à la charge sans les batteries (comme pour une pompe solaire où l'eau sert de stockage), ou en les branchant sur un réseau électrique. Il est également possible de combiner la sortie du champ PV avec d'autres sources d'énergie telles une génératrice ou une éolienne qui serviront d'appoint, si l'ensoleillement n'est pas suffisant [27].



Cellule **Panneau** **Champ**

Figure II.3 : Composantes d'un champ de panneaux photovoltaïques [27].

II.5.1. Cellule photovoltaïque :

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. 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 anti-reflet 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 [28].

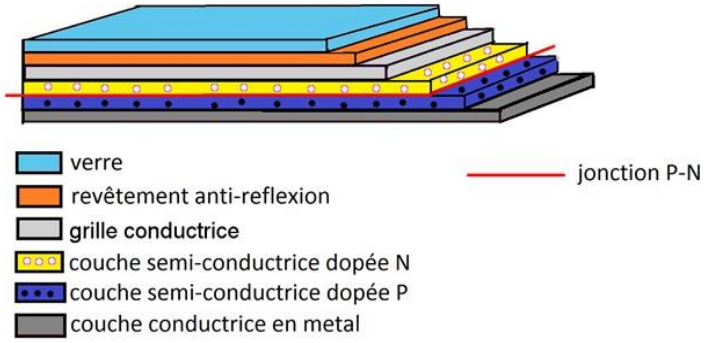


Figure II.4 : Structure basique d'une cellule solaire [29].

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule [28].

II.5.2. Le module photovoltaïque :

L'énergie produite par une seule cellule photovoltaïque n'est pas suffisante pour un usage général. Normalement, une seule cellule photovoltaïque génère une tension et un courant de sortie relativement faibles. Le module PV est construit en connectant des groupes de cellules PV en série et en parallèle avec leurs dispositifs de protection, ce qui représente l'unité de conversion dans le système de production. En connectant de nombreuses cellules en série, la tension du module PV est augmentée et les pertes par conduction dans les câbles sont minimisées, tandis que la connexion en parallèle des cellules augmente le courant. Un module PV représente l'élément de base pour la production d'énergie PV à grande échelle. La plupart des modules commerciaux sont composés de 36 ou 72 cellules. Les modules se composent d'une face avant transparente, des cellules PV

encapsulées et d'une face arrière. Le matériau de la face avant est généralement constitué de verre trempé et à faible teneur en fer (Figure II.5). Le rendement d'un module PV est inférieur à celui d'une cellule PV car une partie de l'irradiation solaire est réfléchie par la couverture en verre et l'ombre portée du cadre [29].

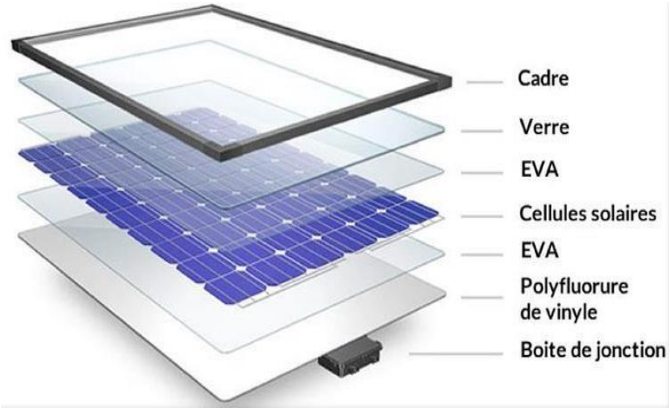


Figure II.5: Module photovoltaïque [29].

La courbe de la figure II.6, montre les caractéristiques non linéaires du panneau solaire qui dépend particulièrement des conditions d'ensoleillement et de température.

Cependant, plusieurs grandeurs électriques importantes décrire le fonctionnement du module photovoltaïque sont :

- ✓ Le courant maximal (I_{sc}). Il se produit lorsque les bornes du module sont court-circuitées. Il est appelé courant de court-circuit (I_{sc}) et dépend fortement du niveau d'éclairement.
- ✓ La tension à vide (V_{oc}) pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert.
- ✓ Le point de fonctionnement optimal PPM (la puissance maximale du module) [30].

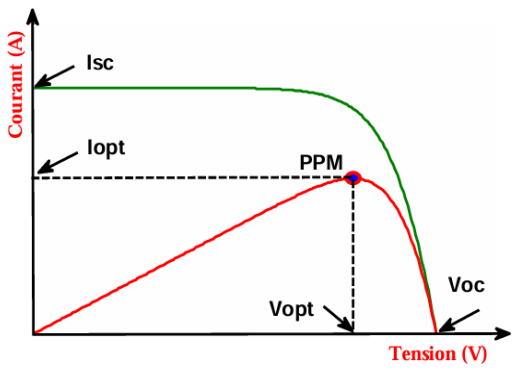


Figure II.6 : Caractéristique électrique d'un module photovoltaïque [30].

II.5.3. Le champ photovoltaïque :

Le module photovoltaïque est par définition un ensemble de photopiles assemblé pour générer une puissance électrique exploitable. En effet, une photopile élémentaire ne génère pas suffisamment de tension (entre 0.5 et 1.5 V selon les technologies). Un module photovoltaïque se compose généralement d'un circuit de 36 cellules en série. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthylène-vinyle-acétate) et protégé sur la surface avant d'un verre trempé à haute transmission et d'une bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière d'un polyéthylène. Afin d'obtenir des puissances de quelques kilowatts à quelques mégawatts, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en série et en parallèle pour former un panneau ou un champ photovoltaïque [31].

✓ **Association en série** :

Les connexions en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant (Figure.II.7).

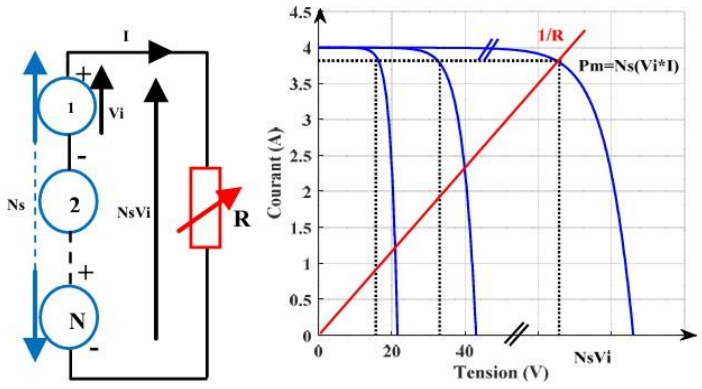


Figure.II.7 : Cellules en série [32].

✓ **Association en parallèle :**

Les connexions en parallèle de plusieurs cellules augmentent le courant pour la même tension.

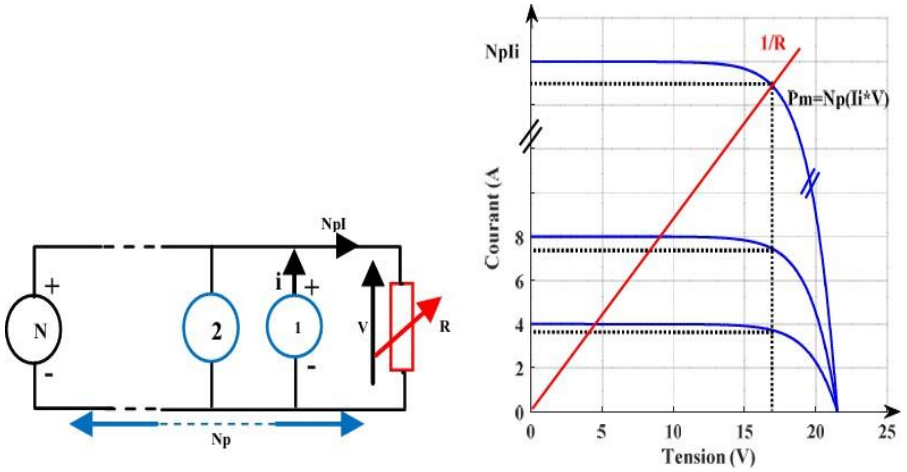


Figure.II.8 : Cellules en parallèles [32].

II.6. Les principaux types de cellule :

Les cellules les plus répondues actuellement sont à base de silicium (différence de potentiel de 0,6 V). Le tableau II.1 illustre le rendement des modules et des cellules en fonction des différentes technologies :

Technologie	Rendement de la cellule (laboratoire)	Rendement de la cellule (Production)	Rendement du module (Production)
Mono cristallin	24.7	21.5	16.9
Poly cristallin	20.3	16.5	14.2
Couche mince : Amorphe	13	10.5	7.5

Tableau II.1 : Principaux types de cellule [33].

II.6.1. Cellule en silicium amorphe :

Le silicium n'est pas cristallisé, il est déposé sur une feuille de verre. La cellule est grise très foncé. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites "solaires".

Avantages

- ✓ Elles fonctionnent avec un éclairement faible (par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment).
- ✓ Elles sont moins chères que les autres.

Inconvénients

- ✓ Leur rendement (environ 10%) est moins bon que les autres en plein soleil,
- ✓ Leurs performances diminuent sensiblement avec le temps.

II.6.2. Cellule en silicium monocristallin :

Lors du refroidissement du silicium fondu on s'arrange pour qu'il se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme.

Avantage

- ✓ Bon rendement (environ 20%).

Inconvénients

- ✓ Les cellules sont chères,
- ✓ Fonctionnement très médiocre sous un faible éclairement.

II.6.3. Cellule en silicium polycristallin :

Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. Ce genre de cellule est également bleu, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.

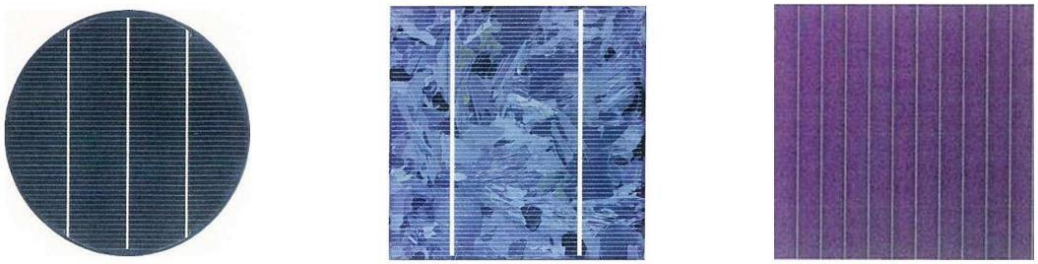
Avantages :

- ✓ Bon rendement (environ 13%), mais cependant moins bon que pour le monocristallin
- ✓ Moins cher que le monocristallin.

Inconvénients :

- ✓ Les mêmes que le monocristallin.

Ce sont les cellules les plus utilisées pour la production électrique (meilleur rapport qualité-prix). Il existe d'autres types de cellule qui sont en cours de développement et que nous ne citerons pas ici [33].



Cellule monocristalline Cellule polycristalline Cellule amorphe

Figure II.9 : Principaux types de cellule [33]**.**

II.7. Modélisation d'un générateur photovoltaïque :

II.7.1. Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque :

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. Ces modèles exigent la connaissance de quatre paramètres aux conditions standards de l'ensoleillement et de la température. Les paramètres sont généralement donnés par le fabricant ou peuvent être obtenus à partir des essais de module sous trois conditions : courant à court-circuit (I_{sc}), tension à circuit ouvert (V_{oc}) et la tension (V_{mpp}) et le courant (I_{mpp}) au point maximum de puissance. Des coefficients de la température sont également nécessaires dans cette technique de modélisation pour considérer l'effet de la température sur les paramètres importants de la cellule solaire.

II.7.1.1. Model idéal d'une cellule photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque peut être étudiée à partir circuit équivalent donné par la figure II.10 composé d'un générateur à courant et d'une diode en parallèle.

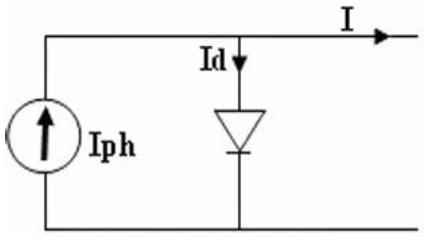


Figure II.10 : Schéma électrique idéal d'une cellule photovoltaïque [34].

Donc le courant aux bornes de la cellule est :

$$I = Iph - Id \quad (II.1)$$

Iph: photo- courant. Id : courant traversant la diode.

$$Id = Is\,[\exp.(\frac{V}{U_T}) - 1] \quad (II.2)$$

$$\text{Avec} \quad U_T = \frac{k.T}{q} \quad (II.3)$$

q : charge de l'électron ($1.9*10^{e}$ -19coul).

k : la constante de Boltzmann.

U_T : tension thermique.

Is : courant de saturation.

V : tension à la borne de la diode.

T : température absolue (en kelvin).

Si on trace le courant (I) en fonction de la tension (v) en a une soustraction de deux courbes :

Id : la caractéristique de la diode I (V).

$$I(V) = Iph - I = Iph - Is\,[\exp.(\frac{V}{U_T}) - 1] \quad (II.4)$$

La figure II.11, représente les différentes courbes [34] :

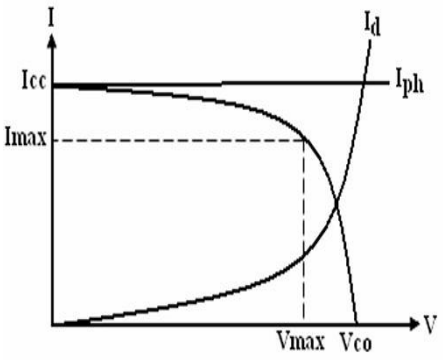


Figure II.11 : La caractéristique I (V) d'une cellule photovoltaïque [34].

II.7.1.2. Modèle réel d'une cellule photovoltaïque :

Dans le cas d'une cellule photovoltaïque réelle, d'autres paramètres tenant compte des effets résistifs, des recombinaisons, des fuites vers les bords, doivent être pris en considération. Le modèle mathématique du générateur photovoltaïque est basé sur le circuit équivalent. Cette circuit est représenté sur la figure II.12 par un générateur de courant Icc, une diode et deux résistances Rs et Rsh.

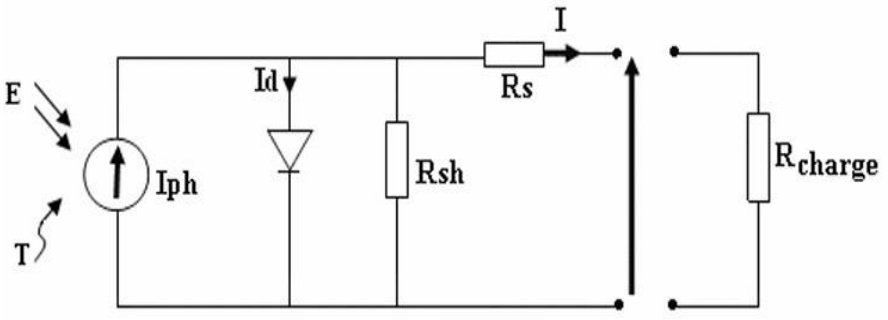


Figure II.12 : Schéma électrique réel d'une cellule photovoltaïque [34].

- ✓ Rs est une résistance série liée à la résistivité volumique et à l'impédance des électrodes et des matériaux. La pente de la courbe courant-tension au point Voc représente l'inverse de la résistance série (1/Rs).
- ✓ Rsh est une résistance shunt liée aux effets de bord et aux recombinaisons volumiques. La pente de la courbe courant tension au point Icc représente l'inverse de la résistance shunt (1/Rsh). Le photo courant I_{ph} crée dans la structure par une partie de rayonnement absorbé (ce courant est pratiquement le courant de court-circuit de la cellule).
- ✓ Le courant direct I_d d'obscurité de la jonction [34].
- ✓ Le courant I généré par la cellule et fourni à la charge.
- ✓ Le courant I_p correspond au courant des connexions parallèles.

Cet équilibre s'écrit :

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \qquad \text{(II-5)}$$

Selon le schéma équivalent d'une cellule solaire dans La figure (II.5), on a :

$$I = I_{ph} - I_d - \left(\frac{V + I\ R_s}{R_{sh}}\right) \qquad \text{(II.6)}$$

$$\Rightarrow I = I_{ph} - I_s\left[exp\left(\frac{(V + R_s I}{AU_T}\right) - 1\right] - \left(\frac{V + R_s I}{R_{sh}}\right) \quad \text{(II.7)}$$

R_s : résistance série

R_{sh} : résistance shunt

A : Facteur de qualité

II.7.1.3. Paramètres des cellules photovoltaïques :

Les paramètres des cellules photovoltaïques (I_{CC}, V_{CO}, Pmax, A, ff et η), extraits des caractéristiques courant-tension, permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques.

a) Courant de court-circuit, I_{CC} :

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant V= 0 dans le schéma équivalent). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température.

On peut écrire : $I_{cc}\,(V = 0) = Iph$ (II-8)

b) Tension à circuit ouvert, V_{CO}

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse [34].

On peut écrire : $V_{co}\,(I = 0) = AU_T \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right)$ (II-9)

c) Puissance maximale :

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairement dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale (notée P_{max}) pour un point de fonctionnement P_{max} (I_{max}, V_{max}) de la courbe courant-tension (courants compris entre 0 et I_{CC} et tension comprise entre 0 et V_{CO}) (Figure II.11). Donc la puissance fournie par la cellule est donnée par le produit (V.I) [34] :

$$P = V\,(I_{ph} - I_s\,[\exp(\frac{V}{AU_T}) - 1]) \quad \text{(II-10)}$$

Cette puissance fournie est maximale au point définit par :

$$\frac{\partial P}{\partial V} = \frac{\partial I}{\partial V} + I = 0 \quad \text{Soit :}$$

$$I_{ph} - I_s\,[\exp(\frac{V}{AU_T}) - 1] - V\,I_s\,(\frac{1}{AU_T})\exp(\frac{V}{AU_T}) = 0 \quad \text{(II.11)}$$

La tension V_{max} et le courant Imax correspondant ou maximum de puissance, sont alors données par :

$$(1 + \frac{V_{max}}{AU_T})\exp(\frac{V_{max}}{AU_T}) = 1 + \frac{I_{ph}}{I_s} \quad \text{(II-12)}$$

Donc :

$$I_{max} = I_s\,\frac{V_{max}}{AU_T}\exp(\frac{V_{max}}{AU_T}) \quad \text{(II-13)}$$

Le produit (V_{max}. I_{max}) donne la puissance maximale qui représente 80% environ du produit (V_{CO}.I_{CC}).

d) Facteur de qualité :

C'est un paramètre dépendant de la qualité de la diode, (compris entre 1 et 2).

e) Facteur de forme :

On appelle facteur de forme ff (filling factor), le rapport entre la valeur maximale de la puissance pouvant être extraite (P_{max} = I_{max} x V_{max}) de la photopile sous les conditions de mesures standardisées, et le produit Icc x Vco où :

$$ff = \frac{P_{max}}{V_{wo}.\,I_{ww}} \quad \text{(II-14)}$$

Pour une cellule de fabrication industrielle, le facteur de forme est de l'ordre de 70%.

f) Rendement d'une cellule solaire :

Le rendement est donné par le rapport de la puissance électrique maximale générée à la puissance du rayonnement solaire incident [34] :

$$h_c = \frac{V_{max}. I_{max}}{P_{solaire}} \quad \text{(II-15)}$$

II.8. Types de systèmes photovoltaïques :

Il y a principalement deux types d'installations : autonomes et reliées au réseau public, avec une version hybride qui s'appuie sur l'autonomie en la combinant à d'autres technologies.

II.8.1 Système isolé ou autonome :

Un système photovoltaïque isolé (figure II.13) alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique. Il est surtout populaire pour les habitations éloignées du service public pour lesquelles le raccordement au réseau serait trop onéreux : les maisons en site isolé, sur des îles, en montagne. Ce type de système nécessite l'utilisation de batteries pour le stockage de l'électricité et d'un contrôleur de charge pour assurer la durabilité des batteries [35].

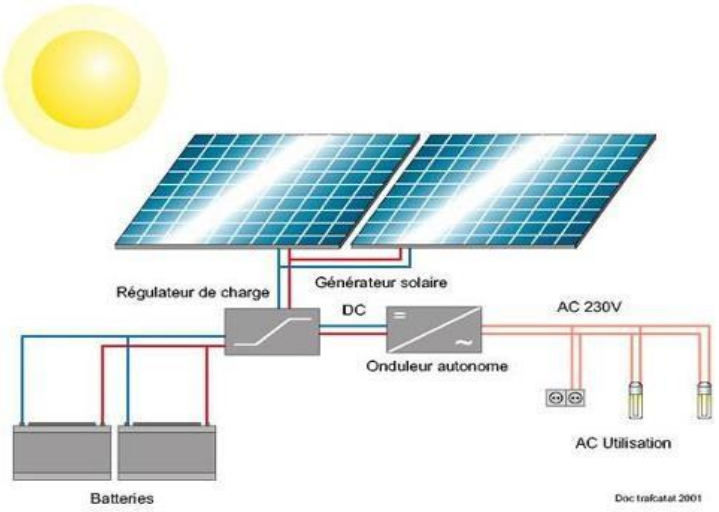


Figure II.13 : principe d'un système solaire autonome [35].

II.8.2 Système raccordé au réseau :

Par système photovoltaïque connecté au réseau, on entend un système couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un onduleur. Ce type de système offre beaucoup de facilité pour le producteur/consommateur puisque c'est le réseau qui est chargé de l'équilibre entre la production et la consommation d'électricité. Dans le cas de systèmes connectés au réseau, il est impératif de convertir le courant continu produit par le système photovoltaïque en un courant alternatif synchronisé avec le réseau. Pour effectuer cette conversion, on utilise un onduleur (figure II.14).

Ce dernier possède également une fonction de découplage du réseau qui empêche d'injecter du courant sur le réseau lorsque celui-ci n'est pas en fonctionnement et une fonction de protection contre les surtensions.

Deux compteurs d'énergie sont nécessaires : Un compteur comptabilise l'énergie achetée au fournisseur d'énergie et un autre compteur mesure l'énergie renvoyée sur le réseau électrique lorsque la production dépasse la consommation. Un troisième compteur est ajouté dans le cas où l'énergie produite est injectée en intégralité dans le réseau (compteur de non-consommation) [35].

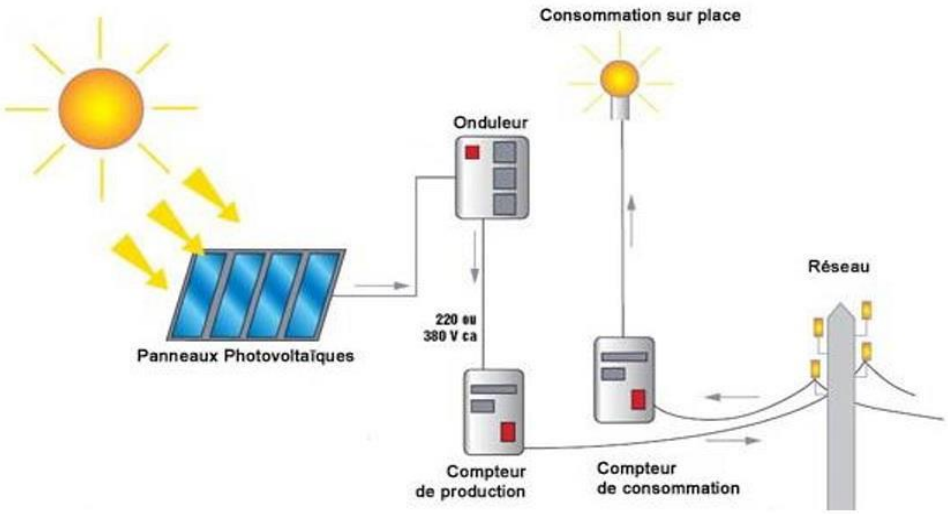


Figure II.14 : Schéma d'une installation PV connectée au réseau [35].

II.8.3 Système hybride :

Il s'agit de systèmes qui regroupent des sources d'énergie de nature différentes tels une installation éolienne ou un générateur diesel en plus du générateur photovoltaïque. Ce type d'installation est utilisé lorsque le générateur photovoltaïque seul ne couvre pas toute l'énergie requise. Les systèmes hybrides sont composés d'un générateur photovoltaïque combiné à une éolienne ou à un groupe électrogène à combustible, ou aux deux à la fois (figure II.15). Un tel système s'avère un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée, lorsqu'il n'y a pas assez de lumière solaire à certains moments de l'année.

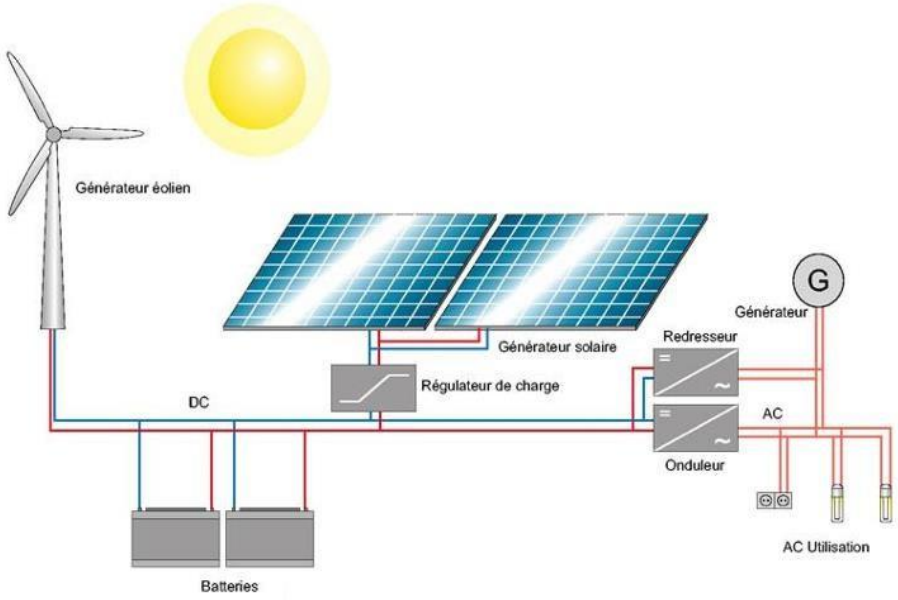


Figure II.15 : principe d'un système autonome hybride [35].

II.9. Avantages et inconvénients d'une installation PV :

Avantages :

D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.

Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.

La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions [24].

Inconvénients :

La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.

Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % (soit entre 10 et 15 MW/km² par an pour le BENELUX) avec une limite théorique pour une cellule de 28%.

Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.

Tributaire des conditions météorologiques.

Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.

Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes [24].

II.10. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons fait des descriptions générales sur l'énergie photovoltaïque, tous les éléments ont été introduits (cellule, module, panneau, champ PV) afin de permettre une bonne compréhension du fonctionnement des systèmes PV. Ce chapitre nous a permis d'explorer le principe de la conversion photovoltaïque ainsi que les différentes technologies utilisées pour y parvenir.

Chapitre 3

Les convertisseurs statiques et la commande MPPT

III.1. Introduction :

Les systèmes PV sont constitués de modules photovoltaïques qui sont des dispositifs à semi-conducteurs qui convertissent le rayonnement solaire incident en énergie électrique. L'énergie photovoltaïque dépend fortement de l'irradiation solaire et de la température. En fonction des différents niveaux d'irradiation et de température, leur taux de production varie.

Les modules photovoltaïques ont une caractéristique électrique spécifique qui est donnée par le fabricant sous forme de courbes. Ces dernières représentent généralement l'évolution du courant et de la puissance par rapport à la tension du module. La caractéristique électrique de ce dernier est de nature non linéaire et possède un point particulier appelé Point de Puissance Maximale (en anglais "Maximum Power Point" MPP). Ce point est le point de fonctionnement optimal pour lequel le module opère à sa puissance maximale [36].

Par convention, des systèmes de conversion photovoltaïques se composent de convertisseur DC-DC. Le convertisseur DC-DC est contrôlé pour la poursuite du point de puissance maximum du panneau photovoltaïque et l'onduleur est contrôlé pour produire le courant de telle manière que le courant de système ait une faible déformation totale d'harmonique et il ait en phase avec la tension de réseau [37].

Dans ce chapitre, nous présentons des différents types d'algorithmes MPPT présents dans la littérature ainsi que l'algorithme de commande que nous avons choisis pour notre étude.

III.2. Convertisseur statique Continu-Continu (DC/DC) :

Les hacheurs présentent la partie essentielle dans le dispositif de commande d'un (GPV), ils sont des convertisseurs statiques DC/DC permettant de contrôler la puissance électrique dans les circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé. Ils jouent le rôle d'organe de liaison entre deux parties d'un réseau. On peut les considérés comme des transformateurs de grandeurs électriques continues. Il existe différents types de convertisseurs DC/DC. Dans les convertisseurs à stockage d'énergie, si la tension délivrée en sortie est inférieure à la tension appliquée en entrée, le hacheur est dit dévolteur. Dans le cas contraire, il est dit survolteur. Le convertisseur dévolteur survolteur combine les propriétés des configurations de dévolteur et de survolteur. Dans ce qui suit, nous allons analyser et modéliser le fonctionnement électrique des trois types de hacheur : Buck, Boost et Buck-Boost.

III.2.1. Hacheur dévolteur Buck :

L'application typique du convertisseur Buck est de convertir sa tension d'entrée (V_i) en une tension de sortie (V_o) inférieure, où le rapport de conversion M=Vo/Vi change avec le rapport cyclique du commutateur. La figure III.1 donne le circuit électrique d'un convertisseur Buck où l'inductance et les capacités (L, C_1, C_2) permettent essentiellement de filtrer le courant et de minimiser le taux d'ondulation de la tension à l'entrée et à la sortie des convertisseurs, la diode D est une diode « roue libre ». Elle permet d'évacuer pendant le blocage de l'interrupteur, l'énergie stockée dans la self.

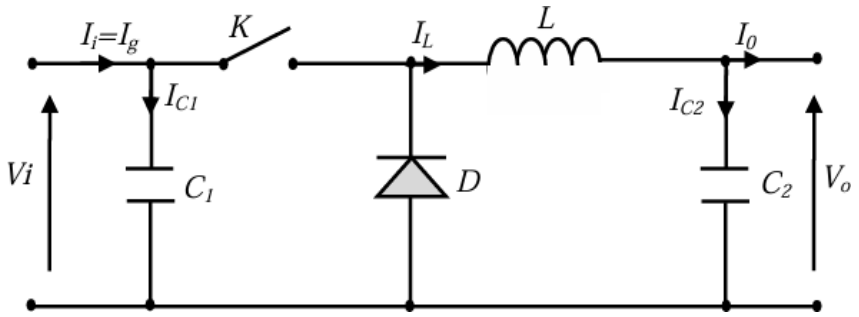


Figure III.1 : Circuit électrique d'un convertisseur DC/DC de type Buck [38].

Dans la première fraction de temps δT_s le transistor (K) est dans un état de saturation alors l'inductance L se charge d'énergie avec augmentation du courant I_L. Dans la deuxième fraction de temps $(1-\delta)$ T_s l'inductance L libère cette énergie à la charge avec une diminution de courant I_L. Aussi le circuit peut être décomposé en deux circuits linéaires qui correspondent chacun à une position de l'interrupteur K.

- ✓ T_s est la période de commutation qui est égale à $1/f_s$;
- ✓ δ est le rapport cyclique du commutateur ($\delta \in [0,1]$).

III.2.1.1. Modèle mathématique équivalent :

Pour extraire le modèle mathématique du convertisseur, il faut l'étudier dans les deux phases de fonctionnement (K fermé, et K ouvert), ensuite donner son modèle approximé, qui englobe les différentes grandeurs moyennes d'entrée et de sortie du convertisseur.

La figure III.2 donne les schémas équivalents d'un hacheur Buck dans les deux intervalles de temps.

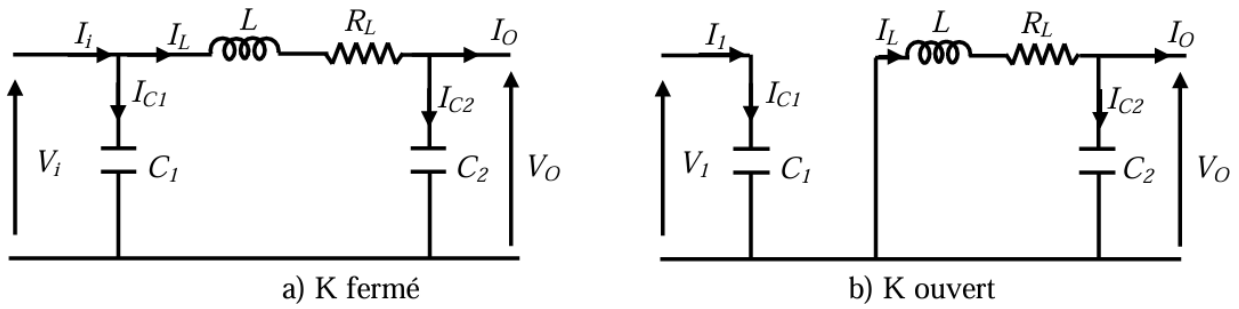


Figure III.2 : Circuits équivalents du convertisseur Buck [38].

Les grandeurs temporelles sont représentées par des lettres minuscules alors que les grandeurs moyennes sont représentées par des majuscules. En appliquant les lois de Kirchhoff sur les deux circuits, on obtient les systèmes d'équations suivants :

$0 < t < \delta T_s$

$$\begin{cases} i_{C1} = C_1 \dfrac{dv_i}{dt} = i_i - i_L \\ i_{C2} = C_2 \dfrac{dv_0}{dt} = i_L - i_0 \\ v_L = L \dfrac{di_L}{dt} + R_L i_i = v_i - v_0 \end{cases} \quad \text{(III-1)}$$

$\delta T_s < t < T_s$

$$\begin{cases} i_{C1} = C_1 \dfrac{dv_i}{dt} = i_i \\ i_{C2} = C_2 \dfrac{dv_0}{dt} = i_L - i_0 \\ v_L = L \dfrac{di_L}{dt} + R_L i_i = -v_0 \end{cases} \quad \text{(III-2)}$$

III.2.1.2. Modèle approxime du convertisseur Buck :

Les systèmes d'équations de base (II-1), (II-2) représentent le hacheur Buck pour une période δT_s et (1-δ) T_s respectivement. Le convertisseur s'alterne entre ces deux états avec une fréquence élevée nous devons trouver une représentation dynamique approximée valable pour les deux intervalles de temps. Pour cela nous considérons que la variation des variables dynamiques I_C, V_L est de forme linéaire. En d'autres termes nous pouvons faire une approche linéaire pour l'exponentielle ($e^{\varepsilon} \approx \varepsilon + 1$, Si $\varepsilon \ll 1$), ainsi la dérivée de ces grandeurs sera constante.

Cette approche nous permet de décomposer l'expression de la valeur moyenne de la dérivé de la variable dynamique x sur les deux laps de temps δTs et (1-δ) T_s :

$$\langle \frac{dx}{dt} \rangle T_s = \frac{dx}{dt_{(\delta T_s)}} . \delta T_s + \frac{dx}{dt_{((\delta+1)T_s)}} . (\delta - 1) T_s \qquad \text{(III-3)}$$

Où $\langle \frac{dx}{dt} \rangle$ est la valeur moyenne de la dérivée de x sur une période T_s. Cette relation est valide si $\frac{dx}{dt_{(\delta T)}}$ et $\frac{dx}{dt_{((\delta+1)T)}}$ sont constants sur les périodes δT_s et (1-δ) T_s respectivement, en d'autres termes cette approximation est valable si les périodes δT_s et (1-δ) T_s sont très faibles devant la constante de temps du circuit.

Dans ce cas, la forme exponentielle du courant qui parcourt la self et la tension aux bornes de la capacité sont de forme linéaire comme le montre la figure III.3.

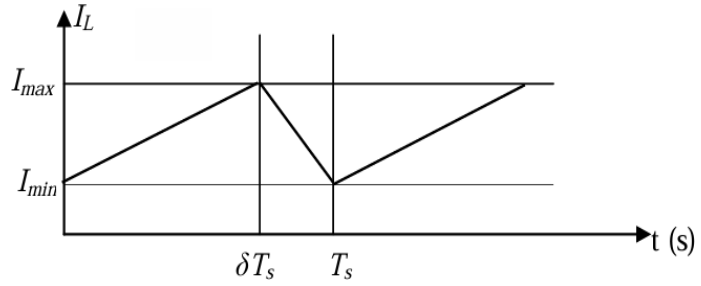


Figure III.3 : Courant traversant la self du convertisseur Buck [38].

En appliquant la relation (II-3) sur les systèmes d'équations (II-1) et (II-2), on obtient les équations qui régissent le système sur une période entière.

$$\begin{cases} C_1 \frac{dv_i}{dt} T_s = \delta T_s (i_i - i_L) + (1-\delta) T_s i_i \\ C_2 \frac{dv_0}{dt} T_s = \delta T_s (i_L - i_0) + (1-\delta) T_s (i_L - i_0) \\ L \frac{di_L}{dt} T_s = \delta T_s (v_L - v_0 - R_L i_i) + (1-\delta) T_s (-v_0 - R_L i_i) \end{cases} \qquad \text{(III-4)}$$

En arrangeant les termes des équations précédentes pour qu'on puisse interconnecter le convertisseur avec les autres blocs de simulation, on obtient la modélisation dynamique du convertisseur Buck.

$$\begin{cases} i_L = \frac{1}{\delta}(i_i - C\frac{dv_i}{dt}) \\ i_0 = i_L - C_2\frac{dv_0}{dt} \\ v_i = \frac{1}{\delta}(v_0 + R_L i_L - L\frac{di_i}{dt}) \end{cases} \quad \text{(III-5)}$$

II.2.1.3. Régime continu :

Le régime de fonctionnement est appelé continu lorsque le courant dans l'inductance n'a pas le temps de s'annuler. Ce régime est obtenu en éliminant les dérivées des variables dynamiques, et en remplaçant ces signaux par leurs valeurs moyennes.

Le système d'équations II.7 donne :

$$\begin{cases} I_i - \delta I_L = 0 \\ I_0 - I_L = 0 \\ \delta V_i - V_0 - R_L I_L = 0 \end{cases} \quad \text{(III-6)}$$

III.2.2. Hacheur Boost :

La figure III.4 représente le circuit équivalent du convertisseur Boost. Durant le temps δTs, l'interrupteur K est fermé, le courant dans l'inductance croit progressivement, au fur et à mesure elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin du premier intervalle. L'interrupteur K s'ouvre et l'inductance L délivre le courant IL et ainsi génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge à travers la diode D.

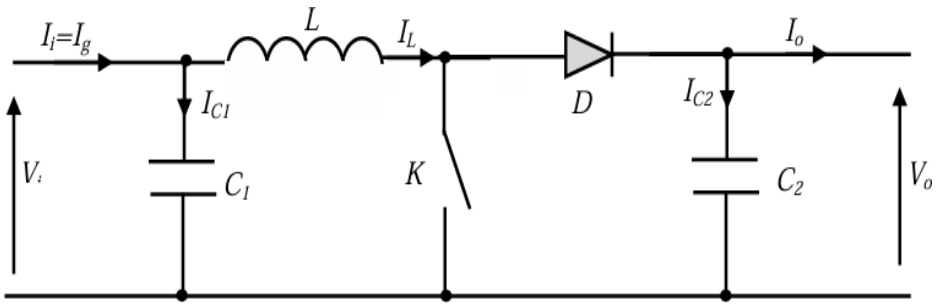


Figure III.4 : Circuit électrique d'un convertisseur DC-DC de type Boost [38].

III.2.2.1. Modèle mathématique équivalent :

La figure III.5 représente les schémas équivalents d'un hacheur Boost dans les deux intervalles de temps.

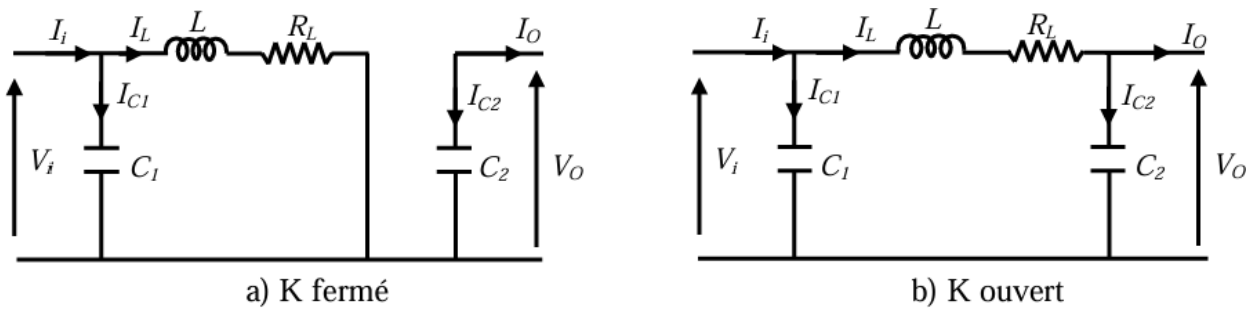


Figure III.5 : Circuits équivalents du convertisseur Boost [38].

L'application des lois de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents des deux phases de fonctionnement :

$0 < t < \delta T_s$

$$\begin{cases} i_{C1} = C_1 \dfrac{dv_i}{dt} = i_i - i_L \\ i_{C2} = C_2 \dfrac{dv_0}{dt} = -i_0 \\ v_L = L \dfrac{di_i}{dt} = v_i - R_L i_i \end{cases} \quad \text{(III-7)}$$

$\delta T_s < t < T_s$

$$\begin{cases} i_{C1} = C_1 \dfrac{dv_i}{dt} = i_i - i_L \\ i_{C2} = C_2 \dfrac{dv_0}{dt} = i_L - i_0 \\ v_L = L \dfrac{di_i}{dt} = v_i - v_0 - R_L i_i \end{cases} \quad \text{(III-8)}$$

En considérant que la variation des grandeurs dynamiques i0, Vs,Vo est linéaire ; dans ce cas une représentation dynamique sur toute la période de hachage est donnée par :

$$\begin{cases} I_L = I_i - C_1 \dfrac{dV_i}{dt} \\ I_0 = (1-\delta) I_L - C_2 \dfrac{dV_0}{dt} \\ V_i = L \dfrac{dI_L}{dt} + (1-\delta) V_0 \end{cases} \qquad 0 < t < T_S \quad \text{(III-9)}$$

Ce mode est obtenu en éliminant les dérivées des variables dynamiques et en remplaçant ces signaux par leurs valeurs moyennes, les systèmes d'équations précédents se simplifient comme suit :

$$\begin{cases} I_i - I_L = 0 \\ I_0 - (1-\delta)I_L = 0 \\ V_i - (1-\delta)V_0 - R_L I_L = 0 \end{cases} \quad \text{(III-10)}$$

III.2.3. Hacheur Buck-Boost :

Le convertisseur Buck-Boost combine les propriétés des deux convertisseurs précédents. Il est utilisé comme un transformateur idéal qui pourrait s'appliquer à n'importe quelle tension d'entrée afin d'obtenir la tension de sortie désirée [39].

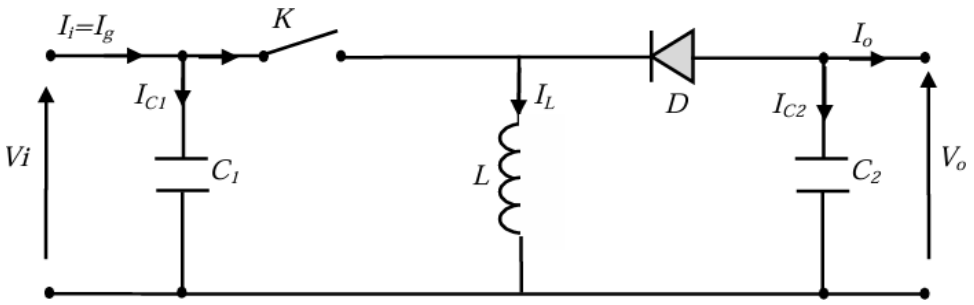


Figure III.6 : Circuit électrique d'un convertisseur DC/DC de type Buck-Boost [38].

En premier temps, K est fermé la tension de la source est appliquée aux bornes de l'inductance L, où elle se charge d'énergie jusqu'au début de la deuxième phase de fonctionnement, puis K s'ouvre et la tension de l'inductance se trouve appliquée à la charge, où son courant circule dans le sens inverse d'une aiguille de montre à travers la diode D et ainsi la tension de sortie sera négative.

III.2.3.1. Modèle mathématique équivalent :

La figure III.7 montre les deux schémas équivalents du convertisseur Buck-Boost pour les deux périodes de fonctionnement [39].

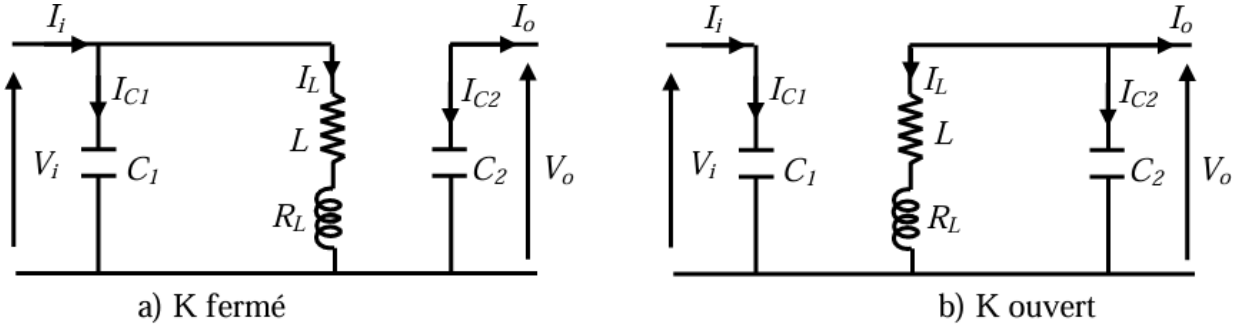


Figure III.7 : Circuits équivalents du convertisseur Buck-Boost [38].

En appliquant les lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents précédents, on obtient :

$0 < t < \delta T_s$

$$\begin{cases} i_{C1} = C_1 \dfrac{dv_i}{dt} = i_i - i_L \\ i_{C2} = C_2 \dfrac{dv_0}{dt} = -i_0 \\ v_L = L \dfrac{di_i}{dt} = v_i - R_L i_i \end{cases} \quad \text{(III-11)}$$

$\delta T_s < t < T_s$

$$\begin{cases} i_{C1} = C_1 \dfrac{dv_i}{dt} = i_i \\ i_{C2} = C_2 \dfrac{dv_0}{dt} = i_0 - i_i \\ v_L = L \dfrac{di_i}{dt} = v_i - R_L i_i \end{cases} \quad \text{(III-12)}$$

III.2.3.2. Modèle approximé du convertisseur Buck-Boost :

On considère que la période de hachage est largement inférieure aux différentes constantes de temps du système, donc la variation des grandeurs dynamiques I_L, Vo et Vi est linéaire. Dans ces conditions, une représentation dynamique approximée valable sur toute la période de hachage est donnée par :

$$\begin{cases} Ic_1 = C_1 \dfrac{dV_i}{dt} = Ii - \delta I_L \\ Ic_2 = C_2 \dfrac{dV_0}{dt} = -(1-\delta) I_L - I_0 \\ V_L = L \dfrac{dI_L}{dt} = \delta Vi + (1-\delta) V_0 \end{cases} \quad 0 < t < T_S \quad \text{(III-13)}$$

En réarrangeant les termes du système d'équation (II-13) on obtient le modèle mathématique équivalent du hacheur Buck-Boost fonctionnant en mode continu :

$$\begin{cases} I_L = \dfrac{1}{\delta} I_i - \dfrac{C_1}{\delta} \dfrac{dV_i}{dt} \\ I_0 = -(1-\delta) I_L - C_2 \dfrac{dV_0}{dt} \\ V_i = \dfrac{L}{\delta} \dfrac{dI_L}{dt} - \dfrac{(1-\delta)}{\delta} V_0 \end{cases} \quad 0 < t < T_S \quad \text{(III-14)}$$

III.3. Suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque :

La poursuite du point maximum de la puissance (MPPT) est une partie essentielle dans les systèmes photovoltaïques. Plusieurs techniques sont développées depuis 1968 dates de publication de la première loi de commande de ce type adaptées à une source d'énergie renouvelable de type PV. Ces techniques se différent entre eux par leur complexité, nombre de capteurs requis, la vitesse de convergence, coût, rendement et domaine d'application [38].

III.3.1. Principe de fonctionnement d'un étage d'adaptation DC-DC :

La figure III.1 présente le schéma de principe d'un module photovoltaïque doté d'un étage d'adaptation (DC-DC) entre le Générateur Photovoltaïque (GPV) et la charge.

Cette structure correspond à un système plus communément appelé système autonome.

Il permet le plus souvent d'alimenter une batterie pour stocker de l'énergie ou une charge qui ne supporte pas les fluctuations de la tension (ballast,…). Cet étage d'adaptation dispose d'une commande (MPPT) (Maximum Power Point Tracking) qui permet de rechercher le (PPM) que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque.

L'algorithme de recherche (MPPT) peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisie et des performances recherchées. Cependant au final, tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé.

Nombreuses recherches sur les commandes (MPPT) ont été effectuées afin de trouver un système optimal permettant une recherche du (PPM) selon l'évolution de la puissance fournie par le générateur photovoltaïque. Les commandes (MPPT) développées, sont toutes basées sur une commande extrémale de type Perturbe & Observe, (P&O).

Dans la littérature, nous pouvons trouver différents types d'algorithmes de commandes extrémales présentant plus ou moins de précisions. A partir de l'évaluation ou de la mesure de la puissance fournie par le générateur, ces commandes utilisent le rapport cyclique du convertisseur de puissance pour appliquer une action de contrôle adéquate sur l'étage et pour suivre l'évolution au cours du temps du (PPM). Un grand nombre de ces commandes ont l'avantage d'être précises

et d'avoir une grande rapidité de réaction mais souffrent encore d'un manque d'optimisation de leur algorithme parfois trop complexe et consommant alors trop d'énergie [39].

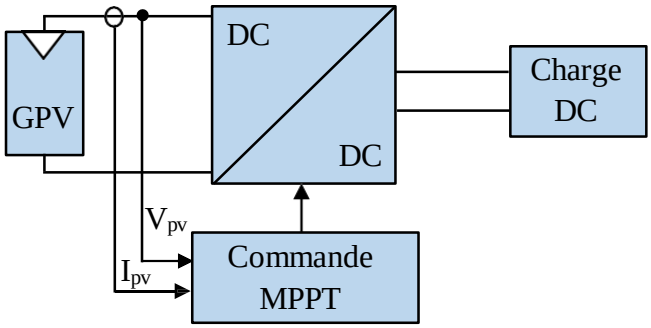


Figure III.8 : Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur (DC-DC) contrôlé par Une commande (PPM) sur charge DC [39].

III.4. Différents commandes de MPPT :

Dans la littérature, nous pouvons trouver différents types d'algorithmes effectuant la recherche du PPM. Les trois méthodes les plus couramment rencontrées sont communément appelées respectivement Hill Climbing, Perturb & Observ (P&O) et l'incrément de conductance (IncCond).

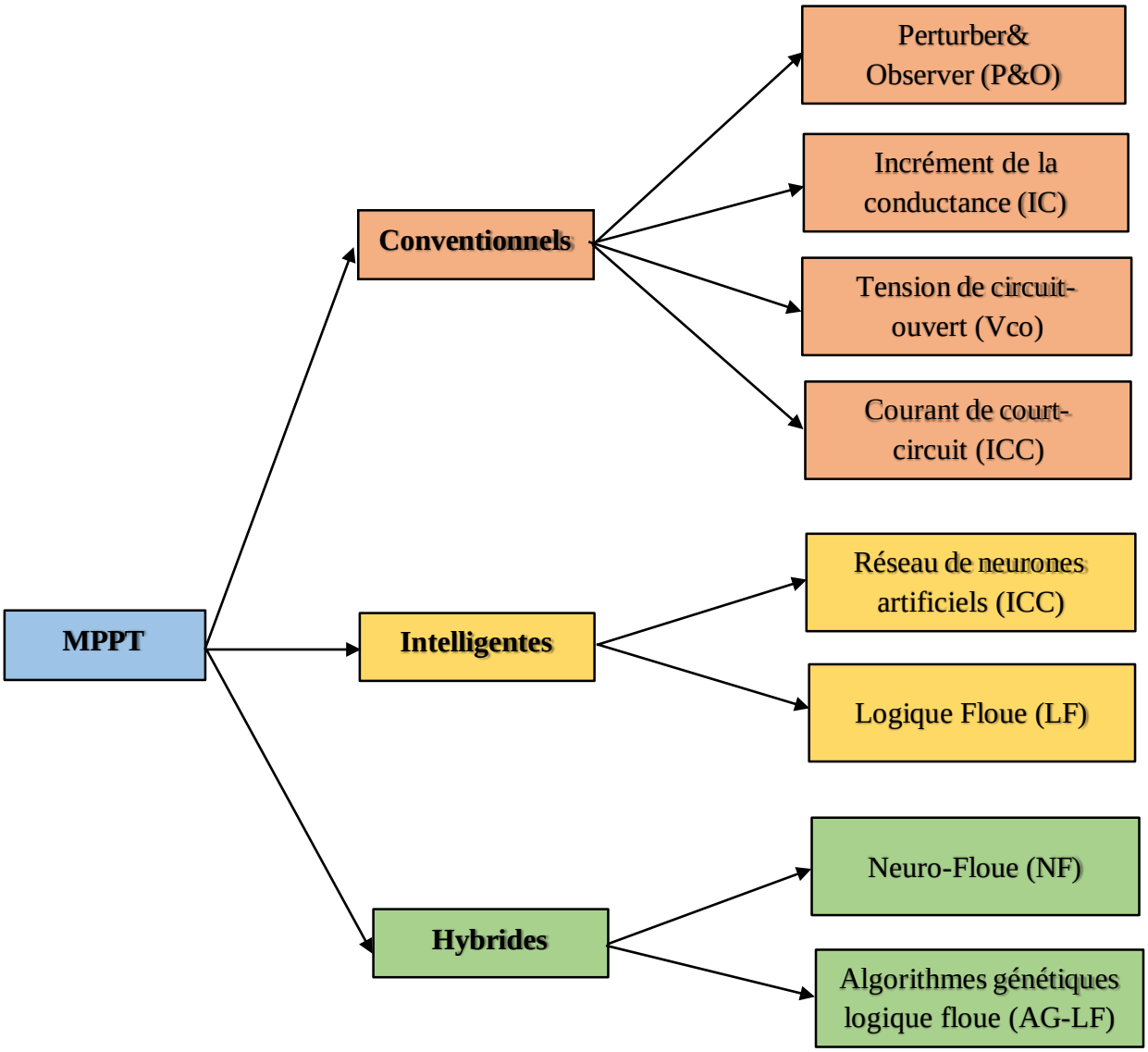


Figure III.9 : Classification des différentes méthodes MPPT [40].

II.4.1. Méthode « Perturbation et Observation » :

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension V_{PV} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{PV} qui en résulte. Ainsi, comme l'illustre la figure III.10, on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{PV} engendre un accroissement de la puissance P_{PV}, cela signifie que le point

de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM.

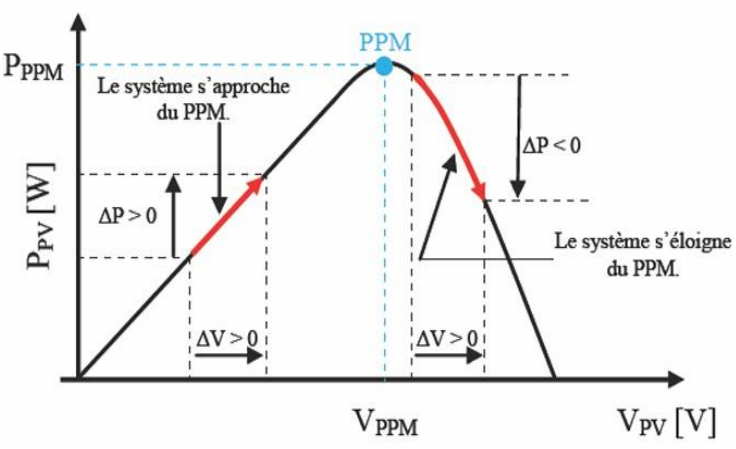


Figure III.10 : Principe de la commande P&O [41].

III.4.2. Principe des commandes « Hill Climbing » :

La technique de contrôle nommée Hill Climbing consiste à faire monter le point de fonctionnement le long de la caractéristique du générateur présentant un maximum.

Pour cela, deux pentes sont possibles. La recherche s'arrête théoriquement quand le point de puissance maximal est atteint. Cette méthode est basée sur la relation entre la puissance du panneau et la valeur du rapport cyclique appliqué au CS.

Mathématiquement, le PPM est atteint lorsque dP_{pv}/d_{α} est forcé à zéro par la commande, comme le montre la figure III.11.

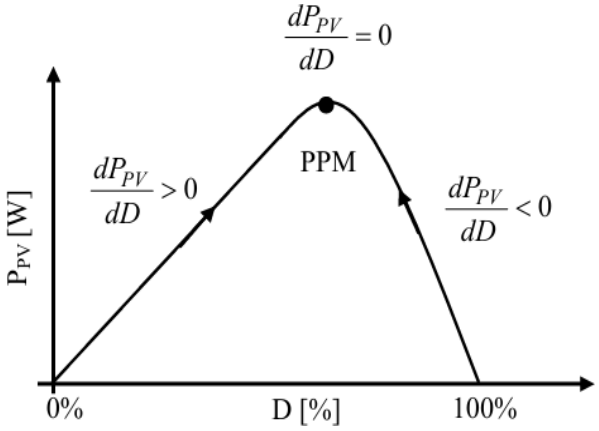


Figure III. 11 : Relation entre PPV et le rapport cyclique D du convertisseur statique [41].

III.4.3. Méthode de la « Conductance Incrémentielle » :

Nous allons dans cette méthode nous intéresser directement aux variations de la puissance en fonction de la tension. La conductance est une grandeur physique relativement connue : il s'agit du quotient de l'intensité par la tension (G=I/V). La conductance incrémentielle est beaucoup plus rarement définie, il s'agit du quotient de la variation, entre deux instants, de l'intensité par celle de la tension (ΔG = dI / dV).

En comparant la conductance G à la conductance incrémentielle ΔG, nous allons chercher le maximum de la courbe (figure III.12) en cherchant le point d'annulation de la dérivée de la puissance. Nous déduisons facilement les actions à faire dans les différents cas sur le schéma P=f(V).

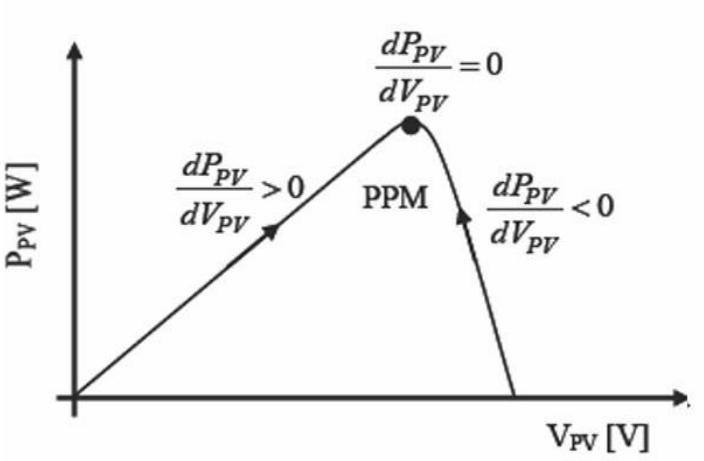


Figure III.12 : Evolution de la puissance disponible en fonction de la tension aux bornes d'un panneau [41].

Ils existent encore d'autres algorithmes qui peuvent être utilisés dans la recherche du Point de Puissance Maximale. Nous pouvons par exemple citer les méthodes basées sur des relations de proportionnalité (Mesure de V_{OC}, Mesure de I_{CC}), les commandes MPPT basées sur le principe de la logique floue et les commandes MPPT de réseaux de neurones artificiels.

La méthode que nous avons choisie est l'algorithme de perturbation et observation (P&O) est le plus utilisé parmi les autres commandes [41].

III.5. Algorithmes de recherche du point de puissance maximale :

Dans cette partie, on présentera l'aspect théorique de quelques méthodes (classiques et modernes) du suivi du point de fonctionnement à puissance maximale du système photovoltaïque et qui sont :

- ✓ Méthode de Perturbation et Observation (P&O).
- ✓ Méthode de Conductance Incrémentale (INC).
- ✓ Méthode de Hill Climbing (HC).

III.5.1. Algorithme de perturbation et d'observation :

C'est l'algorithme de poursuite du PPM le plus utilisé, il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de V_{ref} ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC, puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie du panneau. Si la valeur de la puissance actuelle P(k) du panneau est supérieure à la valeur précédente P (k-1) alors on garde la même direction de la perturbation précédente sinon on inverse la perturbation du cycle précédent. La figure III.13 donne l'organigramme de cet algorithme.

Avec cet algorithme la tension de fonctionnement V est perturbée à chaque cycle du MPPT. Dès que le MPP sera atteint, V oscillera autour de la tension idéale V_{mp} de fonctionnement. Ceci cause une perte de puissance qui dépend de la largeur du pas d'une perturbation simple.

Si la largeur du pas est grande, l'algorithme MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues dans les conditions stables ou lentement changeantes.

Si la largeur du pas est très petite, les pertes dans les conditions stables ou lentement changeantes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation.

L'inconvénient de la méthode P&O est lorsqu'une augmentation brutale de l'ensoleillement est produite on aura une augmentation de la puissance du panneau, l'algorithme précédent réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, alors il continue dans la même direction qui est une mauvaise direction, ce qu'il éloigne du vrai point de puissance maximale.

Ce processus continu jusqu'à la stabilité de l'ensoleillement où il revient au vrai point de puissance maximale. Ceci cause un retard de réponse lors des changements soudains des conditions de fonctionnement et des pertes de puissance [42].

Pour remédier à l'inconvénient de la méthode P&O simple, une version améliorée de l'algorithme P&O est proposée. On introduit une nouvelle condition à la branche Oui de la condition ΔP(K) >0. Si ΔP(K) est positif dans les deux cycles précédents de perturbation ou si la direction de perturbation était dans la même direction dans les deux cycles précédents, alors la prochaine perturbation sera inversée par rapport à la précédente sans prise en compte de la direction de variation de la puissance [42].

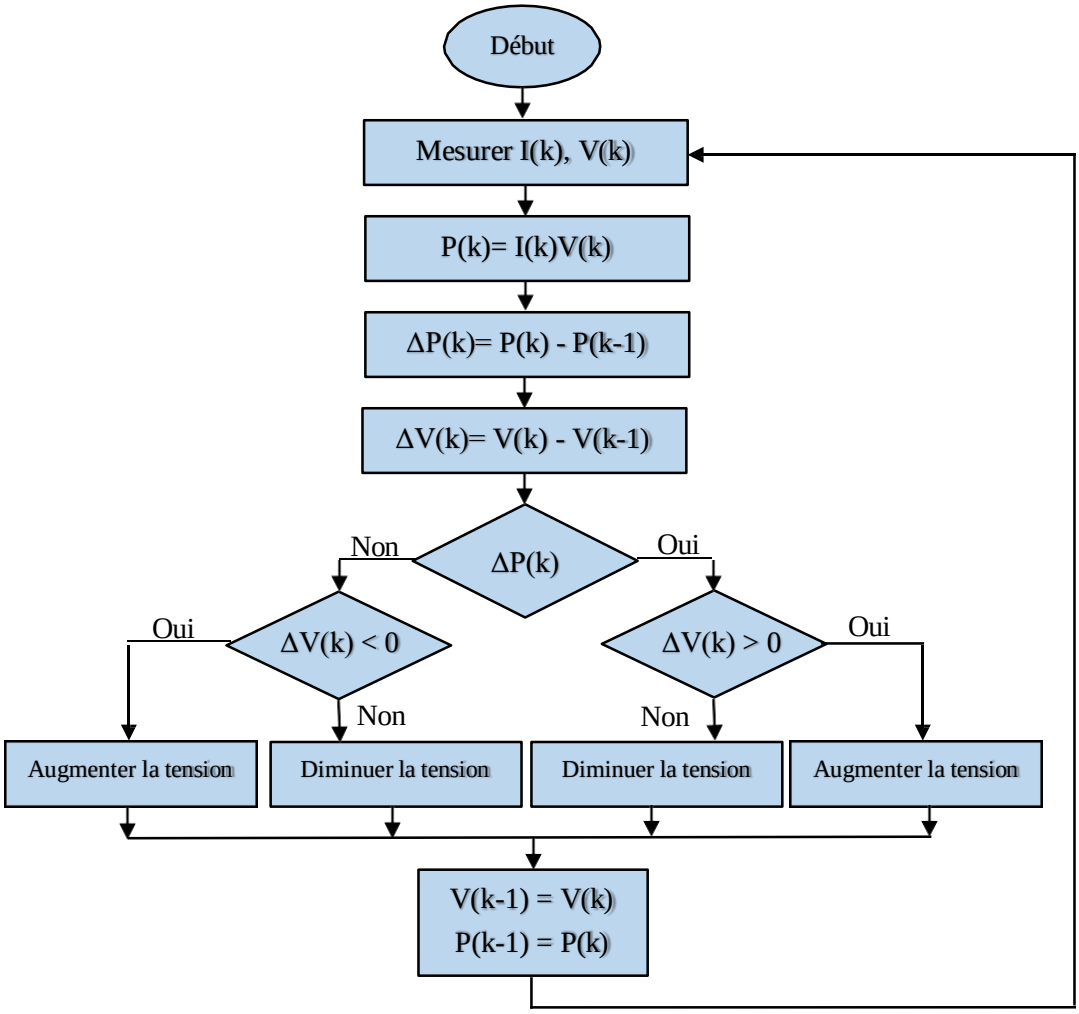


Figure III.13 : Organigramme de l'algorithme de perturbation et d'observation (P&O) [42].

III.5.2. Principe des commandes « Hill Climbing » :

La technique de contrôle nommée Hill Climbing consiste à faire « monter » le point de fonctionnement le long de la caractéristique du générateur présentant un maximum. Pour cela, deux pentes sont possibles. La recherche s'arrête théoriquement quand le point de puissance maximal est atteint. Cette méthode est basée sur la relation entre la puissance du panneau et la valeur du rapport cyclique appliqué au CS. Mathématiquement, le PPM est atteint lorsque dP_{PV}/dD est forcé à zéro par la commande, comme le montre la figure III.11.

L'algorithme de cette méthode est illustré sur la figure III.14. La variable *Slope* correspond à une variable qui prend la valeur « 1 » ou « -1 » suivant la direction que l'on doit donner à la recherche pour augmenter la puissance en sortie du panneau. D et P_{PV} représentent respectivement le rapport cyclique et la puissance du générateur, a symbolise la variable d'incrément du rapport cyclique. Périodiquement, la puissance P_{PVn} est comparée à la valeur déterminée précédemment P_{PVn-1}, en fonction du résultat de la comparaison, le signe de la valeur *Slope* change ou reste identique. Ce qui a pour effet d'incrémenter ou de décrémenter la valeur du rapport cyclique. Une fois le PPM atteint, le système oscille autour de ce dernier indéfiniment rejoignant alors les compromis à faire entre rapidité et précision comme la méthode précédente et les pertes liées à ces oscillations [44].

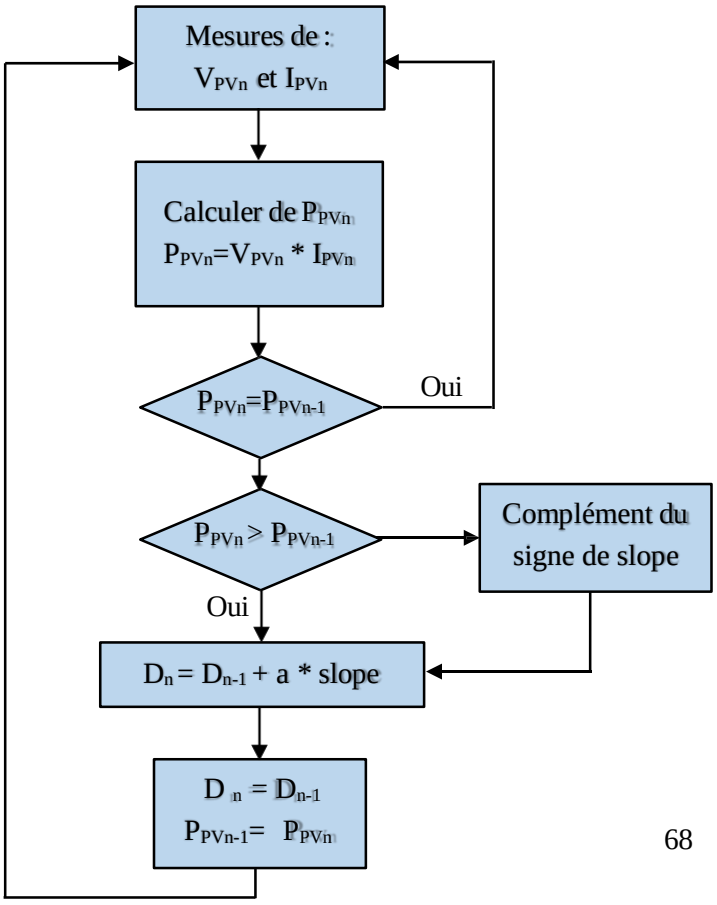


Figure III.14 : Algorithme type de la commande Hill Climbing [44].

III.5.3. Méthode incrémentale de la conductance :

La méthode incrémentale de la conductance est basée directement sur les variations de la puissance. Le courant et la tension du panneau PV sont utilisés pour calculer la conductance et la conductance incrémentale. Son principe est de comparer la conductance (I_{pv}/V_{pv}) et la conductance incrémentale (dI_{pv}/dV_{pv}) et de décider quand augmenter ou diminuer la tension PV pour atteindre le MPP où la dérivée de la puissance est égale à zéro comme indiqué dans l'équation (III.15). L'organigramme de l'algorithme IncCond est présenté dans la Figure.III.15 [42].

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0 \tag{III-15}$$

Cette équation peut être réécrite comme suit :

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{d(I_{pv} \times V_{pv})}{dV_{pv}} = \frac{V_{pv} \times dI_{pv}}{dV_{pv}} + \frac{I_{pv} \times dV_{pv}}{dV_{pv}} \tag{III-16}$$

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = V_{pv} \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} + I_{pv} \tag{III-17}$$

Ce qui implique que

$$\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} + \frac{I_{pv}}{V_{pv}} = 0 \tag{III-18}$$

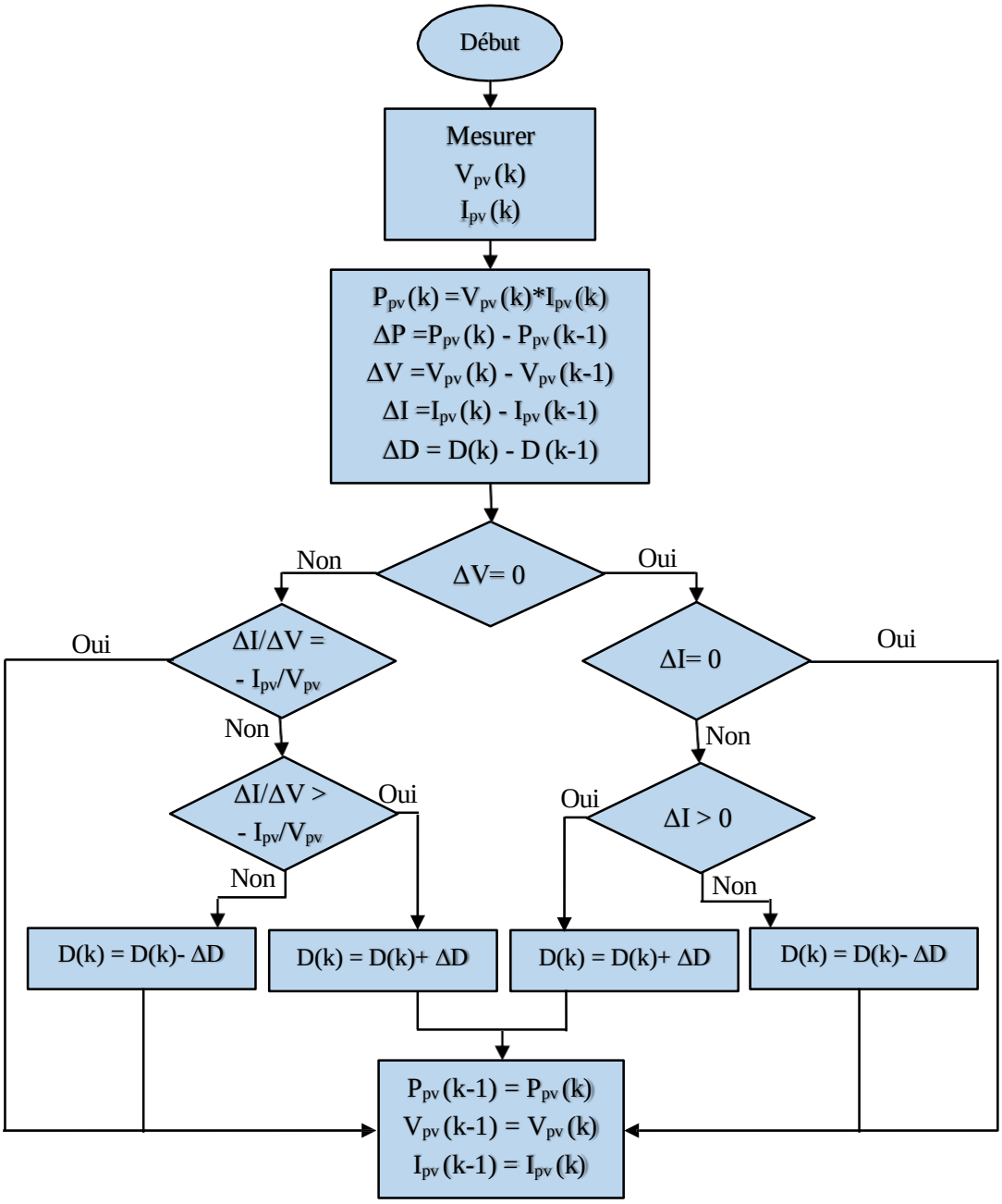


Figure III.15 : L'organigramme de l'algorithme IncCond [43].

III.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons également présenté une analyse des composants de l'étage d'adaptation, en mettant l'accent sur le convertisseur DC-DC qui doivent assurer un fonctionnement aux caractéristiques maximales (fonctionnement à P_{MAX}) pour ne pas être détériorés mais doivent aussi fonctionner de façon optimale quels que soient les comportements aléatoires de la source et de la charge avec toujours des hauts rendements de conversion.. Ensuite, nous avons expliqué les principes de fonctionnement des algorithmes MPPT les plus couramment utilisés, à savoir "Perturb and Observe" (P&O) ,"Incremental Conductance" (INC) et Hill Climbing. Ces algorithmes visent à rechercher le point de puissance maximale du GPV. Le chapitre qui suit présente les différents résultats de simulation des algorithmes étudiée et discuté dans ce chapitre.

Chapitre 4

Simulation et Comparaison entre les techniques de commande MPPT

IV.1 Introduction :

La simulation est un outil puissant pour l'évaluation des performances théoriques d'un système. En effet, ce dernier peut être testé sous des conditions facilement contrôlables et ses performances peuvent être aisément surveillées. La procédure de simulation lie les deux principales parties de la conception d'un système, à savoir, l'étude théorique et la réalisation d'un prototype.

Dans le présent chapitre, nous allons effectuer une comparaison par simulation entre deux techniques de commande MPPT Perturbation & Observation (P&O) et la méthode de l'incrémentation de la conductance (IncCond) à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK.

IV.2 Simulation du système photovoltaïque :

La Figure IV.4 donne le schéma block de notre system photovoltaïque étudié avec l'ensemble des étages simulés : PV, DC-DC et MPPT.

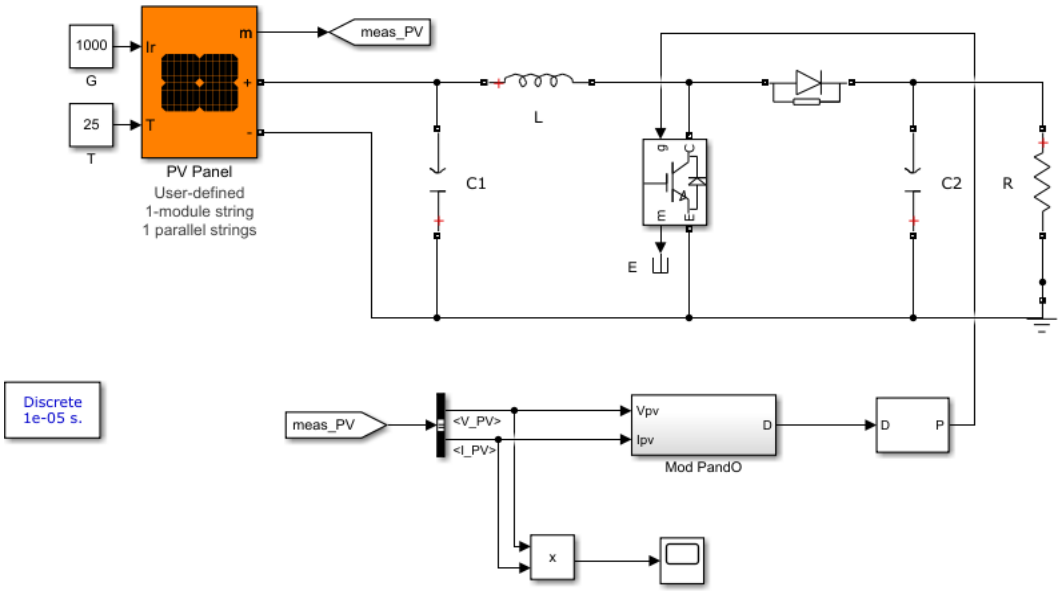


Figure (IV.1) : Schéma de simulation du système globale en Matlab.

IV.2.1 Simulation d'un PV :

Pour simuler le comportement du PV, nous avons utilisé le logiciel Matlab/Simulink basé sur le modèle mathématique décrit dans le chapitre II.

IV.2.1.1. Caractéristique courant et puissance en fonction de tension I=f (V) et P=f (V):

C'est une caractéristique fondamentale du module solaire, définissant cet élément Comme générateur. Elle est identique à celle d'une jonction P-N avec un sens bloqué, mais décalée le long de l'axe des courants d'une quantité directement proportionnelle à l'éclairement. Elle se trace sous un éclairement fixe et une température constante.

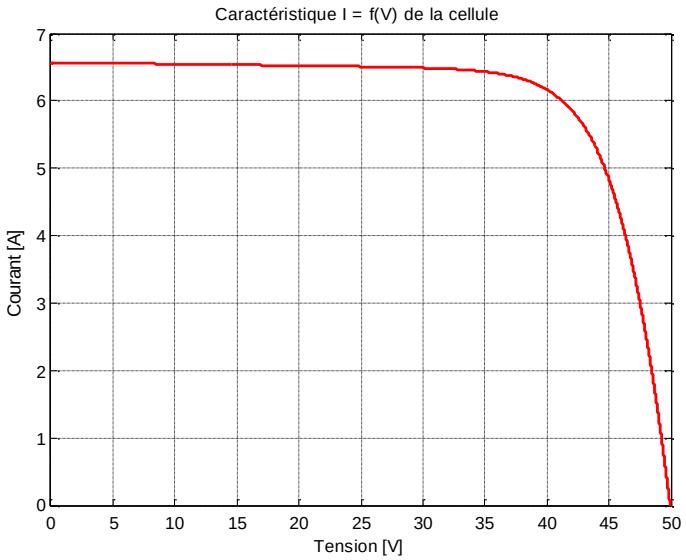


Figure (IV.2) : Caractéristique courant-tension (I-V) d'un panneau solaire.

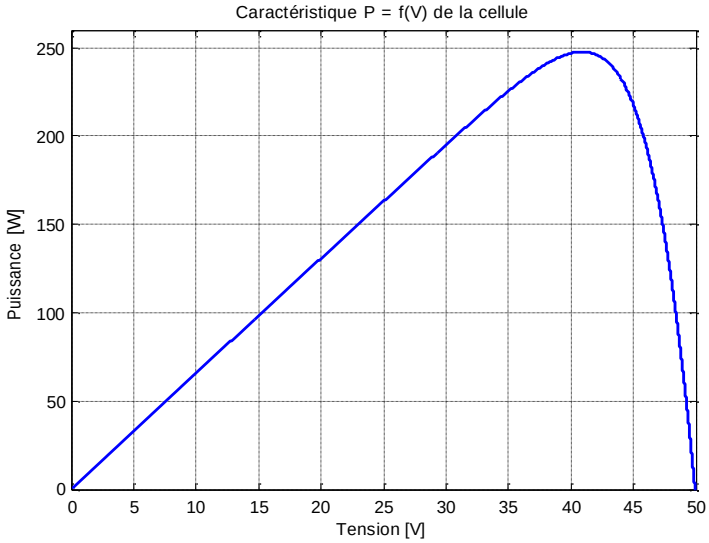


Figure (IV.3) : Caractéristique puissance-tension (P-V) du panneau solaire.

La figure (IV-2) (IV-3) et représente la courbe **I =f (V)** et **P =f (V)** d'un module photovoltaïque typique dans des conditions constantes d'irradiation et de température.

L'irradiation standard adoptée pour mesurer la réponse des modules photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000 W/m2 et une température de 250 °C.

IV.2.1.2. Influence de l'Éclairement :

En faisant varier l'éclairement entre 400 w/m² et 1000 w/m² avec un pas de 200, la caractéristique (Ipv=f(Vpv)) est donnée par les figures (IV. (4,5)). On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement.

L'irradiation standard, internationalement acceptée, pour mesurer la réponse des panneaux photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000 W/m2 et une température de 25 °C.

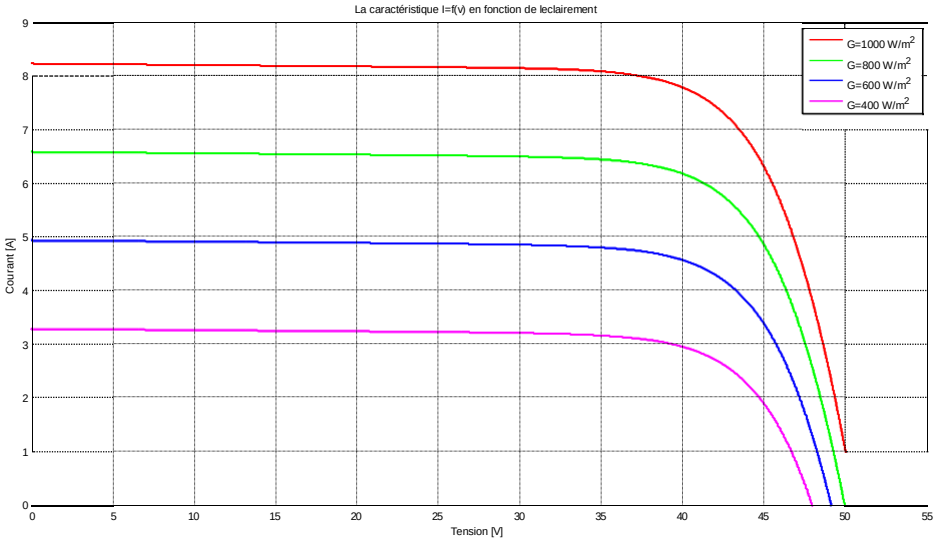


Figure (IV.4) : Caractéristiques (I-V) en fonction de l'éclairement.

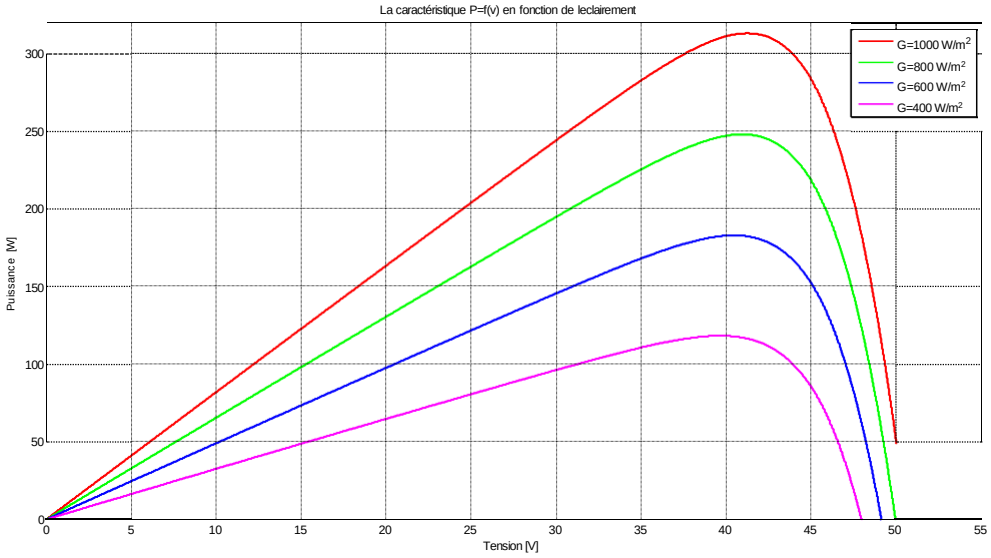


Figure (IV.5) : Caractéristiques (P-V) en fonction de l'éclairement.

IV.2.1.3. Influence de la Température

En faisant varier la température de 25°C jusqu'à 70°C, la caractéristique (Ipv=f(Vpv)) est donnée par les figures (IV. (6,7)). On remarque que la température à une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement pris en compte.

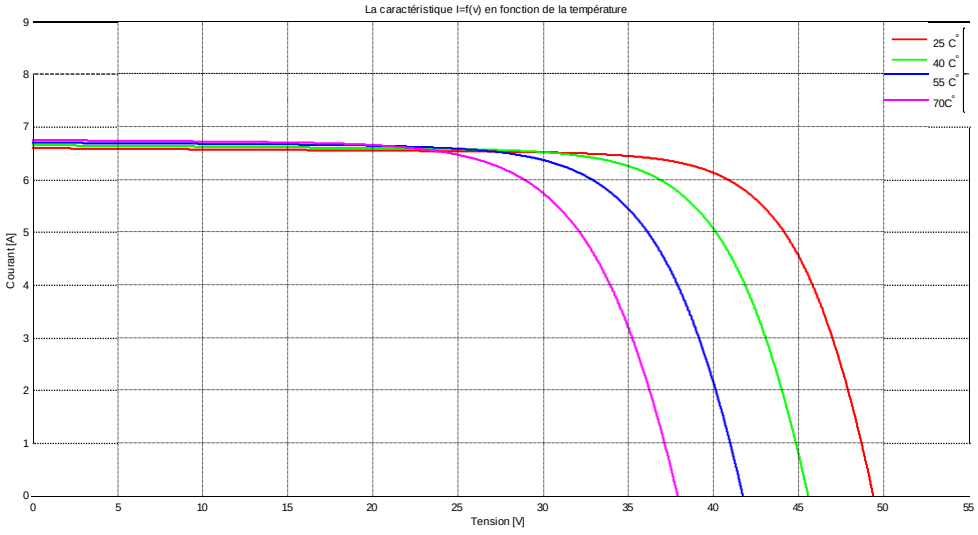


Figure (IV.6) : Influence de la température sur les caractéristiques (I-V) d'un panneau solaire.

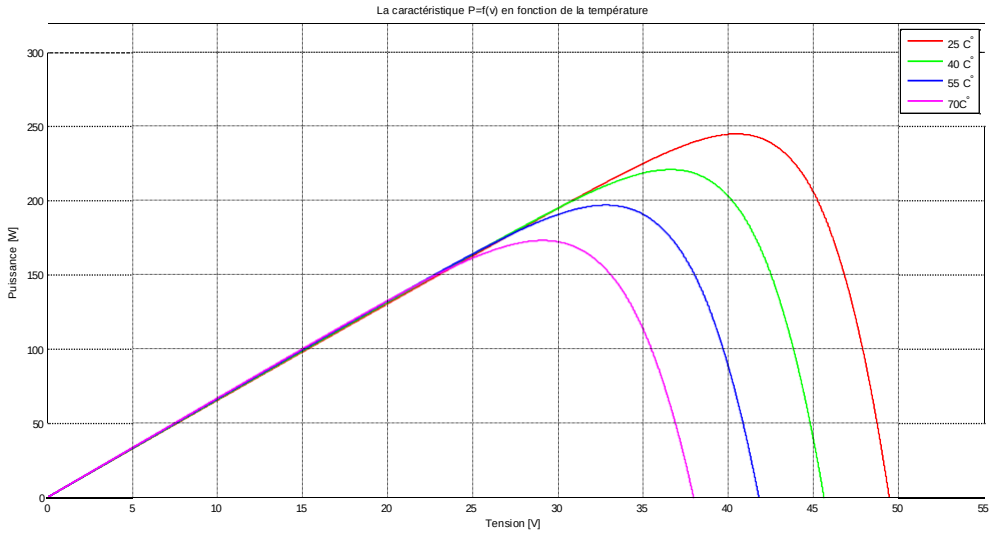


Figure (IV.7) : Influence de la température sur les caractéristiques (P-V) d'un panneau solaire.

IV.2.2 Simulation du convertisseur Boost :

Dans cette partie, nous allons simuler le fonctionnement du système constitué d'une source continue relié à un hacheur alimentant une charge résistive.

De la même manière et utilisant le modèle mathématique décrit dans le chapitre III, nous avons modélisé le convertisseur DC-DC boost sous l'environnement Matlab/Simulink.

Les résultats obtenus sont illustrés sur les figures IV.8 et IV.18. Figure IV.9 : montre que la tension de sortie d'hacheur est supérieure à celle d'entrée pour un rapport cyclique de 0.68. Le courant et la tension de sortie subie un régime transitoire oscillant puis se stabilisent en régime permanent. Figure IV.10 : l'évolution de la puissance consommée par la charge, aussi elle présente de faible oscillation et elle est constante au régime permanent autour de 300 W.

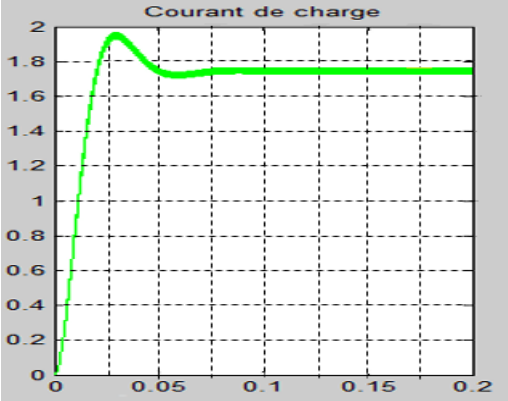


Figure IV.8 : Courbe du courant à la sortie du hacheur BOOST.

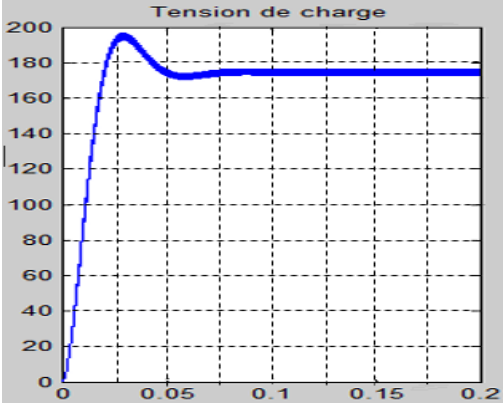


Figure IV.9 : Courbe de tension à la sortie du hacheur BOOST.

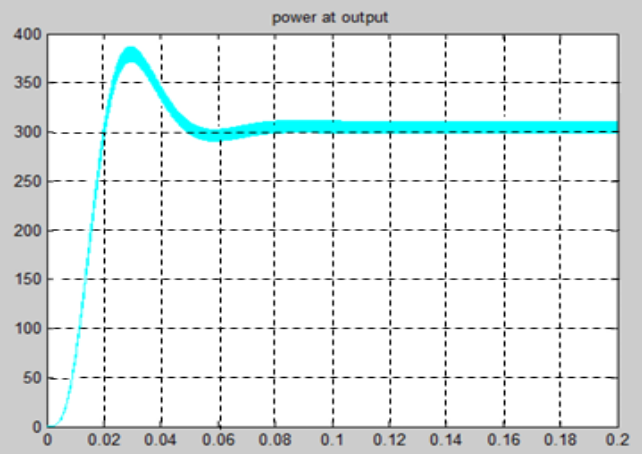


Figure IV.10 : Courbe de puissance à la sortie de l'hacheur BOOST.

IV.2.3. Simulation des algorithmes MPPT connues :

Dans ce chapitre, nous allons présenter une étude comparative par simulation entre deux techniques de recherche de maximum de puissance (MPPT), ces techniques sont : Perturbation et Observation (P&O), Incrémentation de la conductance (INC ou IncCond) en nous basant sur les études illustrées dans le chapitre III. Durant toute cette étude, nous allons utiliser le logiciel de simulation MATLAB/SIMULINK pour comparer les performances des techniques proposées.

IV.2.3.1. Résultas obtenus par la méthode P&O :

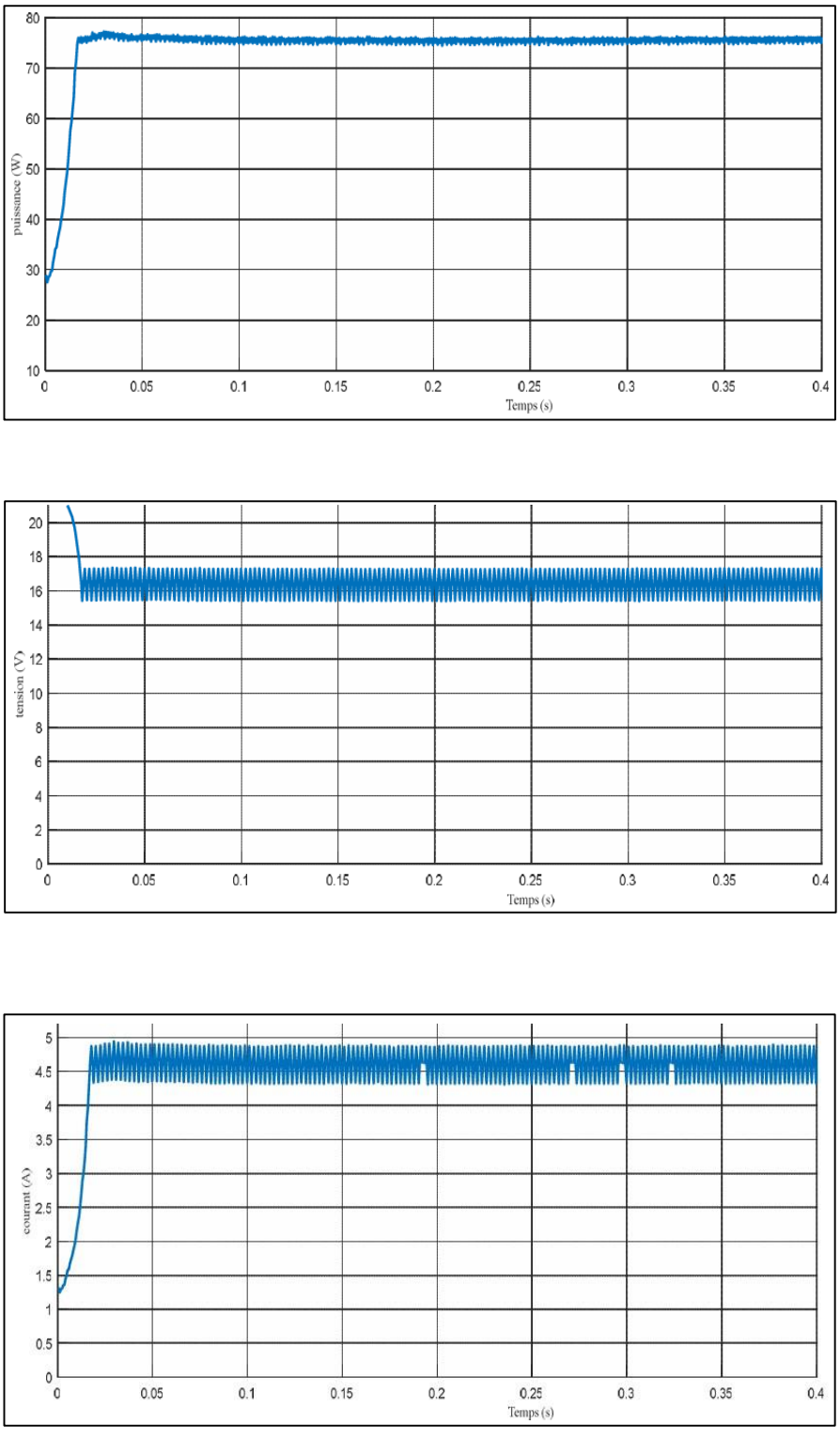


Figure IV.11 : Résultats de la méthode P&O.

IV.2.3.2. Résultas obtenus par la méthode INC

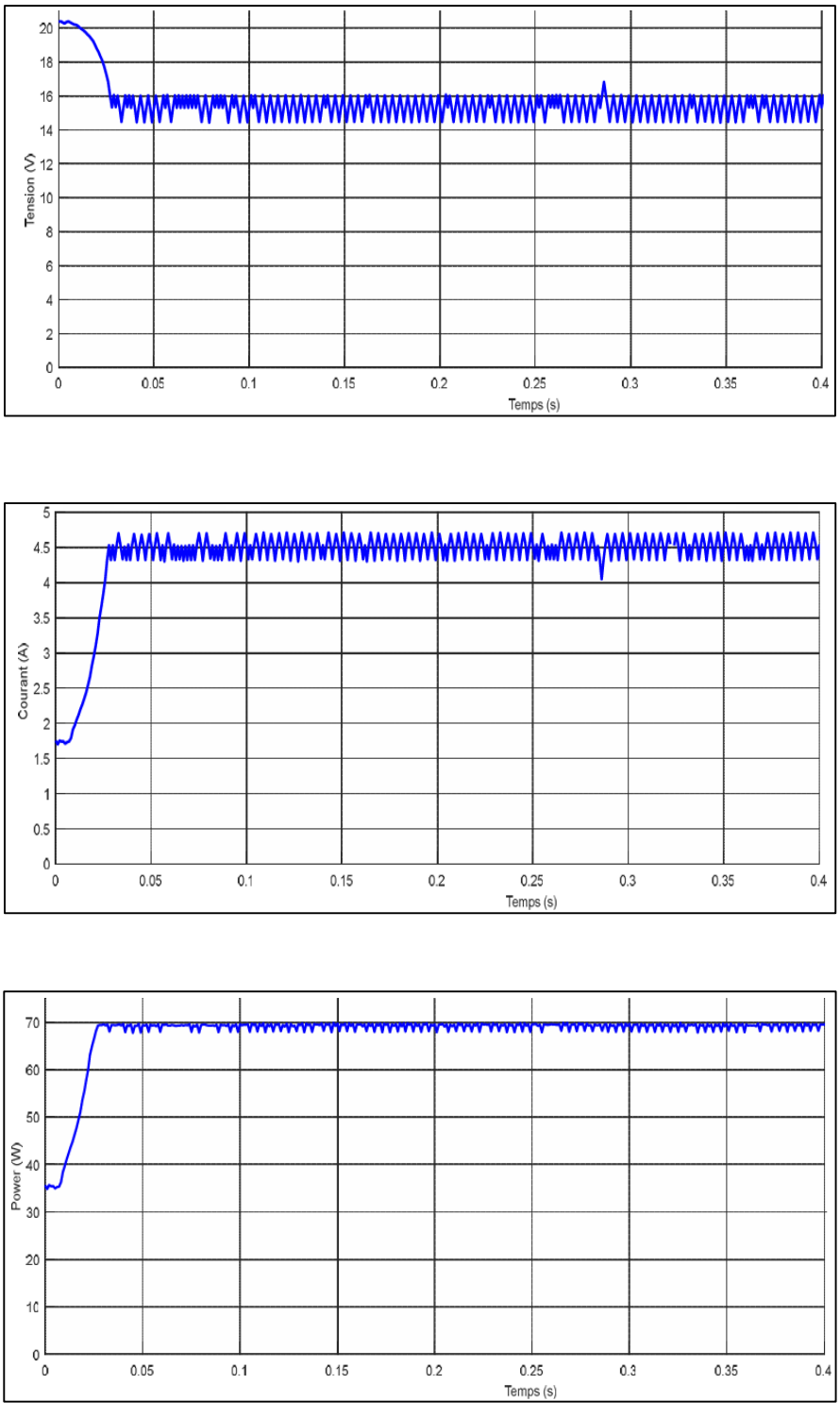


Figure IV.12 : Résultats de la méthode INC**.**

IV.3. Interprétation des résultats :

L'analyse des résultats de simulation d'un système photovoltaïque pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT) par trois méthodes P&O et INC permet de mieux comprendre la performance de chaque algorithme.

- ✓ La méthode P&O, les résultats de simulation montrent que cet algorithme est relativement simple à implémenter, mais qu'il peut présenter des oscillations autour du point de puissance maximale en raison de sa nature de perturbation. Cela peut entraîner une instabilité du système et une efficacité réduite du MPPT.
- ✓ La méthode INC, quant à elle, utilise la dérivée de la puissance pour déterminer la direction du point de puissance maximale. Les résultats de simulation indiquent que cet algorithme est plus précis que celle de P&O en termes de suivi du point de puissance maximale. Cependant, il peut également présenter des oscillations et nécessite une surveillance continue pour garantir une performance optimale.

IV.4 Conclusion

Ce chapitre englobe l'ensemble des simulations développées sous l'environnement dans ce chapitre, l'analyse des résultats de simulation des méthodes P&O et INC pour le suivi du point de puissance maximale dans un système photovoltaïque permet de comprendre leurs avantages et leurs limites. Chaque méthode présente des caractéristiques spécifiques en termes de simplicité, de précision, de réactivité et de stabilité, ce qui doit être pris en compte lors du choix de l'algorithme MPPT le mieux adapté à un système photovoltaïque donné.

Une comparaison par simulation entre les deux méthodes étudiées a été effectuée à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK. Nous avons constaté que les deux méthodes « P&O » et « IncCond » donnent presque les mêmes performances si elles utilisent la même valeur de la perturbation de la tension. En revanche, la méthode IncCond améliorée a donné la meilleure dynamique, les plus faibles oscillations de la puissance et le meilleur rendement.

Conclusion Générale

Conclusion générale :

Le mémoire présenté a pour objectif d'étudier la modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque (PV) ainsi que du système de suivi du point de puissance maximale (MPPT) en utilisant les méthodes P&O et INC.

Dans le premier chapitre, nous avons entamé par examiner les différents types d'énergie. Ensuite dans le deuxième chapitre, nous avons expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et présenté les différents types de cellules disponibles.

Dans le troisième chapitre, nous avons approfondi l'étude des composants de l'étage d'adaptation, notamment les convertisseurs DC-DC et leurs commandes MPPT. L'objectif était de maximiser la puissance du générateur photovoltaïque. Nous avons pris le temps d'expliquer en détail le fonctionnement du convertisseur DC-DC de type "Boost". Dans la suite de notre étude, nous avons approfondi les principes de fonctionnement des algorithmes les plus couramment utilisés dans la recherche du point de puissance maximale (MPPT) : la méthode Perturb and Observe (P&O) et la méthode Incremental Conductance (INC).

Dans le quatrième chapitre, nous avons effectué une étude comparative entre deux méthodes MPPT : P&O et INC. Les résultats de simulation indiquent que l’algorithme INC est plus précis que P&O en termes de suivi du point de puissance maximale.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

[1] A. LILIA, « *Contribution à l'Amélioration des Performances des Générateurs Eoliens - Evaluation de l'Impact des Energies Renouvelables sur l'Environnement* », Thèse de doctorat, UNIVERSITE HADJ LAKHDAR DE BATNA, 161 pages, 2012.

[2] Y. SAHRI, « Contribution à la commande non linéaire et à la gestion d'énergie d'un système hybride d'énergies renouvelables », Thèse de doctorat, UNIVERSITE A. MIRA-BEJAIA, 179 pages, 2022.

[3] S. PETIBON, « *Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques »*, Thèse de doctorat, UNIVERSITE DE TOULOUSE, 158 pages, 2009.

[4] M. O. BENAISSA, « *Contribution à l'étude du transfert d'énergie dans les systèmes photovoltaïques »*, Thèse de doctorat, UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES, 209 pages, 2018.

[5] A. LAKHDARA, « *Contribution à la gestion d'énergie dans un système hybride à énergies renouvelables* », Thèse de doctorat, UNIVERSITE 8 MAI 1945 GUELMA,143 pages, 2022.

[6] D. HAMITI, S. BOUZADI-DAOUD, « *La stratégie algérienne de transition énergétique conformément au programme de développement des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique : état des lieux et perspectives de développement* », Journal of Contemporary Business and Economic Studies, vol :04, n°02, pp : 594-622,2021.

[7] L. FRERIS, D. INFIELD. « *Les énergies renouvelables pour la production d'électricité* » .2e édition. Paris : DUNOD, 2021,352 pages.

[8] C. NGÔ. « *L'énergie Ressources, technologies et environnement* ».3e édition. Paris : DUNOD, 2008,189 pages.

[9] T.L MINH, « *Le rôle des gaz conventionnels et non-conventionnels dans la transition énergétique en Asie* », Thèse de doctorat, UNIVERSITE GRENOBLE ALPES,329 pages, 2017.

[10] I. TOUMI, « *Contribution à l'amélioration de performance d'une chaine énergétique hybride (éolienne/ photovoltaïque) basée sur des techniques d'intelligence artificielle* », Thèse de doctorat, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA,182 pages, 2023.

[11] Z. CHABANI, « *La part des énergies renouvelables dans le bilan énergétique national à l'horizon 2030* », Mémoire de Magister, UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES, 205 pages, 2014.

[12] C. DARRAS, « *Modélisation de systèmes hybrides Photovoltaïque / Hydrogène : Applications site isolé, micro-réseau, et connexion au réseau électrique dans le cadre du projet PEPITE (ANR PAN-H)* », Thèse de doctorat, UNIVERSITE CORSE-PASCAL PAOLI, 253 pages, 2011.

[13] A. AZIZI, « *Modélisation optimisation d'un système de production d'énergie photovoltaïque avec un système de stockage hybride* », Thèse de doctorat, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR -ANNABA, 152 pages, 2019.

[14] O. FEDDAOUI, « *Contribution à l'Etude des Systèmes Hybrides de Génération : Application aux Energies Renouvelables* », Mémoire de Magister, UNIVERSITE MOHAMED CHERIF MESSAADIA DE SOUK-AHRAS, 130 pages, 2014.

[15] A. DJELLAD, « *modélisation et optimisation d'un système de production d'énergie photovoltaïque-éolienne »*, Thèse de doctorat, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA, 180 pages, 2015.

[16] B. TOUAL, « *Contribution à la Commande et la Gestion des Sources Hybrides d'Energie Electrique »*, Thèse de doctorat, UNIVERSITE BATNA 2 – MOSTEFA BEN BOULAÏD, 162 pages, 2018.

[17] S. BEDIAR, « *Contribution à l'étude de l'impact de l'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux électriques intelligents »*, Thèse de doctorat, UNIVERSITE AFRICAINE AHMED DRAÏA ADRAR, 221 pages, 2022.

[18] Z. ABADA, « *Stratégies d'approvisionnement en énergies fossiles des centrales électriques algériennes Perspectives et développements* », Thèse de doctorat, UNIVERSITE DE BATNA -2-, 112 pages, 2018.

[19] Z. ZHANG, « *Modélisation mécanique des interfaces multi-contacts dans une pile à combustible* », Thèse de doctorat, UNIVERSITE D'ÉVRY-VAL D'ESSONNE, 147 pages, 2010.

[20] M. HATTI, « *Contribution à l'Étude des Systèmes Hybrides Photovoltaïque / Pile à Combustible* », Thèse de doctorat, UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE D'ORAN, 238 pages, 2010.

[21] B. SETTOU, « *Contribution à la maîtrise de la transition énergétique en Algérie* », Thèse de doctorat, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 212 pages, 2021.

[22] A. LOUKRIZ, « *Contribution au Développement de Techniques de Recherche de la Topologie Optimale d'un Générateur Photovoltaïque* », Thèse de doctorat, UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA, 146 pages, 2022.

[23] D. BOUKHERS, « *optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage* », Mémoire de Magister, UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE, 93 pages, 2007.

[24] A. MEFLAH, « *modélisation et commande d'une chaine de pompage photovoltaïque* », Mémoire de Magister, UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID - TLEMCEN, 119 pages, 2011.

[25] A. HICHEM, « *Propriétés électriques de cellule solaire à base de diSéléniure de Cuivre Indium Galium* $CuIn_{(1-x)}\ Ga_xSe_2$ *(CIGS)* », Mémoire de Magister, UNIVERSITE MOHAMED KHIDER– BISKRA, 86 pages, 2014.

[26] M. A. PASTOR, « *conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques* », Thèse de doctorat, INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE TOULOUSE, 146 pages, 2006.

[27] H. BOUZERIA, « *modélisation et commande d'une chaine de conversion photovoltaïque* », Thèse de doctorat, UNIVERSITE HADJ LAKHDAR BATNA, 199 pages, 2016.

[28] K. HELALI, « *Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque : Etude Comparative »*, Mémoire de Magister, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 106 pages, 2012.

[29] A. DJALAB, « *Diagnostic des défauts d'un système d'énergie renouvelable basée sur les techniques d'intelligence artificielle : Application sur un système photovoltaïque »*, Thèse de doctorat, UNIVERSITE ZIANE ACHOUR DE DJELFA, 103 pages, 2020.

[30] M. L. LOUAZENE, « *Contribution à l'optimisation des systèmes photovoltaïques utilisés pour l'irrigation dans les zones sahariennes – Application zone de Ouargla »*, Thèse de doctorat, UNIVERSITE EL HADJ LAKHDAR - BATNA, 128 pages, 2015.

[31] M. M. BELARBI, « *Contribution à l'étude d'un générateur solaire pour site autonome »*, Thèse de doctorat, UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE D'ORAN MOHAMED BOUDIAF, 202 pages, 2015.

[32] A. BOUCHAKOUR, « *Modélisation et Simulation d'un Système de Pompage Photovoltaïque »*, Thèse de doctorat, UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES, 163 pages, 2018.

[33] S. MAKHLOUFI, « *Contribution à l'optimisation des installations photovoltaïques par des commandes intelligentes »*, Thèse de doctorat, UNIVERSITE EL HADJ LAKHDAR - BATNA, 144 pages, 2013.

[34] A. BOUDEN, « *Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque »*, Mémoire de Magister, UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE, 112 pages, 2008.

[35] K. SAIDI, « *Contribution à la commande MPPT temps réel sur FPGA »*, Thèse de doctorat, UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA_1, 126 pages, 2022.

[36] F. OUDIAI, K. LAGHA-MENOUER, A. HADJ ARAB, R. ZIRMI, « *Commande MPPT et Contrôle d'un Système Photovoltaïque par Incrément de la Conductance* », 2nd International Seminar on Fossil, New and Renewable Energy, Boumerdes, Algeria, 13-14 November 2019.

[37] A. SAHLI, « *Filtrage actif et contrôle de puissances : application aux systèmes photovoltaïques interconnectés au réseau* », Mémoire de Magister, UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF, 126 pages, 2012.

[38] B. BOUKHALFA, « *Etude d'un système de pompage photovoltaïque* », Mémoire de Magister, UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE HOUARI BOUMEDIENE, 136 pages, 2011.

[39] H. MESSAOUDENE, « *Détermination intelligente de la puissance maximale des modules photovoltaïques* », Mémoire de Magister, UNIVERSITE EL HADJ LAKHDAR BATNA, 143 pages, 2014.

[40] K. SAIDI, « *Contribution à la commande et à l'optimisation de l'énergie dans un système photovoltaïque* », Thèse de doctorat, ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE, 148 pages, 2020.

[41] R. MERAHI, « *modélisation d'un dipositif MPPT pour l'étude de l'augmentation de la puissance produite par les générateur photovoltaïques* », Mémoire de Magister, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR -ANNABA, 99 pages, 2010.

[42] S. DJERIOU, « *Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone* », Mémoire de Magister, UNIVERSITE FERHAT ABBAS DE SETIF, 85 pages, 2011.

[43] S. NECAIBIA, « *Stockage de l'énergie par batterie d'une installation photovoltaïque appliquée à un pompage solaire* », Thèse de doctorat, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA, 138 pages, 2018.

[44] C. CABAL, « *Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque* », Thèse de doctorat, UNIVERSITE DE TOULOUSE, 188 pages, 2008.

Résumé :

L'énergie photovoltaïque issue de la conversion de l'énergie solaire souffre d'un problème d'optimisations, dues aux caractéristiques électriques non linéaires (courant - tension) des cellules photovoltaïques. Ces caractéristiques dépendent essentiellement des conditions climatiques de rayonnement et de température.

Le but de ce travail est de modéliser et simuler un panneau solaire photovoltaïque. D'abord on a étudié le panneau solaire, ses caractéristiques et les éléments qui influent sur le rendement du panneau. Puis on a fait une modélisation du panneau solaire et en fin on a simulé un panneau PV avec l'outil Simulink en utilisant deux techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT), à savoir : Perturbation et Observation (P&O) et Incrémentation de la conductance (INC ou Inc Cond). On a analysé, puis interpréter les résultats de simulation de ces algorithmes, et par conséquent, montrer les performances et les limites de chaque algorithme.

Mots clés : système photovoltaïque, Commande MPPT, convertisseur DC-DC, énergie renouvelable, énergie non renouvelable, énergie, modélisation, simulation.

Abstract :

Photovoltaic energy resulting from the conversion of solar energy suffers from optimization issues due to the nonlinear electrical characteristics (current-voltage) of photovoltaic cells. These characteristics primarily depend on climatic conditions of radiation and temperature.

The aim of this work is to model and simulate a photovoltaic solar panel. First, we studied the solar panel, its characteristics, and the elements that influence the panel's efficiency. Then we modeled the solar panel and finally simulated a PV panel using the Simulink tool, employing two maximum power point tracking (MPPT) techniques, namely: Perturbation and Observation (P&O) and Incremental Conductance (INC or IncCond).We analyzed, then interpreted the simulation results of these algorithms, and consequently, showed the performance and limitations of each algorithm.

Keywords: photovoltaic system, MPPT control, DC-DC converter, renewable energy, non-renewable energy, energy, modeling, simulation.

ملخص:

تعاني الطاقة الكهروضوئية الناتجة عن تحويل الطاقة الشمسية من مشكلة في التحسينات، بسبب الخصائص الكهربائية غير الخطية (التيار - الجهد) للخلايا الكهروضوئية.تعتمد هذه الخصائص بشكل أساسي على الظروف المناخية للإشعاع ودرجة الحرارة.

الهدف من هذا العمل هو نمذجة ومحاكاة لوحة شمسية ضوئية.أولًا، درسنا اللوح الشمسي، خصائصه والعوامل التي تؤثر على كفاءة اللوح.ثم قمنا بعمل نمذجة للوحة الشمسية وفي النهاية قمنا بمحاكاة لوحة PV باستخدام أداة Simulink باستخدام تقنيتين لتتبع نقطة الطاقة القصوى(MPPT) ، وهما: الاضطراب والمراقبة (P&O) وزيادة التوصيل INC) أو.(IncCond قمنا بتحليل ثم تفسير نتائج محاكاة هذه الخوارزميات، وبالتالي، عرض أداء وحدود كل خوارزمية.

الكلمات المفتاحية: نظام الطاقة الكهروضوئية، التحكم MPPT، محول DC-DC، الطاقة المتجددة، الطاقة غير المتجددة، الطاقة، النمذجة، المحاكاة.