

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار - عنابة

Faculté : TECHNOLOGIE

Département : ELECTROTECHNIQUE

Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Filière : ELECTROTECHNIQUE

Spécialité : INDUSTRIELLE

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

Production d'énergie électrique par panneau photovoltaïque

Présenté par :

-DAFRI ANIS

-FERRADJ ISHAK

Encadrant : Dr. BOUCHIKHA Hocine

MCA

UBMA

Jury de Soutenance :

Dr. CHELLI Seif elislam	MCB	UBMA	Président
Dr. BOUCHIKHA Hocine	MCA	UBMA	Encadrant
Pr. OMEIRI Amar	PROF	UBMA	Examinateur

Année Universitaire : 2024/2025

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, nous remercions Dieu Tout-Puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'Il nous a accordées et qui nous ont permis d'achever humblement ce travail. Sans Sa grâce et Son aide, nous n'aurions pas pu atteindre ce stade.

Nous adressons nos sincères remerciements et notre profonde gratitude à notre encadrant, Monsieur BOUCHIKHA Hocine, pour son accompagnement constant, ses orientations pertinentes et ses remarques précieuses qui ont grandement contribué à la réalisation de ce travail.

Nos remerciements s'étendent également à l'ensemble des enseignants du département d'électronique, pour nous avoir transmis leurs connaissances tout au long de notre parcours académique et pour nous avoir permis de bénéficier de leur précieuse expérience scientifique.

Nous tenons également à exprimer notre reconnaissance aux membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce mémoire, et pour leurs remarques constructives et leur évaluation objective.

Par ailleurs, nous ne saurions oublier d'exprimer notre profonde gratitude à nos familles respectives pour leur soutien inconditionnel, leur patience et leurs encouragements tout au long de nos années d'études.

Enfin, nous remercions chaleureusement nos amis ainsi que toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué de quelque manière que ce soit à l'aboutissement de ce travail.

Dédicaces

À ma chère mère, source de tendresse et lumière qui guide mes pas et me mène sur les chemins de la réussite, pour tous ses précieux conseils, pour toute son aide et sa présence dans ma vie.

À mon cher père, cet être humain, ce précieux cadeau de Dieu à qui je dois ma vie, ma réussite et tout mon respect. Je le remercie infiniment pour ses efforts, ses conseils et sa supervision.

À mes chères frères : Badis, merieme

A toute ma familles vous avez toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager.

À tous mes amis que je n'ai pas mentionnés, vous êtes dans mon cœur, merci.

Dafri Anis

Dédicaces

Je dédie ce modeste mémoire de magistère à:

A mes chers parents qui ont été toujours présents, merci de fond du cœur pour leurs déroulements, leurs disponibilités et leurs affections tout au long de mes études.

Mes sœurs : Nour el houda , Hajar

A toute mes familles : FERRADJ, CHERGUI

A mes amis, à qui je souhaiterai adresser l'expression de mon amour le plus profond pour leur écoute, affection, soutien moral et conseils.

FERRADJ ISHAK

ملخص

تحلّ هذه الدراسة عملية تحويل الطاقة الشمسية عبر التأثير الكهروضوئي. بعد تقديم لمصادر الطاقة وأنواع الخلايا، يتناول هذا البحث الآليات الداخلية للخلايا الشمسية، وطرق توصيفها الكهربائية (منحنيات التيار-الجهد، الكفاءة، والفعالية الكمية، بالإضافة إلى تأثير العوامل الخارجية. كما يقترح مقارنة بين خوارزميات تتبع نقطة القدرة القصوى(EQE) الخارجية بهدف تحسين القراءة المستخرجة، مع التحقق من النتائج باستخدام المحاكاة (محولات MPPT/Boost/Buck).

الكلمات المفتاحية الطاقة الشمسية، التأثير الكهروضوئي، الخلايا الشمسية، مصادر الطاقة، التوصيف الكهربائي، الفعالية، المحاكاة، محولات (MPPT) ، تتبع نقطة القدرة القصوى(EQE) الكمية الخارجية

Abstract

The study analyzes solar energy conversion through the photovoltaic effect. After presenting energy sources and types of solar cells, the thesis examines the internal mechanisms of solar cells, characterization methods (I-V curves, efficiency, EQE), and the influence of external parameters. It then proposes a comparison of MPPT algorithms for power optimization, validated through simulation (Boost/Buck converters).

Keywords: Solar energy, Photovoltaic effect, Solar cells, Energy sources, Electrical characterization, EQE (External Quantum Efficiency), MPPT (Maximum Power Point Tracking), Simulation, Boost/Buck converters

Résumé

L'étude analyse la conversion de l'énergie solaire via l'effet photovoltaïque. Après une présentation des sources d'énergie et des types de cellules, le mémoire examine les mécanismes internes des cellules solaires, les méthodes de caractérisation (courbes I-V, rendement, EQE), et l'effet de paramètres extérieurs. Il propose ensuite une comparaison des algorithmes MPPT pour optimiser la puissance, avec validation par simulation (convertisseurs Boost/Buck).

Mots clés: Énergie solaire , Effet photovoltaïque, Cellules solaires, Sources d'énergie, Caractérisation électrique, EQE (rendement quantique externe), MPPT (Maximum Power Point Tracking), Simulation, Convertisseurs Boost/Buck

Table des matières

Introduction générale :	2
Introduction :	4
I. Généralité sur les sources d'énergie :	4
I-1. Sources d'énergie non-renouvelable :	5
I-1.1. Les énergies fossiles :	5
I-1.2. L'énergie nucléaire :	6
I-2. Sources d'énergies renouvelables :	7
I-2.1. L'énergie éolienne :	7
I-2.2. L'énergie hydraulique :	8
I-2.3. L'énergie géothermique :	9
I-2.4. L'énergie solaire :	10
II. Le Photovoltaïque :	11
II-1. Historique du photovoltaïque :	11
II-2. Effet photovoltaïque :	11
II-2.1. Le quanta d'énergie du photon :	11
II-2.2. Explication quantique de l'effet photoélectrique :	12
II-2.3. Le travail d'extraction :	12
II-3. Les filières technologiques du photovoltaïque :	12
II-3.1. La filière silicium (Première génération):	13
II-3.1.1. Silicium monocristallin :	13
II-3.1.2. Silicium polycristallin :	13
II-3.1.3. Silicium amorphe :	14
II-3.2. Les filières « couches minces » non silicium (Deuxième génération) :	14
II-3.3. Les filières multijonctions :	15
II-3.4. Les cellules organiques(Troisième génération) :	15
II-3.5. Cellules à concentration (technologie dite CPV) :	15
II-3.6. Cellules pérovskites hybrides :	16
II-4. Perspective d'évolution des différentes technologies photovoltaïques :	16
Conclusion :	17
Introduction :	19
I. Mécanismes physiques en jeu dans les cellules photovoltaïques :	19
I-1. Absorption d'un photon :	19
I-2. Génération des excitons :	20
I-3. Diffusion de l'exciton :	21
I-4. Dissociation de l'exciton :	21
I-5. Transport des porteurs de charges :	22
I-6. Collecte des porteurs de charge :	22

II- Caractérisation des cellules photovoltaïques :.....	23
II-1. Caractéristique courant tension :.....	23
III- Paramètre des cellules photovoltaïques :.....	25
III-1. Le courant de court-circuit (I _{cc}) :	25
III-2. La tension de circuit ouvert (V _{oc}) :	25
III-3. Puissance optimale (P _m) :	26
III-4. Le facteur de forme (FF) :	26
III-5. Rendement de conversion en puissance (PCE) :	26
III-6. Le rendement quantique (EQE) :	26
III-6. Rendement énergétique externe (he) :	27
IV-l'association des cellules PV :	27
IV-1 l'association série des cellules PV :	27
IV-2 l'association parallèle des cellules PV :	28
IV-3 l'association mixte (Série + Parallèle) des cellules PV :.....	28
V- L'influence l'éclairement, température	29
V-1 Influence de l'éclairement :.....	29
V-2 Influence de la température :.....	30
V-1 simulation :	31
Cas 1 : un panneau solaire.....	31
Les résultats :	31
Conclusion :	40
III.1 Introduction :	42
III.2 Principe De La Commande MPPT :	42
III.3.1 Simulation du système photovoltaïque	43
III.3.2 Simulation d'un GPV	44
III.4 Convertisseur DC/DC :	44
III.4.1 Convertisseur abaisseur (Buck) :	44
III.4.2 Convertisseur élévateur (Boost) :	46
III.5 Simulation du convertisseur Boost	48
III.6 Classification Des Commandes MPPT :	48
III.7.1 Classification Des Commandes MPPT Selon Les Paramètres D'entrée.	48
III.7.2 Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche	49
III.8 Les Algorithmes MPPT	50
III.8.1 Approche de la Tension Constante (CV, Constant Voltage)	50
III.8.2 Approche Du Courant Constant (Constant Current) :	51
III.8.3 Perturbation Et Observation (P&O, Perturb And Observe)	52
III.8.4 Conductance Incrémentale (IncCond, Incremental Conductance)	57
III.8.5 La Commande Mppt Flou	60
III.8.6 Autres Méthodes	62
III.9 Conclusion.....	62
IV.1 Introduction	65

IV.2 Simulation du système photovoltaïque	65
IV.3 Simulation du système photovoltaïque avec onduleur	66
IV.3.1 Résultats et discussions	66
IV.4 Simulation du système photovoltaïque avec hacheur	70
IV.4.1 Résultats et discussions	70
IV.5 Conclusion des résultats	75
IV.6 Simulation du système PV avec hacheur et onduleur en série	75
IV.7 Conclusion	77

Table des figures

Figure I-1 : Sources de production d'électricité à l'échelle mondiale [1].....	5
Figure I-2 : Réchauffement climatique [2].	6
Figure I-3 : Principe de fonctionnement d'une centrale nucléaire [3].....	6
Figure I-4 : Présentation d'une éolienne	7
Figure I-5 : Capacité d'énergie éolienne dans le monde en 2018 [4].	8
Figure I-6 : Evolution de la puissance du parc éolien [5].....	8
Figure I-7 : Energie hydraulique (principe de fonctionnement) [6].	9
Figure I-8 : Schéma descriptif d'une centrale géothermique [7].	9
Figure I-9 : Schéma d'une centrale solaire (voie thermodynamique) [8].....	10
Figure I-10 : Transformation de l'énergie lumineuse en énergie électrique (voie photovoltaïque)	10
Figure I-11 : Cellule solaire à base de Silicium monocristallin.	13
Figure I-12 : Cellule solaire à base de Silicium polycristallin.	14
Figure I-13 : Cellule solaire à base de Silicium amorphe.	14
Figure I-14 : Cellule solaire en couche mince.	15
Figure I-15 : Évolution des technologies de cellules photovoltaïque [15].	16
Figure II-1 : Illustration de la différence entre un exciton de type Wannier et un exciton de type Frenkel	20
Figure II-2 : Caractéristique courant-tension et grandeurs physiques associées [19]... ..	24
Figure II-3 : Schéma équivalent de la cellule.	25
Figure (II.4) : Groupement de N_s modules en série et leurs Caractéristiques résultantes	28
Figure (II.5) : Groupement de N_p modules en parallèle et leurs Caractéristiques résultantes	28
Figure (II.6) : Groupement de cellules en mixte et leurs Caractéristiques résultantes	29
Figure (II.7) : Influence d'éclairement sur la caractéristique (I_{ph} - V_p) et (P_v - V_p) à température constante 25C	30
Figure (II.8) : Influence de la température sur la caractéristique (I_{ph} - V_p) et (P_p - V_p) à	30

Figure II.9 Modèle Simulink d'un panneau solaire avec mesure de courant, tension et puissance	31
Figure II.10	32
Figure II.11	32
Figure II.12	33
Figure II.13 Modèle Simulink d'un 4 panneau solaire en série	33
Figure II.14	34
Figure II.15	34
Figure II.16	35
Figure II.17 Modèle Simulink d'un 4 panneau solaire en parallèle	35
Figure II.18	36
Figure II.19	37
Figure II.20	37
Figure II.21 Modèle Simulink 4 panneau solaire en série + 4 panneaux solaire en parallèle.....	38
Figure II.24	39
Figure III.1 Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge.	42
Figure III.2 Principe de la commande MPPT	43
Figure III.3 Schéma bloc sous Simulink du système global	43
Figure III.4 Modèle de simulation du GPV	44
Figure III.5 – Schéma de base d'un convertisseur Buck.	45
Figure III.6 – Convertisseur Buck à l'état passant	46
Figure III.7 – Schéma du Boost (S fermé)	46
Figure III.8 – Schémas de base d'un convertisseur Boost	46
Figure III.9 – Schéma du Boost (S fermé).Schéma du Boost (S fermé)	47
Figure III.10 – Schéma du Boost (K ouvert).....	47
Figure III.11 Modèle de simulation du CS BOOST	48
Figure III.12 Algorithme de la Tension Constante	51
Figure III.13 Algorithme du constant courant	52
Figure III.14 Recherche du PPM par la méthode (P&O)	53
Figure III.15 l'algorithme de P&O classique.....	54
Figure III.16 Divergence de la méthode P&O	55
Figure III.17 algorithme du poids d'un troisième point	56
Figure III.18 caractéristique de tension-puissance du panneau	57
Figure III.19 l'algorithme IncCond classique	59
Figure III.20 structure de base de la commande floue Les paramètres d'entrées E et ..	61
Figure IV.1 Schéma bloc sous Simulink du système global	65
Figure IV.2 Système PV avec interface H-Bridge sous Simulink.....	66
Figure IV.3 Radiance.....	66
Figure IV.4 Voltage	67

Figure IV.5 Intensité	67
Figure IV.6 Température	68
Figure IV.7 voltage	68
Figure IV.8 Intensité.....	69
Figure IV.9 Système PV avec convertisseur DC/DC sous Simulink	70
Figure IV.10 La variation de la radiance (éclairage).....	70

Tables des Tableaux

Tableau III.1 Paramètres du convertisseur DC-DC boost.....	48
Tableau III.2 Exemple d'une table de vérité pour une commande logique floue.....	61



Introduction générale

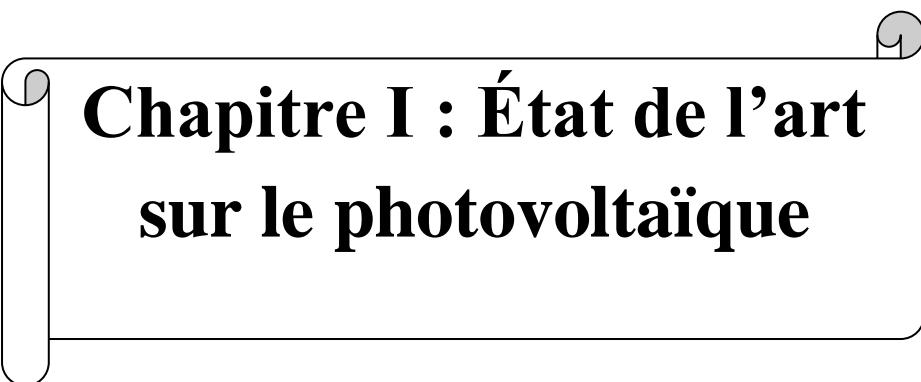
Introduction générale :

La transition énergétique mondiale s'impose aujourd'hui comme un impératif stratégique et environnemental. La raréfaction progressive des ressources fossiles, conjuguée à l'instabilité de leur marché, à l'augmentation continue des besoins énergétiques, ainsi qu'aux préoccupations croissantes liées au changement climatique, pousse les gouvernements, les industriels et les chercheurs à explorer et à développer des alternatives énergétiques durables. Dans ce contexte, les énergies renouvelables apparaissent comme des solutions prometteuses, en particulier l'énergie solaire, dont le potentiel est largement reconnu par la communauté scientifique.

Parmi les différentes technologies d'exploitation de l'énergie solaire, la filière photovoltaïque se distingue par sa capacité à convertir directement le rayonnement solaire en énergie électrique, sans émissions de gaz à effet de serre et avec un faible impact environnemental. Depuis la découverte de l'effet photoélectrique et les premières cellules à base de silicium, le domaine du photovoltaïque a connu des avancées majeures tant en termes de matériaux que d'architectures de dispositifs, ce qui a permis d'améliorer considérablement les rendements et de réduire les coûts de production.

Ce mémoire s'inscrit dans cette dynamique de développement technologique et scientifique. Il est structuré en trois volets complémentaires. Le premier chapitre propose un état de l'art détaillé sur les sources d'énergie, renouvelables et non renouvelables, avec un focus approfondi sur la technologie photovoltaïque, ses fondements théoriques, ses principales filières et leurs perspectives d'évolution. Le deuxième chapitre est consacré à l'analyse des mécanismes physiques intervenant dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques, ainsi qu'à la caractérisation expérimentale de leurs performances en fonction des conditions d'éclairement. Le troisième chapitre aborde la problématique de la maximisation de la puissance extraite des modules photovoltaïques à travers les techniques MPPT (Maximum Power Point Tracking), en présentant des simulations numériques des différentes méthodes de commande associées à des convertisseurs DC/DC.

L'objectif global de ce travail est de contribuer à une meilleure compréhension des phénomènes qui régissent le fonctionnement des cellules photovoltaïques, et d'identifier les leviers technologiques permettant d'en optimiser l'efficacité, en vue de leur intégration plus performante dans les systèmes de production d'énergie électrique.



Chapitre I : État de l'art sur le photovoltaïque

Introduction :

La diminution des ressources énergétiques fossiles et la hausse durable de leur prix, l'augmentation considérable des besoins en énergie, les difficultés d'approvisionnement, le poids du secteur énergétique dans les émissions de CO₂ et la lutte contre le changement climatique imposent d'adapter les modes de production et de consommation d'énergie. Il semble que les énergies renouvelables soient un des éléments de réponse à cette question, dans laquelle l'énergie solaire sera d'après la communauté scientifique, le meilleur candidat qui pourra remplacer les énergies fossiles. Le domaine photovoltaïque connaît dans les dernières années une révolution aussi bien dans le domaine de la recherche que celui de l'industrie. Dans ce contexte, nous allons nous intéresser à cette technologie en présentant dans ce premier chapitre une synthèse bibliographique afin d'introduire les chapitres suivants. Avant d'entamer l'état de l'art de photovoltaïque, nous commençons par une petite généralité sur les différentes ressources d'énergie, nous aborderons quelques statistiques sur la consommation mondiale de ces sources dans le domaine de la production d'électricité. Nous parlerons après, de l'état de l'art de photovoltaïque en commençant par l'historique, nous décrivons ensuite l'aspect théorique de l'effet photoélectrique. Puis nous citrons les différentes filières des cellules photovoltaïques, leurs avantages et inconvénients. En dernier lieu nous présentons les perspectives des différentes technologies des cellules photovoltaïques.

I. Généralité sur les sources d'énergie :

l'International Energy Agency [1] montre dans son rapport publié en 2019 que la demande d'énergie au niveau mondial augmente de 1,3% chaque année jusqu'en 2040. La couverture de ces besoins demandera des investissements énormes que le monde sera amené à fournir. Mais la question se pose plutôt : vers quelles sources d'énergie les états se tourneront-ils afin de répondre à la hausse de la demande ?

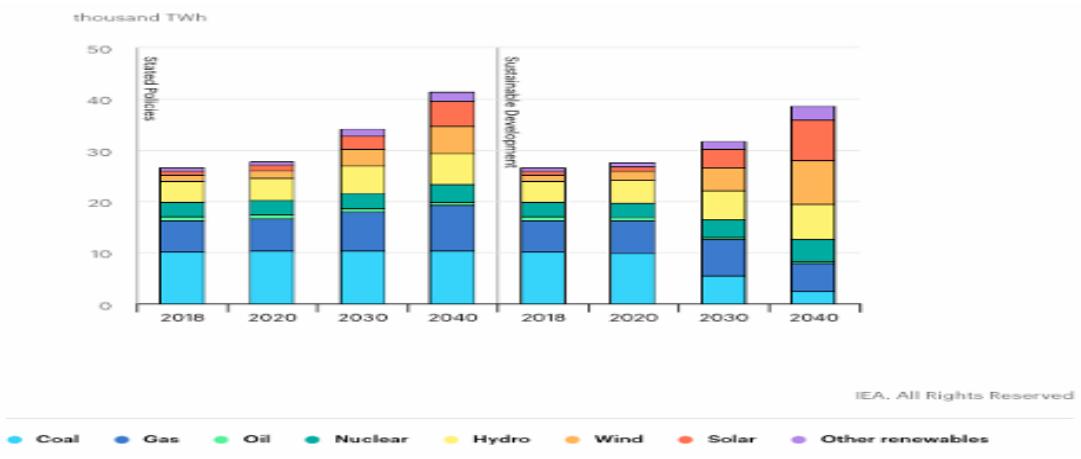


Figure I-1 : Sources de production d'électricité à l'échelle mondiale [1].

La figure I-1 montre que les énergies fossiles restent toujours les sources les plus utilisées pour la production de l'électricité à l'échelle mondiale mais on remarque aussi une évolution progressive de l'utilisation des énergies renouvelables qui gagnent de plus en plus leurs places et qui peut être dominent.

I-1. Sources d'énergie non-renouvelable :

I-1.1. Les énergies fossiles :

Ce sont le charbon, le pétrole et le gaz trouvé dans des gisements souterrains issus de la décomposition d'organismes vieux de millions d'années et qui sont les principales sources énergétiques utilisées au niveau mondial. D'après le rapport de 'Climate Change 2018': The Physical Science Basis, publication du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat [2], les activités humaines ont causé environ 1,0 °C de réchauffement climatique au-dessus des niveaux préindustriels, avec un intervalle probable de 0,8 °C à 1,2 °C. Le réchauffement climatique atteindra 1,5 °C entre 2030 et 2052 s'il continue d'augmenter au rythme actuel (Figure I-2)

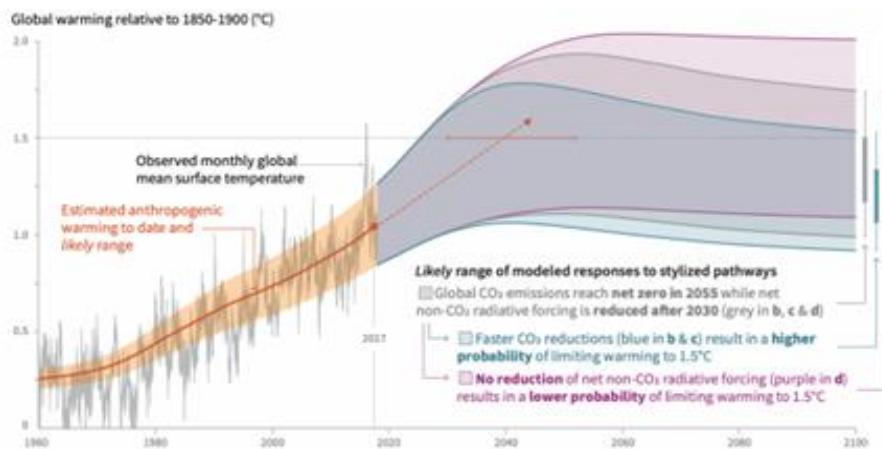


Figure I-2 : Réchauffement climatique [2].

Ce réchauffement est en corrélation avec une hausse du taux de CO₂ dans l'atmosphère, hausse attribuée par une majorité de scientifiques aux activités humaines. Ce gaz participe à l'effet de serre, soit le confinement des rayonnements solaires dans l'atmosphère terrestre. Au lieu d'être réfléchi dans l'espace, certains rayonnements émis par le sol sont captés par le CO₂, participant ainsi au réchauffement global de l'atmosphère.

I-1.2. L'énergie nucléaire :

Le point positif de cette technologie est qu'elle ne rejette pas de gaz à effet de serre, mais l'inconvénient de l'utilisation de cette source d'énergie est la gestion des déchets radioactifs qui restent entier : on enfouit aujourd'hui des déchets radioactifs dont la durée de demi-vie est de l'ordre de 10000 ans, et d'un million d'années pour certains et encore plus comme dans le cas de l'uranium 238 avec 4,5 milliards d'années.

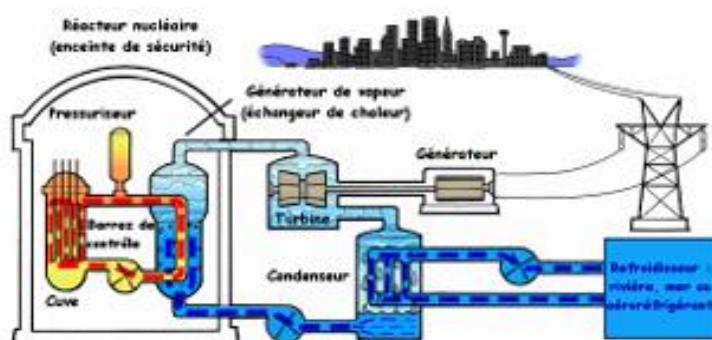


Figure I-3 : Principe de fonctionnement d'une centrale nucléaire [3].

La maîtrise des mesures de sécurité des réacteurs nucléaires (Figure I-3) a posé beaucoup de questions après les accidents des centrales nucléaires de Tchernobyl en Ukraine et de Three Miles Island aux Etats-Unis. Plusieurs pays tels que la France et l'Allemagne ont décidé de minimiser le nombre des centrales nucléaires destinées à la production de l'électricité.

I-2. Sources d'énergies renouvelables :

L'urgence de réduire les émissions de CO₂ pousse les nations à développer les énergies renouvelables, peu ou pas émettrices de gaz à effet de serre. Les gisements éoliens et solaire devraient être les principales sources d'énergie renouvelables dans le siècle à venir, et pourraient répondre en partie à ces problématiques.

I-2.1. L'énergie éolienne :

Depuis plusieurs siècles, l'énergie éolienne a été utilisée pour fournir un travail mécanique en exploitant la force aérodynamique du vent (Figure I-4). Cette énergie a été utilisée pour la première fois dans la marine à voile puis dans les moulins à vent et les pompes à vent. C'était vers la fin du 19^{ème} siècle que cette énergie a été exploitée pour reproduire de l'électricité.

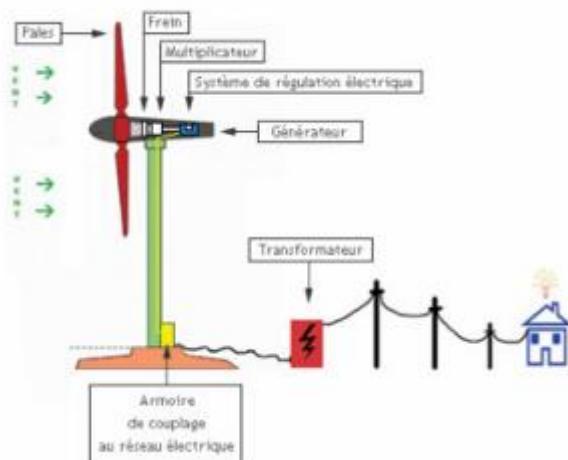


Figure I-4 : Présentation d'une éolienne .

Selon la figure I-5, la capacité en énergie éolienne de la Chine s'établissait à environ 184 gigawatts en 2018, plus que dans tout autre pays du monde à ce temps-là. Les États-Unis obtenaient la deuxième place du classement, disposant d'une capacité en énergie éolienne de près de 100 gigawatts en 2018.

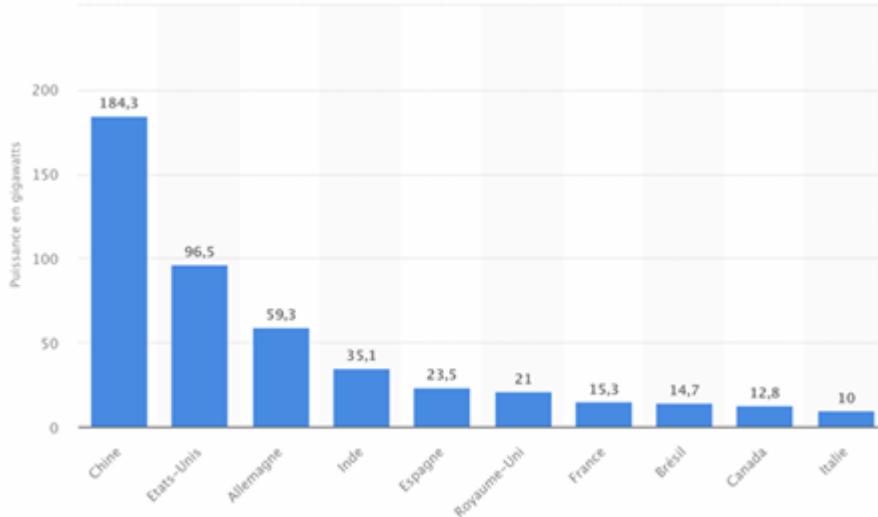


Figure I-5 : Capacité d'énergie éolienne dans le monde en 2018 [4].

Au niveau mondial, le développement de l'éolien est relativement stable depuis 2014, avec plus de 50 GW de nouvelles capacités installées chaque année (Figure I-6)



Figure I-6 : Evolution de la puissance du parc éolien [5].

I-2.2. L'énergie hydraulique :

L'eau est une source exploitée depuis des milliers d'années au travers des barrages, des moulins à eau et des systèmes d'irrigation. Plusieurs technologies permettent d'exploiter l'énergie produite par la chute ou le mouvement de l'eau. Les roues à aubes peuvent la transformer directement en énergie mécanique (moulin à eau), tandis que les turbines et les générateurs électriques la transforment en électricité (Figure I-7).

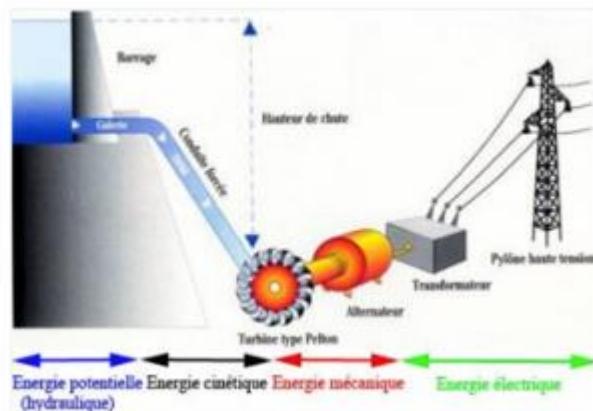


Figure I-7 : Energie hydraulique (principe de fonctionnement) [6].

L'énergie produite par les vagues et les marées dans les mers et les océans peut être exploitée pour reproduire l'électricité. Les océans, qui couvrent presque 70 % de la surface du globe, pourraient constituer la source d'énergie renouvelable du futur, même si, pour l'instant, leur exploitation pour produire de l'électricité n'est pas rentable.

I-2.3. L'énergie géothermique :

L'énergie géothermique désigne l'énergie créée et emmagasinée dans la terre sous forme thermique. Elle est parfois libérée à la surface par des volcans ou des geysers, mais elle peut aussi être accessible à tout moment, comme dans les sources d'eau chaude. La géothermie peut servir à produire de l'électricité ou à chauffer et refroidir.

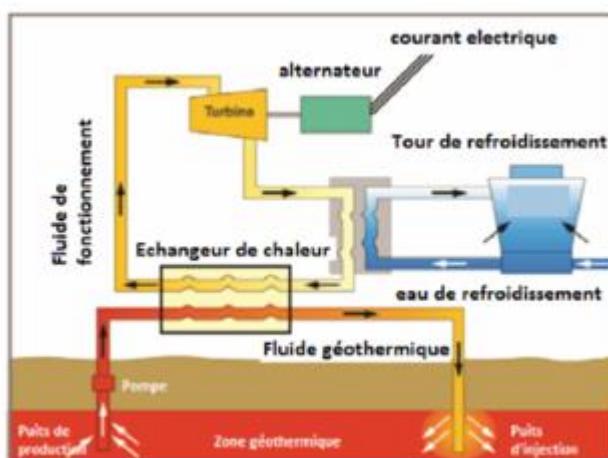


Figure I-8 : Schéma descriptif d'une centrale géothermique [7].

Pour capter l'énergie géothermique, on fait circuler un fluide dans les profondeurs de la Terre. Le fluide se réchauffe et remonte chargé de calories (énergie thermique). Ces calories sont utilisées directement ou converties partiellement en électricité (Figure I-8).

I-2.4. L'énergie solaire :

Chaque année, la Terre reçoit $1,56 \cdot 10^{18}$ kWh en énergie solaire, ce qui représente plus de 15000 fois la consommation mondiale d'électricité ! Il existe deux façons d'exploiter cet incroyable gisement : convertir le rayonnement en chaleur puis (éventuellement) en électricité par voie dite thermodynamique ou convertir le rayonnement directement en électricité par la voie dite photovoltaïque.

La voie thermodynamique représentée dans la Figure I-9 est une technologie qui utilise des miroirs qui concentrent l'énergie solaire vers un tube contenant un fluide. Ce dernier est chauffé jusqu'à une température pouvant atteindre 500°C . La chaleur obtenue est transférée à un circuit d'eau, la vapeur alors produite actionne une turbine couplée à un alternateur qui produit de l'électricité.

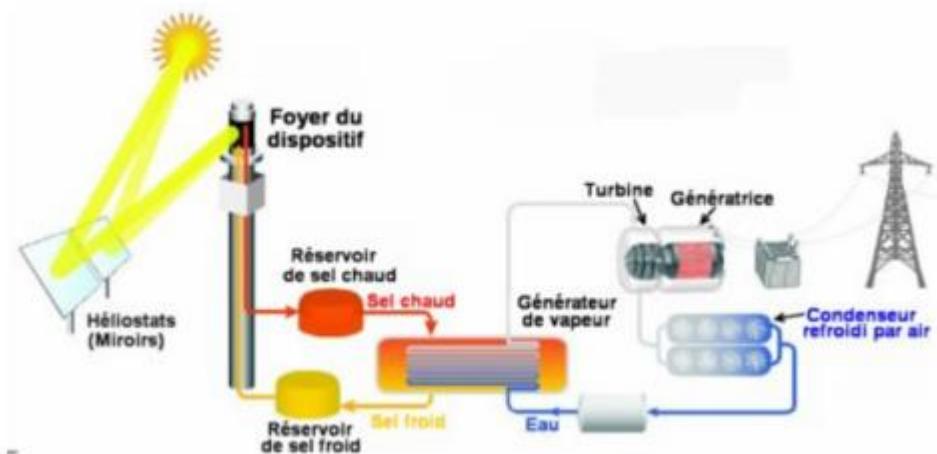


Figure I-9 : Schéma d'une centrale solaire (voie thermodynamique) [8].

Dans la voie photovoltaïque, La lumière solaire (photons) transmet son énergie aux électrons contenus dans un semi-conducteur (qui constitue une cellule photovoltaïque) capable de convertir le rayonnement solaire en électricité (Figure I-10). Les électrons sont alors mis en mouvement, produisant ainsi un courant électrique.

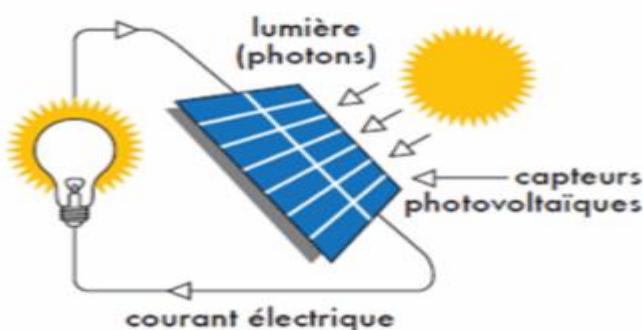


Figure I-10 : Transformation de l'énergie lumineuse en énergie électrique (voie photovoltaïque)

II. Le Photovoltaïque :

II-1. Historique du photovoltaïque :

En 1839, Antoine Becquerel publie un papier sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires relatif à une expérience menée par son fils Edmond avec une pile constituée par des électrodes de platine et de cuivre oxydé plongeant dans une solution électrolytique acide. Dans l'année 1873, L'ingénieur américain Willoughby Smith découvre les propriétés photosensibles du sélénium , en 1877, W. G. Adams et R. E. Day découvrent l'effet photovoltaïque du sélénium[9], et C.Fritts met au point le premier panneau photovoltaïque à base de sélénium. Il est surtout le premier à croire à l'énorme potentiel de l'énergie solaire. À cette époque, le niveau des connaissances scientifiques ne permettait pas d'expliquer le fonctionnement de ces dispositifs, et ce n'est qu'en 1905 qu'Albert Einstein publie un article convaincant sur l'effet photoélectrique, ce qui lui a valu le prix Nobel en 1921[10]. En 1916, Robert Millikan a été le premier à produire de l'électricité avec une cellule solaire . A cette époque les rendements de ces cellules étaient négligeables, il faut attendre 1954 pour que des chercheurs de Bell Telephone Laboratoires (États-Unis), annoncent la mise au point d'une cellule dont le rendement de conversion énergétique atteint 6%, marquant ainsi véritablement la naissance de l'électricité photovoltaïque. L'énergie solaire connaît un second élan au cours du premier choc pétrolier dans les années 1970[11]. Alors que le prix du pétrole augmente de façon spectaculaire, les panneaux solaires photovoltaïques commencent à être utilisés pour la première fois dans les maisons. L'évolution de cette nouvelle source d'énergie a connu leurs années lumières dans les années 1980 avec la naissance de la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque. L'énergie solaire devient une priorité pour de plus en plus de pays. Des centrales solaires sont en cours de construction dans le monde entier. Les entreprises d'électricité et les gouvernements ont offert des subventionset des réductions pour encourager les propriétaires à investir dans l'énergie solaire pour leur maison[12].

II-2. Effet photovoltaïque :

Le terme « photovoltaïque » désigne le processus physique qui consiste à transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique par le transfert de l'énergie des photons aux électrons d'un matériau. Le préfixe Photo vient du grec « phos » qui signifie lumière. « Volt » vient du patronyme d'Alessandro Volta (1745-1827), physicien qui a contribué aux recherches sur l'électricité. Photovoltaïque (PV) signifie donc littéralement électricité lumineuse[13].

II-2.1. Le quanta d'énergie du photon :

Grâce à l'hypothèse de la quantification de la lumière effectuée par Albert Einstein, la lumière est maintenant considérée comme étant un faisceau d'onde-particules nommé «photon» se déplaçant chacun à la vitesse de la lumière (c) et transportant chacun une quantité d'énergie unique quantifiée (E) qui est égale à la fréquence (v)du photon multiplié par le quanta d'énergie fondamentale (h) qui est la constante de Planck :

$$\text{En fréquence : } E = hv. \quad (\text{Eq. I.1})$$

$$\text{En longueur d'onde : } E = hc/\lambda. \quad (\text{Eq. I.2})$$

E: Énergie transportée par le photon (J).

v: Fréquence du photon (s-1 ou Hz).

λ : Longueur d'onde de la lumière (m)

h : Constante de Planck (6,63.10-34J.s)

c: Vitesse de la lumière (3.108 m.s-1)

II-2.2. Explication quantique de l'effet photoélectrique :

En appliquant l'hypothèse de l'existence du photon, Albert Einstein fut en mesure d'expliquer la nature quantique de l'effet photoélectrique et il fut récompensé du prix Nobel de physique en 1921 pour ses travaux :

- Lorsqu'une structure est exposée à la lumière, elle est exposée à un torrent de photons. Ceux-ci entrent en collision avec les électrons et peuvent être absorbés. S'il y a absorption, l'énergie cinétique de l'électron sera augmentée d'un facteur (hv) (énergie du photon).
- Pour que l'électron puisse être éjecté, il doit avoir suffisamment d'énergie pour quitter la structure ce qui l'invite à changer d'état de liaison avec la structure. Cette énergie porte le nom de « travail d'extraction ».
- L'électron ne peut pas accumuler temporairement de l'énergie avec plusieurs photons moins énergétiques pour atteindre le travail d'extraction, car les l'énergie cinétique se dissipent très rapidement dans la structure s'il n'y a pas de changement d'état.
- Pour être éjecté, le photon doit permettre dès la collision à l'électron de changer d'état. Pour les électrons près de la surface du matériau, il n'y a pas d'état de transition entre l'électron lié et l'électron libéré.

II-2.3. Le travail d'extraction :

Afin d'éjecter un électron d'une structure, un photon doit être absorbé par un électron et lui fournir une énergie (hv) supérieure au travail d'extraction :

$$E = hv > we \quad (\text{Eq I.3})$$

E : énergie transportée par le photon (J)

v: La fréquence du photon (s-1 ou Hz)

We: Le travail d'extraction (J ou eV)

h : Constante de Planck (6,63.10-34J.s)

II-3. Les filières technologiques du photovoltaïque :

II-3.1. La filière silicium (Première génération):

Le silicium représente le deuxième élément le plus abondant sur terre après l'oxygène et peut donc être considéré comme inépuisable. Les cellules à base de silicium représentent la majorité de la production mondiale de cellules photovoltaïques. Le silicium cristallin est un élément stable et qui possède un gap indirect de 1,11 eV, ce qui lui permet d'absorber une partie importante du rayonnement solaire. Afin de permettre la réalisation d'une jonction p n, le silicium dopé n et p est obtenu en substituant respectivement des atomes de phosphore et de bore à certains atomes de silicium. Il existe différents types de cellules silicium :

II-3.1.1. Silicium monocristallin :

Ce matériau est composé d'un seul cristal qui donne une couleur unie. Il est obtenu par croissance d'un lingot cylindrique à partir d'un monocristal « souche ». Les lingots sont découpés en plaques aux angles arrondis d'environ 250 µm. Les rendements des cellules à base de silicium monocristallin (Figure I-11) sont parmi les meilleurs, de 15 à 18% avec une durée de vie de 30 ans. Leur conception demande une plus grande dépense énergétique, son coût est donc élevé et leur rendement diminué sous un faible éclairement.



Figure I-11 : Cellule solaire à base de Silicium monocristallin.

II-3.1.2. Silicium polycristallin :

Ce matériau est constitué d'une mosaïque de cristaux monocristallins de silicium, d'orientations et de tailles différentes. Le matériau en fusion est coulé dans des lingots de forme rectangulaire puis refroidi. Les lingots sont découpés en plaques rectangulaires d'environ 250 µm. Le rendement des cellules à base de silicium polycristallin (Figure I-12) est de 12 à 15% avec une durée de vie de 30 ans. Leur conception est moins cher par rapport au monocristallin et leur rendement diminué sous un faible éclairement.



Figure I-12 : Cellule solaire à base de Silicium polycristallin.

II-3.1.3. Silicium amorphe :

Le silicium amorphe est une variante «couche mince». Les éléments actifs (semi-conducteurs, photosensibles) représentent une couche d'épaisseur de 1 à 2 μm soit 100 à 200 fois plus fine que pour les technologies cristallines. Cela permet à la fois une économie de matériau et d'énergie puisque le procédé employé se réalise à basse température. Il en résulte une réduction significative des coûts de production. En plus les cellules à base de silicium amorphe (figure I-13) fonctionnent avec un éclairage faible, elles sont moins sensibles aux températures élevées. Le seul inconvénient est leur durée de vie relativement faible par rapport au silicium cristallin avec une durée de 10 ans.



Figure I-13 : Cellule solaire à base de Silicium amorphe.

II-3.2. Les filières « couches minces » non silicium (Deuxième génération) :

Deux filières se sont imposées progressivement, l'une basée sur le tellure de cadmium (Cd Te) et l'autre sur les alliages Cuivre, Indium, Sélénium appelée filière CIS. Les modules au CIS

présentent des rendements de 11 à 13 % contre des rendements à 9 % pour les modules au Cd-Te. Les filières «couche mince» bénéficient des mêmes avantages que le silicium amorphe, avec un cout de fabrication moins élevé et permettent de réaliser des structures multijonctions. La cellule couche mince (Figure I-14) peut être construite sur un substrat flexible, mais elle nécessite une surface plus importante pour des meilleurs rendements.



Figure I-14 : Cellule solaire en couche mince.

II-3.3. Les filières multijonctions :

Les cellules multijonctions, composées de plusieurs couches minces de cellules, permettent de convertir différentes parties du spectre solaire et ainsi d'obtenir de meilleurs rendements de conversion. Il s'agit de cellules multijonction à base de semi-conducteurs dits III-V. à base de matériaux composés avec les éléments des colonnes respectives du tableau de Mendeleïev. Le rendement obtenu par ces cellules multijonctions est très élevé bien qu'encore inférieur au rendement théorique. Il est typiquement de l'ordre de 40% pour les cellules commerciales sous concentration et va jusqu'à 46% pour la cellule ayant obtenu le record absolu sous concentration et possédant 4 jonctions [14].

II-3.4. Les cellules organiques(Troisième génération) :

Ce type de cellules est constitué de molécules organiques. Les capteurs solaires se présentent sous forme de films de type photographique, souples, légers et faciles à installer. Il y a actuellement trois types de cellules photovoltaïques organiques : les moléculaires, celles en polymères et les organiques hybrides. L'intérêt potentiel de ces technologies est d'offrir une énergie solaire à un prix significativement inférieur aux technologies de première et de deuxième génération mais elles sont encore au stade de la recherche et développement. Ces cellules sont toutefois déjà utilisées dans certaines applications spécifiques à faible consommation et forte valeur ajoutée comme les calculatrices ou le rechargeement des appareils nomades. On parlera de ce type de cellule avec détail dans le deuxième chapitre.

II-3.5. Cellules à concentration (technologie dite CPV) :

Cette technologie utilise des lentilles optiques qui concentrent la lumière sur de petites cellules photovoltaïques à haute performance. Leur rendement est plus élevé que pour la filière silicium mais il est toutefois nécessaire d'être toujours positionné face au soleil, ce qui

est rendu possible avec l'installation d'un « tracker » (support mobile pivotant). Cette technologie n'est actuellement intéressante économiquement que dans les zones où l'ensoleillement direct est très important.

II-3.6. Cellules pérovskites hybrides :

Encore au stade de développement en laboratoire, il s'agit d'une filière très prometteuse, dont les progrès en termes de rendement ont été spectaculaires ces dernières années. Cette filière est apparentée à la technologie des couches minces et repose sur le methylammonium iodure de plomb. Des rendements de l'ordre de 22% ont été atteints en laboratoire. Des travaux de recherche sont en cours afin d'atteindre une meilleure stabilité de ces cellules et de les rendre plus résistantes à l'humidité.

II-4. Perspective d'évolution des différentes technologies photovoltaïques :

Pour chaque technologie des progrès sont constants y compris pour les cellules les plus anciennes dont les rendements record obtenus en laboratoire continuent à s'élever. Sur la figure I-15, nous pouvons remarquer une évolution globalement linéaire avec des tendances relativement nettes pour la majorité des technologies de cellules.

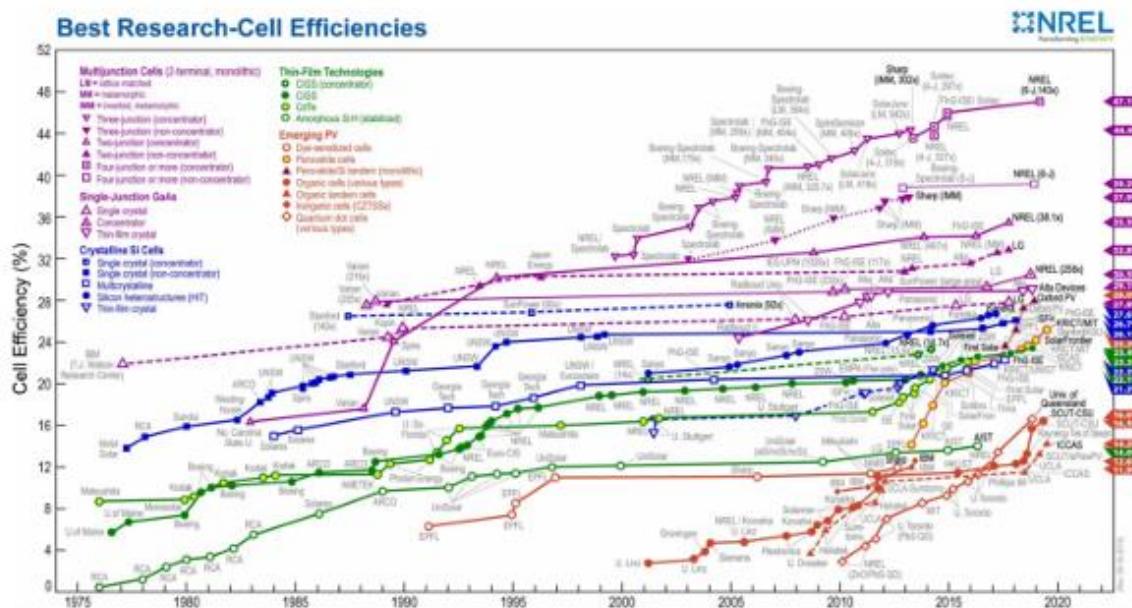


Figure I-15 : Évolution des technologies de cellules photovoltaïque [15].

Il apparaît que la technologie silicium est quasiment arrivée à maturité et proche de son rendement théorique (30% pour les cellules à une seule jonction). Le rendement record de 27,6 % est actuellement détenu par le fabricant Japonais Kaneka. Pour les cellules à une jonction avec des matériaux III-V, la progression du rendement dans le temps est un peu plus rapide que celle du Si avec un pourcentage record de 30,5 %. La raison en est l'éventail des matériaux et de leurs dopants, qui autorise plus de choix pour trouver un optimum. Concernant les cellules à multijonctions, la croissance des performances est encore plus rapide. Le choix des matériaux a encore augmenté, ainsi que le nombre de couches.

L'épaisseur, le dopage et le type de matériau de chaque couche ont une influence. Cette technologie est actuellement classée à la tête des technologies point de vue rendement avec un pourcentage record de 47,1%. Pour la technologie couche mince, l'évolution de leur rendement et relativement faible, cela est justifié par le coût élevé de leur fabrication. Le meilleur rendement pour les cellules à couche mince est de 23,4%. D'autres technologies récentes viennent de gagner leurs places avec une progression remarquable par rapport aux autres technologies anciennes, il s'agit de la technologie des cellules à base de molécules pérovskite avec un rendement record de 25,2% et celle à base de molécules organiques, qui est malgré leurs faibles rendements (16,5%), elle présente à l'horizon un grand avenir d'après la communauté scientifique.

Conclusion :

Les sources d'énergie sont réparties en deux classes : la première est renouvelable, il s'agit de sources qui se renouvellent et ne s'épuiseront donc jamais à l'échelle du temps humain! La deuxième est non-renouvelable qui sont les énergies fossiles comme le pétrole, le charbon et le gaz dont les gisements limités peuvent être épuisés. Les sources renouvelables sont l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, géothermique, marine et la biomasse. L'impact de l'utilisation colossale des ressources d'énergie non-renouvelables sur l'environnement telle que la pollution, l'effet de serre, les radiations radioactives ainsi que l'épuisement de ces ressources qui due à l'augmentation des besoins énergétiques mondiale impose aux industriels de chercher une autre source à la fois durable et non polluante. D'après la communauté scientifique, l'énergie solaire est le premier candidat qui pourra à l'avenir remplacer les sources d'énergie non-renouvelables, car le soleil est une source d'énergie puissante propre et gratuite, il n'y a qu'à l'exploiter ! Depuis la découverte de l'effet photoélectrique, les chercheurs ont essayé de rendre cette source exploitables et rentable. Dans les dernières années et avec le développement des sciences de matériaux ainsi que les techniques de synthèse et d'élaboration des cellules solaires, le domaine du photovoltaïque à connu une grande révolution. Jusqu'aujourd'hui, la filière des cellules à bas de silicium est la plus dominante par rapport aux autres technologies telles que les cellules à couche mince et les cellules à multi-jonction. Une autre technologie innovante a gagné leur place dans le marché des cellules solaire, il s'agit des cellules à base de matériaux organiques, malgré leurs rendements relativement faibles par rapport aux cellules à base de silicium, elles présentent plusieurs avantages à savoir leurs synthèse assez simple et non couteuse ainsi que leurs stabilités thermiques et chimiques en plus elles sont recyclables, propres et flexibles.



Introduction :

Dans un contexte mondial marqué par la nécessité de développer des sources d'énergie renouvelable efficaces, les cellules photovoltaïques occupent une place centrale dans la conversion directe de l'énergie solaire en électricité. Cette technologie repose sur l'exploitation de phénomènes physiques complexes au sein de matériaux semi-conducteurs, permettant de transformer le rayonnement lumineux en courant électrique exploitable. Comprendre les mécanismes internes qui régissent le fonctionnement des cellules photovoltaïques est indispensable pour améliorer leur rendement et optimiser leur intégration dans les systèmes énergétiques modernes.

Ce chapitre a pour objectif d'analyser en détail les différentes étapes de la conversion photovoltaïque, depuis l'absorption du photon jusqu'à la collecte des porteurs de charge. Nous aborderons tout d'abord les mécanismes physiques fondamentaux impliqués dans la génération du courant électrique, en insistant sur la nature des excitons, leur dissociation et le transport des porteurs. Ensuite, nous présenterons les méthodes de caractérisation électrique des cellules, notamment à travers les courbes courant-tension (I-V), permettant d'extraire les paramètres clés tels que le courant de court-circuit, la tension en circuit ouvert, le facteur de forme ou encore le rendement de conversion. Enfin, une attention particulière sera portée sur les différentes associations de cellules (série, parallèle, mixte) et leurs effets sur les performances globales des générateurs photovoltaïques, à travers des simulations représentatives.

Ce chapitre vise ainsi à établir une compréhension approfondie des phénomènes physiques et techniques qui conditionnent l'efficacité des cellules solaires, en fournissant les bases nécessaires à l'optimisation des dispositifs et à leur utilisation dans des environnements réels.

I. Mécanismes physiques en jeu dans les cellules photovoltaïques :

I-1. Absorption d'un photon :

L'absorption d'un photon constitue le point de départ du processus de conversion photovoltaïque. Lorsqu'un photon issu du spectre solaire interagit avec le matériau semi-conducteur actif, il peut être absorbé si son énergie $E_{\text{photon}} = h\nu$ est supérieure ou égale à l'énergie de la bande interdite (E_g) du matériau. Cette absorption induit la transition d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction, générant ainsi une paire électron-trou. Ce phénomène repose sur la structure de bande du semi-conducteur et dépend fortement de la densité d'états électroniques disponibles ainsi que du coefficient d'absorption du matériau, qui varie selon la longueur d'onde incidente. Les photons de plus haute énergie (UV, visible) sont généralement absorbés à faible profondeur, tandis que les photons de plus basse énergie (infrarouge proche) pénètrent plus profondément, ce qui peut compromettre la collecte efficace des porteurs générés. De plus, l'excès d'énergie des photons au-delà de E_g est rapidement perdu par thermalisation, ce qui constitue une des principales sources de pertes thermodynamiques dans les cellules solaires. Ainsi, l'absorption photonique n'est pas seulement conditionnée par les propriétés optiques du matériau, mais elle influence

directement les mécanismes ultérieurs de séparation et de transport des charges, et donc le rendement global de la cellule.

I-2. Génération des excitons :

Dans certains types de cellules photovoltaïques, notamment celles à base de matériaux organiques, de pérovskites hybrides ou de semi-conducteurs à faible constante diélectrique, l'absorption d'un photon ne conduit pas directement à la formation d'une paire électron-trou libre, mais à la création d'un exciton. Un exciton est un quasi-particule formée par un électron dans la bande de conduction et un trou dans la bande de valence, liés par une force électrostatique de type coulombien. Cette liaison est favorisée dans les matériaux où la permittivité diélectrique est faible et où les porteurs de charge présentent une faible mobilité, ce qui empêche une séparation immédiate des charges. L'énergie de liaison de l'exciton dépend du matériau, et peut atteindre plusieurs centaines de milli électronvolts dans les matériaux organiques, rendant leur dissociation thermique improbable à température ambiante. La génération d'excitons est donc une étape intermédiaire entre l'absorption photonique et la séparation des charges libres. Pour que le courant puisse être généré, ces excitons doivent migrer vers une interface donneur/accepteur (dans les hétérojonctions, par exemple) où la dissociation est facilitée par une discontinuité d'énergie (offset) entre les niveaux LUMO/HOMO des matériaux. La maîtrise de la dynamique des excitons – leur diffusion, leur durée de vie et leur dissociation – est ainsi un facteur critique dans le design et l'optimisation des cellules photovoltaïques excitoniques

Les excitons peuvent être de deux types (Figure II-1). S'ils sont localisés sur une seule molécule, ils sont nommés excitons de Frenkel [16]. A contrario s'ils sont délocalisés sur plusieurs unités moléculaires, on parle alors d'excitons de type Mott-Wannier [17]. Dans le cas des matériaux organiques, ces excitons sont presque toujours de type Frenkel [18]. Les excitons dans le cas des matériaux organiques sont donc mobiles, électriquement neutres et fortement localisés.

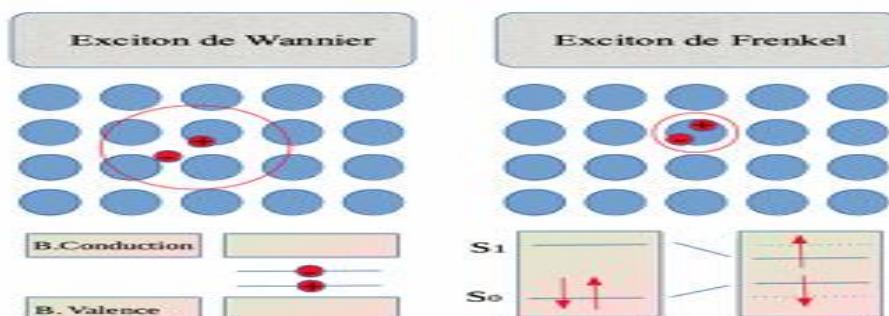


Figure II-1 : Illustration de la différence entre un exciton de type Wannier et un exciton de type Frenkel .

Cette étape de conversion peut être optimisée en élargissant le spectre d'absorption des matériaux utilisés dans la couche active afin d'augmenter le nombre de photons absorbés.

I-3. Diffusion de l'exciton :

Une fois généré, l'exciton doit se déplacer à l'intérieur du matériau actif jusqu'à atteindre une interface où il pourra se dissocier en charges libres. Ce déplacement s'effectue par un mécanisme de diffusion gouverné par les propriétés électroniques et structurales du matériau. La diffusion de l'exciton est un processus non dirigé, souvent modélisé comme un processus aléatoire (diffusion brownienne), caractérisé par une longueur de diffusion LD donnée par :

$$L_D = \sqrt{D_T \tau} \quad (\text{Eq II.1})$$

où D est le coefficient de diffusion de l'exciton, et τ sa durée de vie moyenne. Dans les matériaux organiques, cette longueur de diffusion est généralement très faible (de l'ordre de 5 à 20 nm), en raison de la forte localisation des états électroniques, de la faible mobilité des excitons, et de leur recombinaison rapide. Cette contrainte impose une architecture spécifique aux dispositifs, notamment l'utilisation de structures à hétérojonction en vrac (bulk heterojunction) dans les cellules solaires organiques, qui maximisent les interfaces entre les matériaux donneur et accepteur pour favoriser la dissociation rapide des excitons. À l'inverse, dans certains matériaux inorganiques ou hybrides (comme certaines pérovskites), les excitons possèdent des longueurs de diffusion plus élevées (supérieures à 100 nm), ce qui permet des architectures plus simples. La diffusion efficace des excitons est donc un paramètre crucial qui conditionne directement le rendement quantique interne et l'efficacité globale de la cellule photovoltaïque.

I-4. Dissociation de l'exciton :

La dissociation des excitons est une étape clé dans les cellules photovoltaïques excitoniques, où l'énergie lumineuse absorbée ne génère pas directement des porteurs de charge libres. Après diffusion vers une interface donneur/accepteur, l'exciton peut être dissocié si la discontinuité d'énergie entre les niveaux électroniques des deux matériaux est suffisante. Typiquement, le niveau LUMO de l'accepteur doit être significativement plus bas que celui du donneur (ou le HOMO plus élevé dans le cas de trous) pour permettre un transfert d'électron (ou de trou) favorable sur le plan énergétique. Ce processus, souvent qualifié de séparation assistée par l'interface, surmonte l'énergie de liaison de l'exciton grâce à l'offset énergétique. La dissociation produit alors une paire électron-trou spatialement séparée, appelée état de charge transférée (CT state), encore faiblement liée par des forces coulombiennes. Si le champ interne ou les gradients de potentiel sont suffisants, cette paire peut être séparée définitivement en charges libres mobiles. L'efficacité de dissociation dépend donc non seulement de l'alignement énergétique des matériaux, mais aussi de la morphologie de l'interface, de la permittivité diélectrique locale, et de la présence éventuelle de champs électriques internes. Toute inefficacité dans cette étape conduit à la recombinaison des excitons ou à leur piégeage, ce qui diminue le rendement quantique interne de la cellule.

L'optimisation de cette étape est donc cruciale pour améliorer les performances des dispositifs excitoniques, comme les cellules organiques ou hybrides à pérovskites.

I-5. Transport des porteurs de charges :

Après leur génération ou leur dissociation, les porteurs de charge – électrons et trous – doivent être transportés jusqu'aux électrodes collectrices sans se recombiner. Ce transport repose sur deux mécanismes principaux : la dérive et la diffusion. La dérive est induite par le champ électrique interne présent au niveau de la jonction pn (dans les cellules classiques) ou par des gradients de potentiel chimique, et conduit les charges vers les électrodes opposées. La diffusion, quant à elle, est un processus thermique dépendant du gradient de concentration des porteurs. Dans les matériaux cristallins comme le silicium, où la mobilité des porteurs est élevée, ces deux phénomènes sont très efficaces, et les porteurs peuvent parcourir plusieurs centaines de micromètres avant recombinaison. En revanche, dans les matériaux désordonnés ou organiques, la mobilité des charges est plus faible (souvent inférieure à $10^{-4} \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), ce qui limite la distance de transport. Le transport est alors fortement affecté par les piégeages, les défauts énergétiques et la morphologie du film actif. De plus, l'asymétrie de transport entre électrons et trous peut induire des recombinaisons non radiatives, limitant le courant de court-circuit. Pour pallier ces limitations, les dispositifs sont souvent conçus avec des couches de transport sélectif (ETL pour les électrons, HTL pour les trous), qui facilitent l'extraction sélective des charges tout en bloquant l'autre type. La compréhension et l'optimisation du transport des porteurs sont donc fondamentales pour garantir un rendement élevé et une stabilité opérationnelle à long terme.

I-6. Collecte des porteurs de charge :

La collecte des porteurs de charge constitue l'étape finale du processus de conversion photovoltaïque. Une fois transportés jusqu'aux interfaces correspondantes, les électrons et les trous doivent être efficacement extraits par les électrodes pour générer un courant électrique dans le circuit externe. Cette extraction dépend de plusieurs facteurs, dont l'alignement **des** niveaux d'énergie entre le matériau actif et les électrodes, la sélectivité des contacts, ainsi que la qualité des couches de transport. Dans les cellules classiques à base de silicium, la jonction pn guide les charges vers les électrodes métalliques situées sur la face avant (grille métallique) et arrière. Dans les cellules excitoniques ou hybrides, la présence de couches de transport sélectives (HTL : Hole Transport Layer, ETL : Electron Transport Layer) est indispensable pour assurer une collecte unidirectionnelle, minimisant les recombinaisons interfaciales.

Un bon contact entre le matériau de transport et l'électrode est essentiel pour limiter la résistance de contact, qui peut entraîner des pertes ohmiques significatives. Les matériaux utilisés pour les électrodes doivent également présenter une transparence optique suffisante (par exemple, l'oxyde d'indium-étain, ITO, pour la face avant) et une conductivité électrique

élevée. En outre, la morphologie, la rugosité de surface, et la stabilité chimique des interfaces influencent fortement la qualité de la collecte.

Toute imperfection dans cette étape – telle qu'un mauvais alignement énergétique, une interface mal contrôlée ou des défauts interfaciaux – peut conduire à des pertes de porteurs par recombinaison ou piégeage, ce qui diminue la tension en circuit ouvert (Voc), le facteur de forme (FF), et in fine le rendement global de la cellule. Ainsi, l'optimisation de la collecte des porteurs de charge, tant sur le plan des matériaux que de l'ingénierie des interfaces, est un enjeu crucial pour le développement de cellules photovoltaïques performantes et stables.

II- Caractérisation des cellules photovoltaïques :

II-1. Caractéristique courant tension :

La caractéristique courant-tension (I-V) constitue la méthode de base la plus utilisée pour la caractérisation électrique des cellules photovoltaïques. Elle permet de déterminer les performances globales d'un dispositif en condition d'illumination standard (AM1.5G, 1000 W/m², 25 °C) ou en obscurité. La courbe I-V est obtenue en faisant varier la tension aux bornes de la cellule, tout en mesurant le courant généré. Elle fournit un aperçu direct du comportement de la cellule et permet l'extraction de plusieurs paramètres clés.

Le courant de court-circuit (I_{sc} ou J_{sc}, densité de courant) correspond au courant maximal délivré lorsque la tension est nulle. Il dépend directement du flux photonique absorbé et de l'efficacité de génération et de collecte des porteurs de charge. La tension en circuit ouvert (Voc) représente la tension maximale atteinte lorsque le circuit est ouvert (courant nul). Elle reflète l'équilibre entre la génération des porteurs photogénérés et leur recombinaison. Le facteur de forme (FF), défini par le rapport entre la puissance maximale (V_{mp}·I_{mp}) et le produit Voc·I_{sc} quantifie la qualité de la courbe et reflète les pertes résistives ou les imperfections de la jonction.

Enfin, le rendement de conversion (η) est calculé comme le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente :

$$n = \frac{V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF}{P_{in}} \quad (\text{Eq II.2})$$

L'interprétation de la courbe I-V permet également de diagnostiquer des phénomènes de dégradation ou des défauts de fonctionnement, comme les pertes ohmiques (résistance série élevée), les fuites de courant (résistance parallèle faible), ou les recombinaisons excessives. En mesurant également la courbe en obscurité, il est possible de modéliser le comportement de la cellule à l'aide d'un circuit équivalent à diode, fournissant des informations complémentaires sur la qualité du dispositif.

La mesure I-V constitue ainsi un outil fondamental à la fois pour la validation des performances d'une cellule photovoltaïque et pour l'analyse approfondie de ses limitations internes.

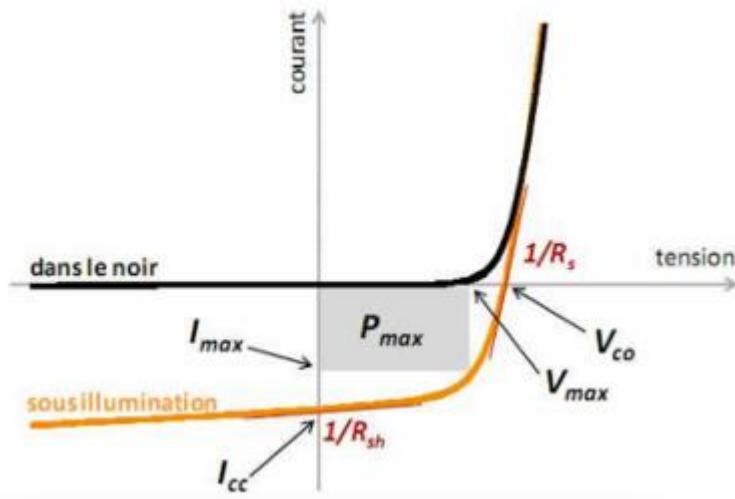


Figure II-2 : Caractéristique courant-tension et grandeurs physiques associées [19].

La figure II-2 représente une caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque à jonction PN. Dans l'obscurité et dans le cas idéal, la courbe obéit à l'équation de Shockley suivante :

$$I = I_0 \left[\exp \left[\frac{qV}{nKT} \right] - 1 \right]$$

(Eq II.3)

Où (I_0) est le courant de saturation, (q) la charge de l'électron, (K) la constante de Boltzmann, (T) la température et (n) le facteur d'idéalité de la diode. Ce dernier tient compte des recombinaisons.

Sous éclairage, un terme I_{ph} , tenant compte du photocourant généré est rajouté. On obtient l'équation suivante :

$$I = I_0 \left[\exp \left[\frac{qV}{nKT} \right] - 1 \right] - I_{ph}$$

(Eq II.4)

Le schéma équivalent est représenté sur la figure II-3 par un générateur de courant I_{cc} , une diode et deux résistances R_s et R_{sh} .

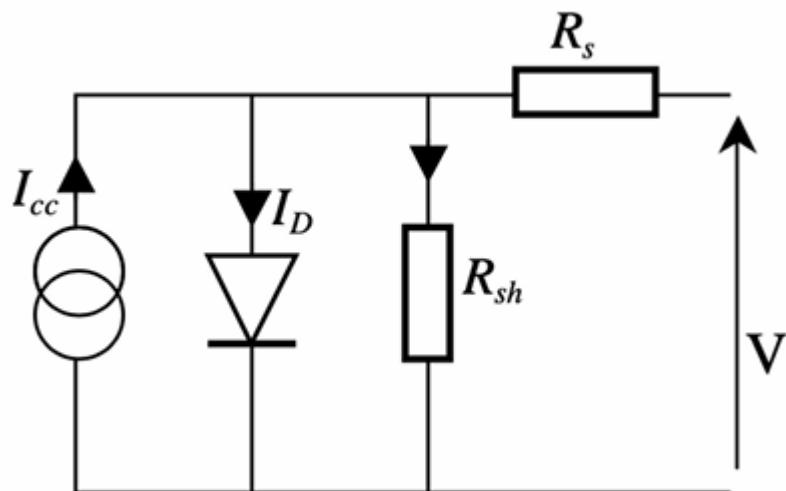


Figure II-3 : Schéma équivalent de la cellule.

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 $PM(IM, VM)$ de la courbe courant-tension (courants compris entre 0 et ICC et tension comprise entre 0 et VOC) (Figure II-3). Ce point PM est obtenu en modifiant la valeur de la résistance externe, quand l'aire du rectangle défini par les axes Ox , Oy et les droites $x = IM$ et $y = VM$ passe par un maximum. En dehors de ce point de fonctionnement PM particulier, la diminution du courant par recombinaison intervient à des points de fonctionnement ayant V_x supérieur à VM et des pertes par chauffage (effet joule) des résistances séries apparaissent dans le cas $I > IM$.

III- Paramètre des cellules photovoltaïques :

Il existe de nombreux paramètres qui permettent de caractériser une cellule solaire. Ces paramètres sont appelés paramètres photovoltaïques et sont déduits de la caractéristique $I(V)$.

Les paramètres sont les suivants :

III-1. Le courant de court-circuit (I_{cc}) :

Le courant de court-circuit (I_{cc}) correspond au courant généré lorsque la tension aux bornes de la cellule est nulle. Il s'agit du courant maximal que la cellule peut produire. Ce paramètre est directement proportionnel à l'intensité lumineuse incidente. Pour des cellules photovoltaïques à faible résistance série, le courant de saturation I_0 peut être négligé. Ainsi, $I_{cc} \approx I_{ph}$.

III-2. La tension de circuit ouvert (V_{oc}) :

C'est la tension par lequel le courant débité par générateur PV est nul (la tension maximale d'une photopile ou générateur PV) ou autre sens lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge.

Son expression est déduite de l'augmentation suivante :

$$0 = I_{Ph} - I_0 \quad (\text{Eq II.5})$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à

III-3. Puissance optimale (Pm) :

La puissance maximale (Pm) est atteinte au point de fonctionnement optimal de la cellule, noté PM (IM, VM). Elle correspond au produit de la tension et du courant à ce point :

$$Pm = Vm \cdot Im \quad (\text{Eq II.6})$$

Ce point est déterminé graphiquement à partir de la courbe I-V, lorsque le rectangle formé par les axes et le point PM présente l'aire maximale.

III-4. Le facteur de forme (FF) :

Dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage ou "fill factor", c'est une paramètre importante utilisée à partir de la caractéristique I(V) pour qualifier la qualité d'une cellule ou générateur PV, plus il s'approche de l'unité, plus les cellules sont meilleures, il définit par :

$$FF = \frac{P_{Max}}{I_{cc}V_{co}} = \frac{I_{max}V_{Max}}{I_{cc}V_{co}} \quad (\text{Eq II.7})$$

III-5. Rendement de conversion en puissance (PCE) :

Il est défini par le rapport entre l'énergie maximale délivrée par la cellule Pmax et l'énergie lumineuse incidente Pin :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF \times I_{cc} \times V_{oc}}{P_{in}} \quad (\text{Eq II.8})$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. Le rendement de conversion est un paramètre essentiel. En effet, la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule.

III-6. Le rendement quantique (EQE) :

Le rendement quantique est le rapport entre le nombre d'électrons dans le circuit externe et le nombre de photons incidents.

$$EQE = \frac{\text{nombre d'électrons dans le circuit externe}}{\text{nombre de photons incidents}} \quad (\text{Eq II.9})$$

En pratique, on le calcule par :

$$EQE(\lambda) = \frac{I_{\{ph\}(\lambda)} \cdot h \cdot c}{q \cdot P_{\{opt\}(\lambda)} \cdot \lambda} \quad (\text{Eq II.10})$$

Où :

$I_{ph}(\lambda)$: courant photo-généré mesuré à la longueur d'onde λ [A]

$P_{opt}(\lambda)$: puissance optique incidente à λ [W/m²]

q : charge élémentaire (1.602×10^{-19} C)

h : constante de Planck (6.626×10^{-34} J·s)

c : vitesse de la lumière (3×10^8 m/s)

λ : longueur d'onde [m]

Le rendement quantique externe (EQE) est un paramètre fondamental permettant d'évaluer la performance spectrale d'une cellule photovoltaïque. Il représente la probabilité qu'un photon incident à une longueur d'onde donnée soit converti en électron collecté par le circuit externe. Mathématiquement, l'EQE est défini comme le rapport entre le nombre d'électrons extraits et le nombre de photons incidents. Cette grandeur dépend fortement des propriétés optoélectroniques des matériaux semi-conducteurs utilisés, ainsi que de la structure de la cellule. En mesurant l'EQE sur une large plage spectrale (généralement de 300 à 1100 nm pour les cellules au silicium), il est possible d'identifier les longueurs d'onde pour lesquelles la cellule présente des pertes de conversion, qu'elles soient dues à une absorption insuffisante, des recombinaisons internes, ou des défauts de collection de charge. L'analyse de l'EQE permet ainsi non seulement de caractériser l'efficacité de la cellule, mais aussi d'optimiser sa conception en vue d'améliorer son rendement global.

III-6. Rendement énergétique externe (he) :

Le rendement énergétique externe (he) est défini comme le rapport de la puissance maximale développée par la cellule photovoltaïque (Pmax) sur le flux énergétique lumineux incident (Fe).

$$\eta_e = \frac{P_{max}}{\emptyset_e} = \frac{FF \times I_{cc} \times V_{oc}}{\emptyset_e} \quad (\text{Eq II.11})$$

IV-l'association des cellules PV :

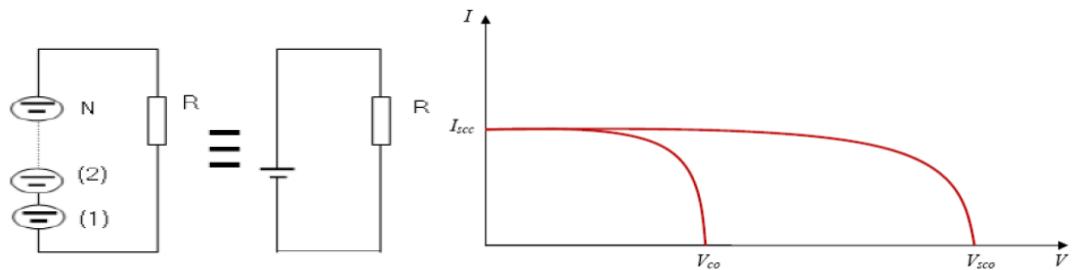
IV-1 l'association série des cellules PV :

La tension délivrée pour une cellule photovoltaïque est toujours très faible (0,3-0,7) V

Pendant au regroupement série la tension augmenter tandis que le courant qui traverses les cellules est le même

La tension de générateur photovoltaïque c'est l'addition des tensions élémentaires de chaque cellule.

$$V_{sco} = N_s \cdot V_{co} \quad (\text{Eq II.12})$$



Figure(II.4) :Groupement de N_s modules en série et leurs Caractéristiques résultantes

IV-2 l'association parallèle des cellules PV :

Le courant qui passe dans la charge celui qui circule dans chaque cellule identique.

Dans un groupement en parallèle, les modules étant soumis à la même tension, les intensités s'additionnent, la caractéristique résultant est obtenue par addition de courants à tension donnée (figureII.5).

$$I_{pcc} = N_p \cdot I_{cc} \quad (\text{Eq II.13})$$

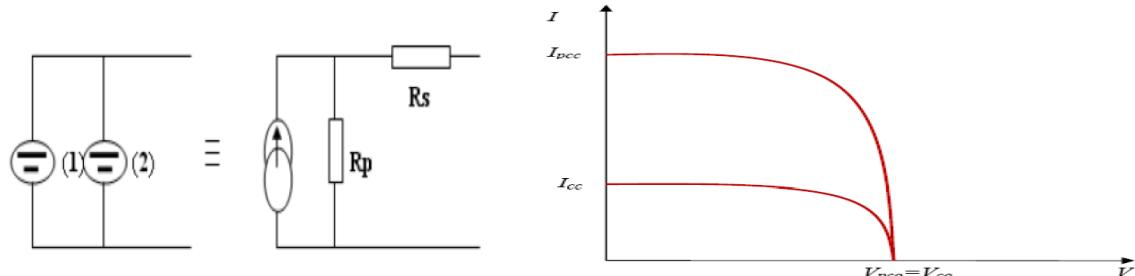


Figure (II.5) : Groupement de N_p modules en parallèle et leurs Caractéristiques résultantes

IV-3 l'association mixte (Série + Parallèle) des cellules PV :

Le générateur photovoltaïque est constitué d'un réseau série-parallèle de nombreux modules PV regroupés par panneaux PV. La caractéristique électrique globale courant/tension du GPV se déduit théoriquement de la combinaison des caractéristiques des cellules élémentaires supposées identiques qui le composent par deux affermis de rapport n_s parallèlement à l'axe de tension et de rapport n_p parallèlement à l'axe de courant, n_s et n_p étant respectivement les nombres totaux de cellules en série et parallèle.

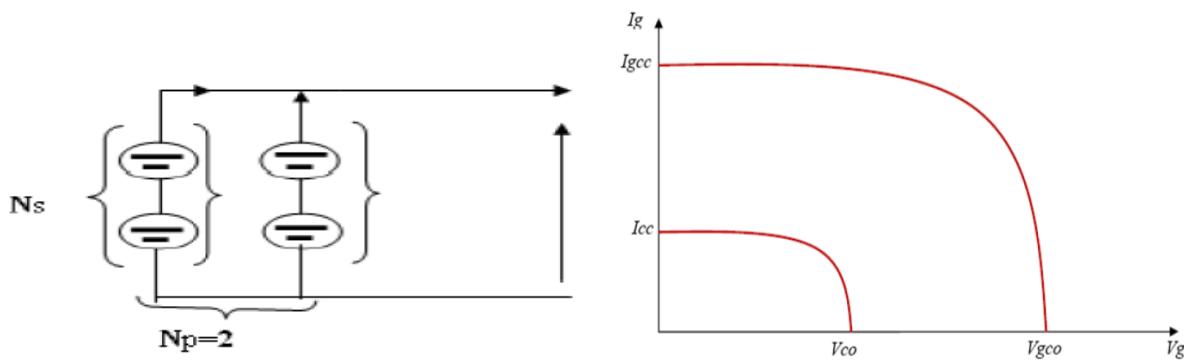


Figure (II.6) : Groupement de cellules en mixte et leurs Caractéristiques résultantes

Les générateurs photovoltaïques sont alors réalisés en vue d'augmenter la tension (groupement série) ou augmenter le courant (groupement parallèle) par l'association d'un grand nombre de cellules élémentaires de même technologie (type) et de caractéristiques identiques.

Le câblage série-parallèle est donc utilisé par obtenir un module PV (panneau PV) aux caractéristiques souhaitées (courant et tension suffisants).

Ces paramètres sont essentiels pour évaluer le comportement d'une cellule sous différentes conditions d'éclairement et de température, et pour comparer l'efficacité de technologies photovoltaïques variées. La courbe courant-tension (I-V), en particulier, constitue un outil central pour visualiser les caractéristiques électriques de la cellule et en déduire ses points de fonctionnement optimaux.

Enfin, cette caractérisation électrique constitue une étape incontournable dans le processus de conception, de validation et d'amélioration des dispositifs photovoltaïques. Elle permet non seulement d'identifier les pertes et limitations intrinsèques, mais également de guider les choix technologiques et les stratégies d'optimisation pour atteindre une meilleure performance énergétique.

V- L'influence l'éclairement, température

Les performances d'un générateur photovoltaïque sont étroitement liées aux conditions d'éclairement, à la température de fonctionnement ainsi qu'à la configuration d'association des cellules (série, parallèle ou mixte).

V-1 Influence de l'éclairement :

L'énergie électrique générée par une cellule photovoltaïque dépend directement de l'éclairement incident sur sa surface. La figure II.5 illustre l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques courant-photogénéré/tension (I_{ph} - V_p) et puissance/tension (P_v - V_p), à une température constante de 25 °C

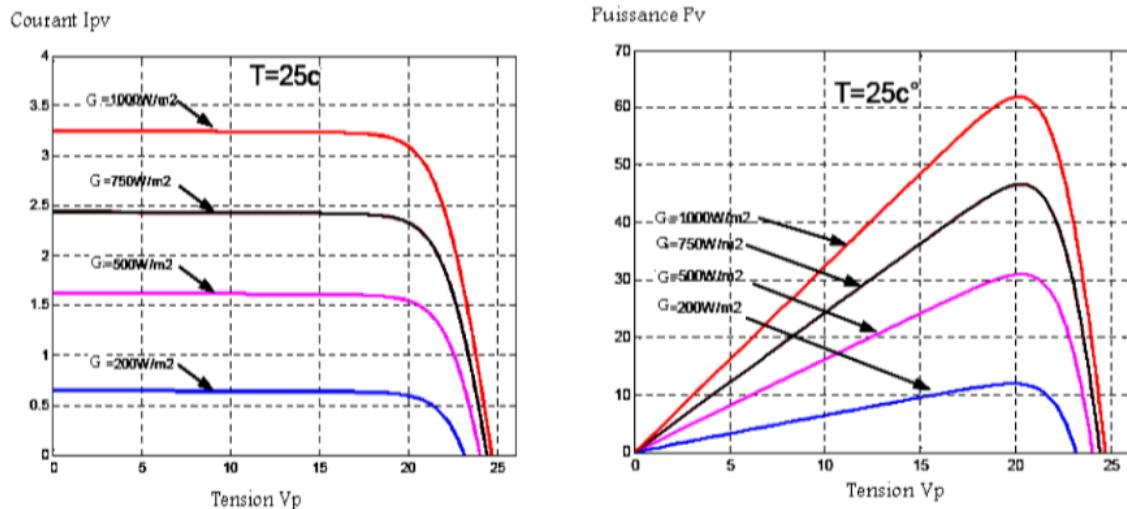


Figure (II.7) : Influence d'éclairement sur la caractéristique (I_{ph} - V_p) et (P_v - V_p) à température constante 25C

L'augmentation du flux lumineux entraîne un déplacement de la caractéristique courant-tension $I(V)$ vers des valeurs de courant plus élevées. Le courant de court-circuit (I_{cc}) croît de manière approximativement linéaire avec l'éclairement solaire (G), tandis que la tension en circuit ouvert (V_{oc}) reste relativement constante. La puissance maximale (P_m) augmente elle aussi presque proportionnellement à l'éclairement, les points de puissance maximale se trouvant globalement à une tension voisine

V-2 Influence de la température :

La température constitue un paramètre essentiel, car les cellules photovoltaïques, exposées au rayonnement solaire, subissent un échauffement. En effet, une partie du rayonnement absorbé n'est pas convertie en énergie électrique et se dissipe sous forme de chaleur. Ce phénomène entraîne une influence significative de la température sur la caractéristique courant-tension dès lors que celle-ci varie

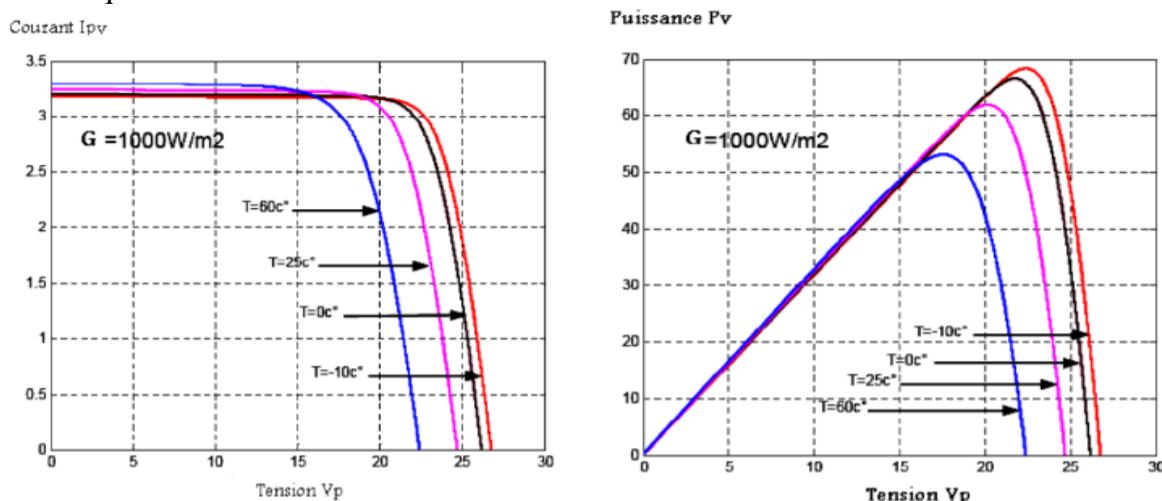


Figure (II.8) : Influence de la température sur la caractéristique (I_{ph} - V_p) et (P_p - V_p) à éclairement constant 1000 W /M 2

Le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque varie légèrement avec la température, augmentant faiblement lorsque celle-ci s'élève. En revanche, la tension en circuit ouvert (Voc) est fortement affectée de manière négative : elle diminue avec l'augmentation de la température. Par conséquent, la puissance maximale délivrée par le générateur photovoltaïque décroît lorsque la température augmente.

L'éclairement et la température sont ainsi les deux principaux paramètres influençant les caractéristiques électriques d'une cellule ou d'un générateur photovoltaïque. Leur impact doit impérativement être pris en compte lors de la conception et de l'installation d'un système photovoltaïque.

V-1 simulation :

Cas 1 : un panneau solaire

Dans ce cas on a étudié le comportement d'un panneau solaire de 300 w 36 cellules 12v sous une température stable en 25 degrés et une lumière solaire avec un rayon de 1000 w/m².

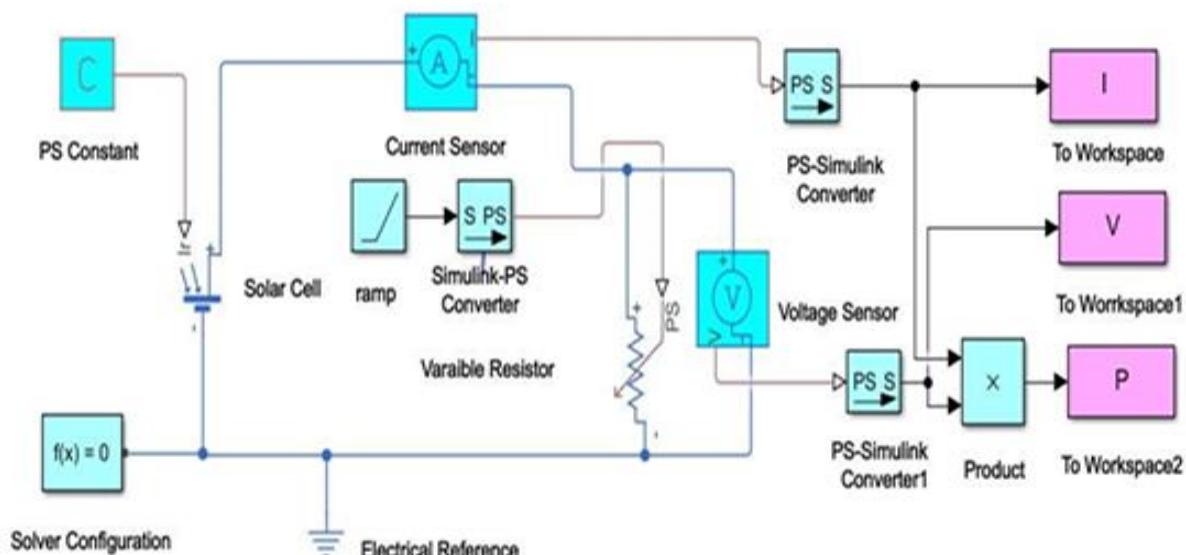
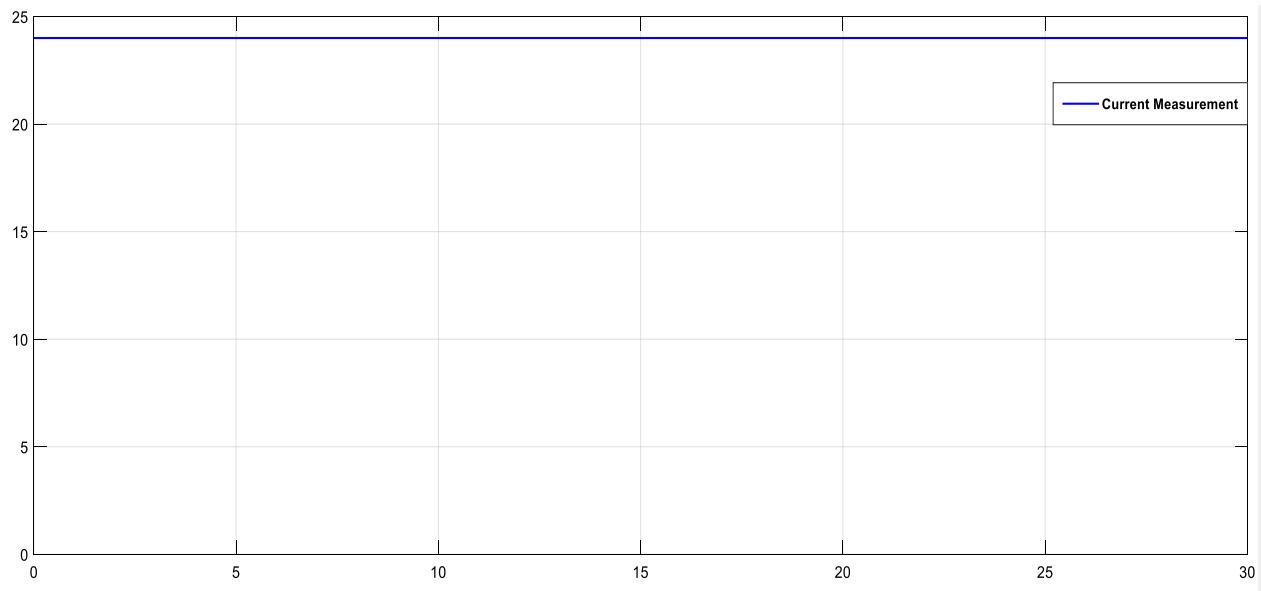
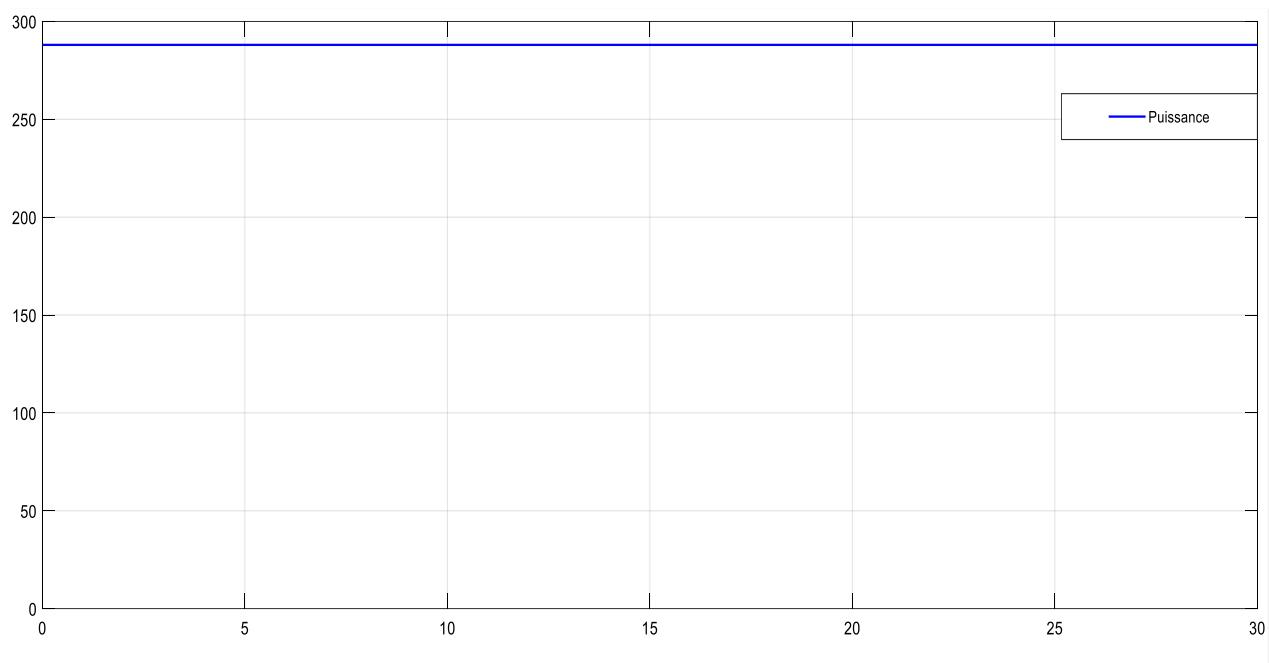


Figure II.9 Modèle Simulink d'un panneau solaire avec mesure de courant, tension et puissance

Les résultats :

**Figure II.10****Figure II.11**

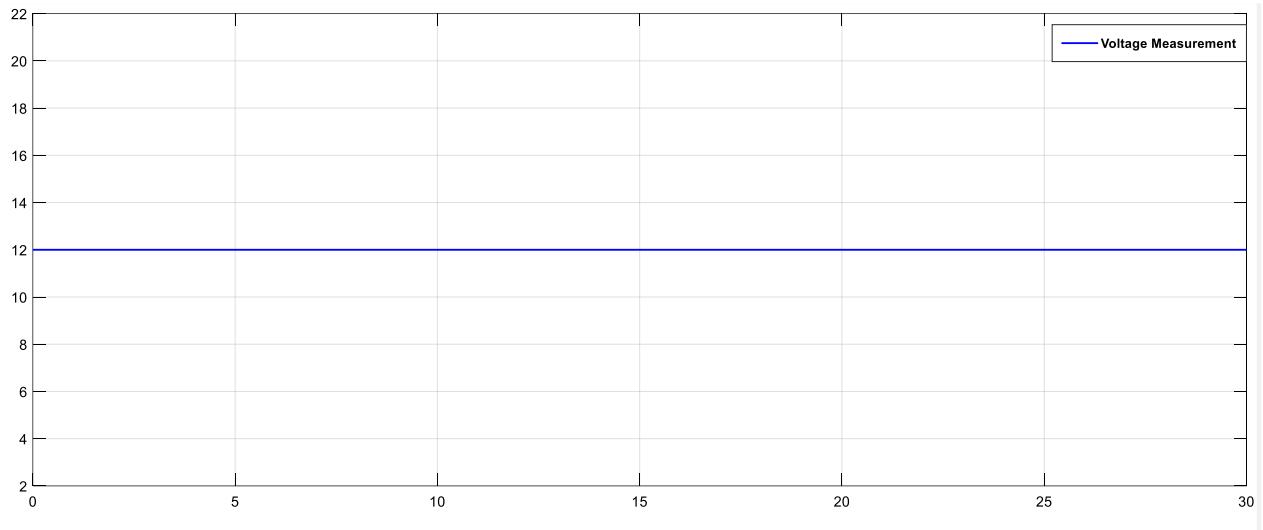


Figure II.12

Cas 2 : 4 panneau solaire en série

Dans ce cas on a étudié le comportement de 4 panneau solaire en série de 300 w 36 cellules 12v sous une température stable en 25 degrés et une lumière solaire avec un rayon de 1000 w/m².

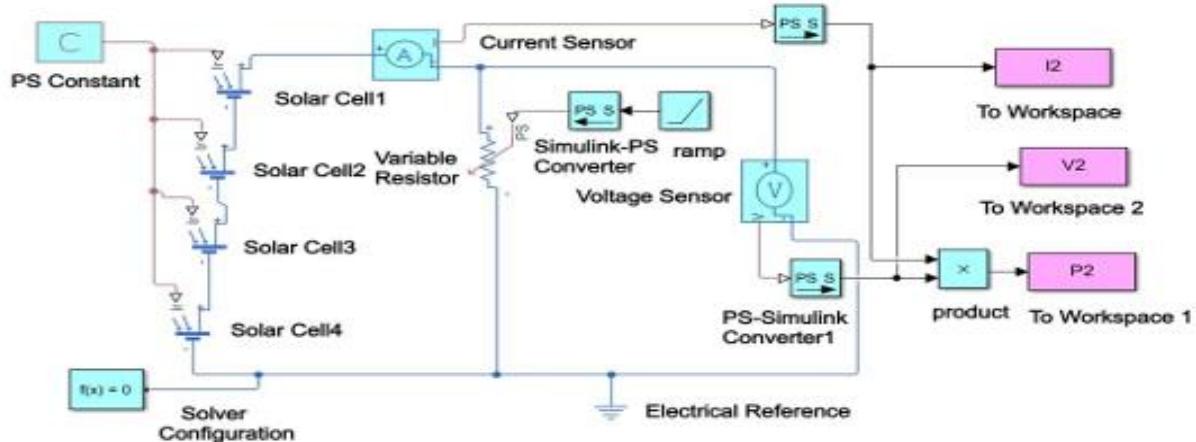
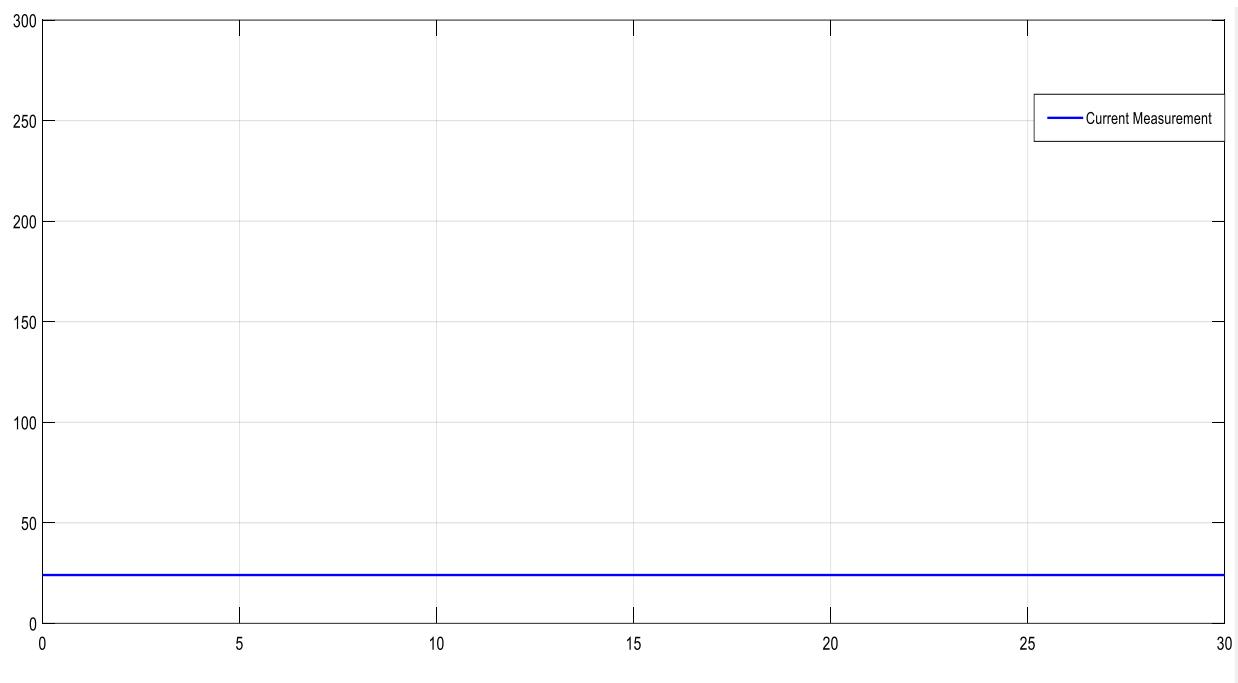
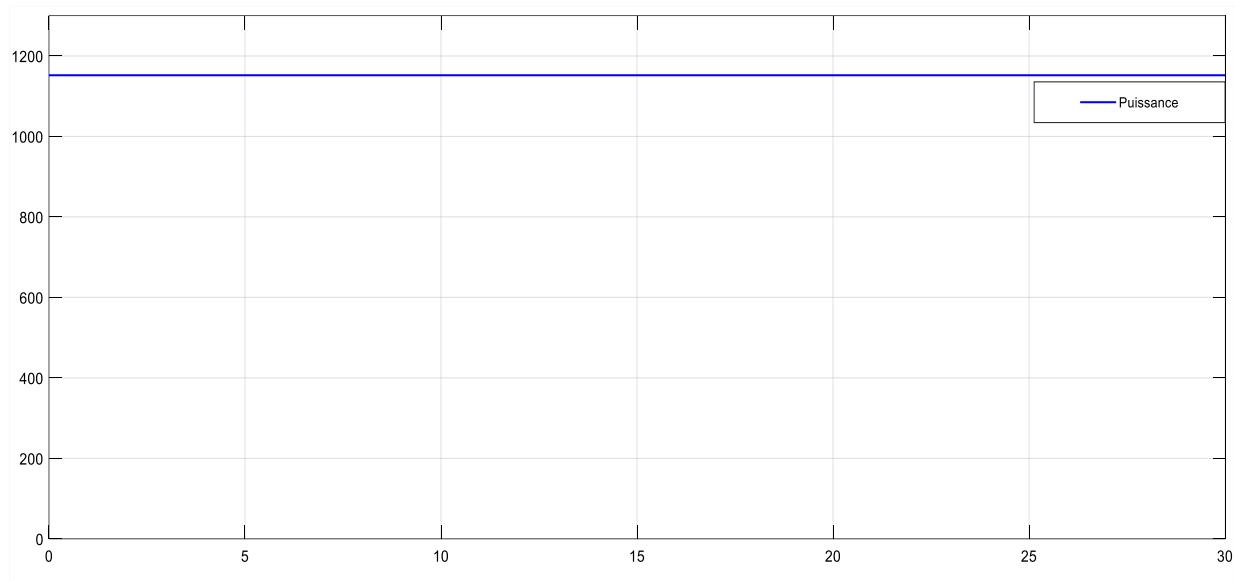


Figure II.13 Modèle Simulink d'un 4 panneau solaire en série

Les résultats :

**Figure II.14****Figure II.15**

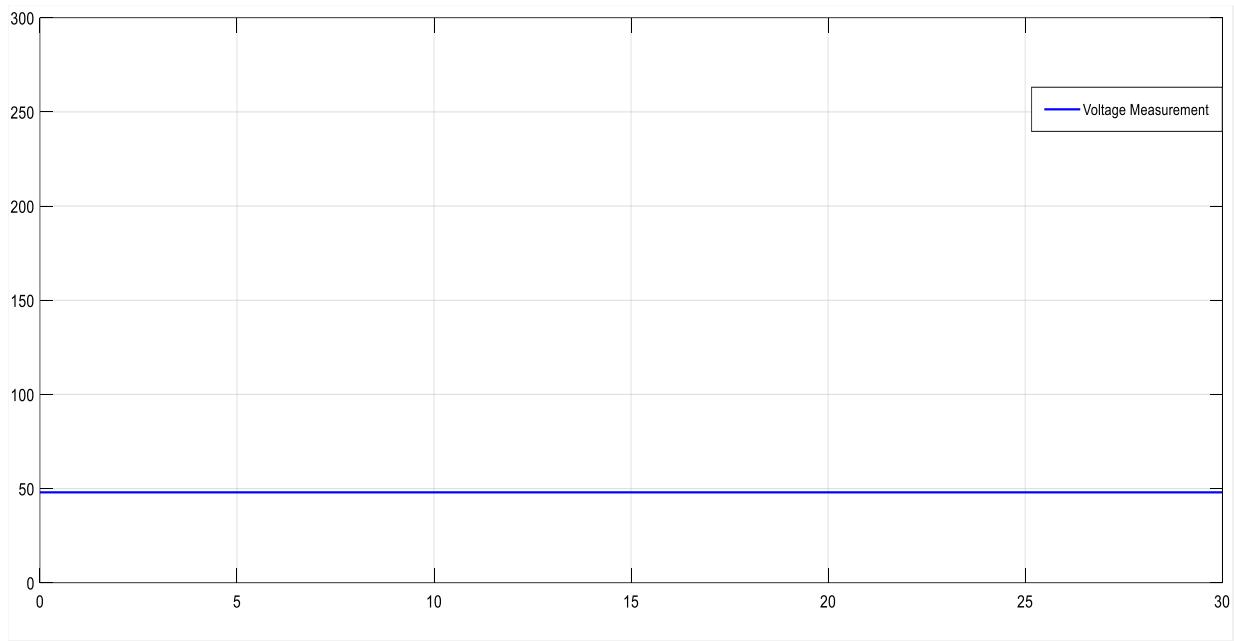


Figure II.16

Cas 3 : 4 panneau solaire en parallèle

Dans ce cas on a étudié le comportement de 4 panneau solaire en parallèle de 300 w 36 cellules 12v sous une température stable en 25 degrés et une lumière solaire avec un rayon de 1000 w/m².

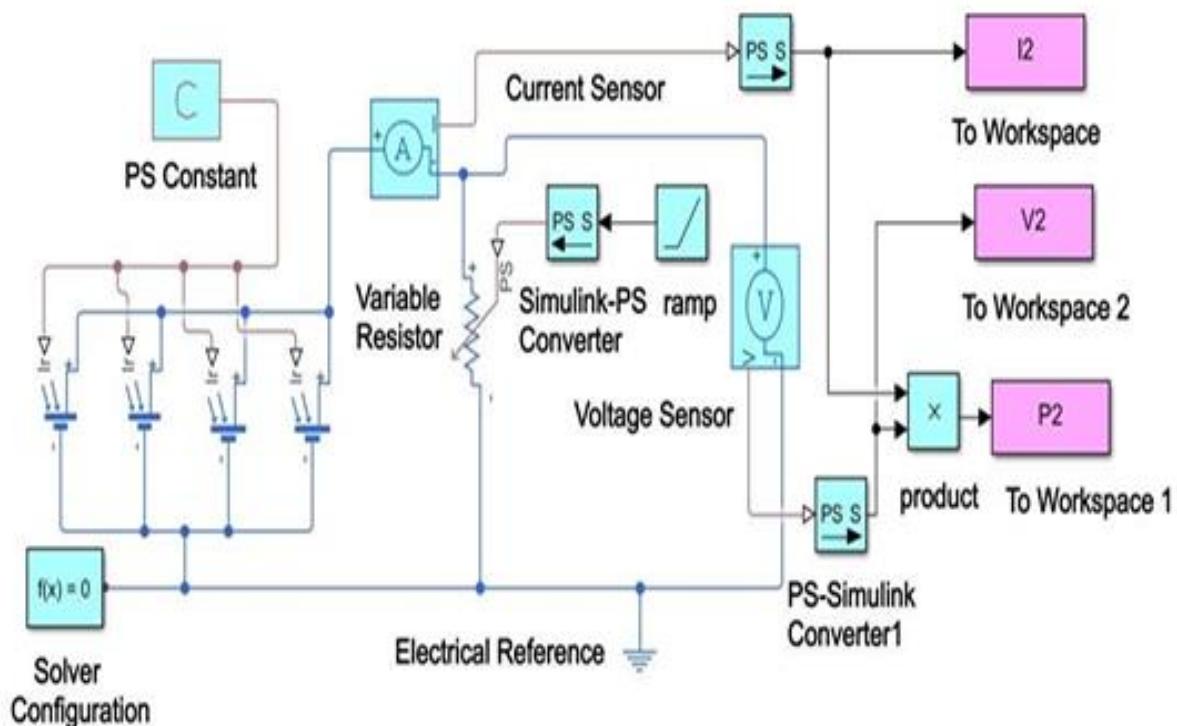


Figure II.17 Modèle Simulink d'un 4 panneau solaire en parallèle

Les résultats :

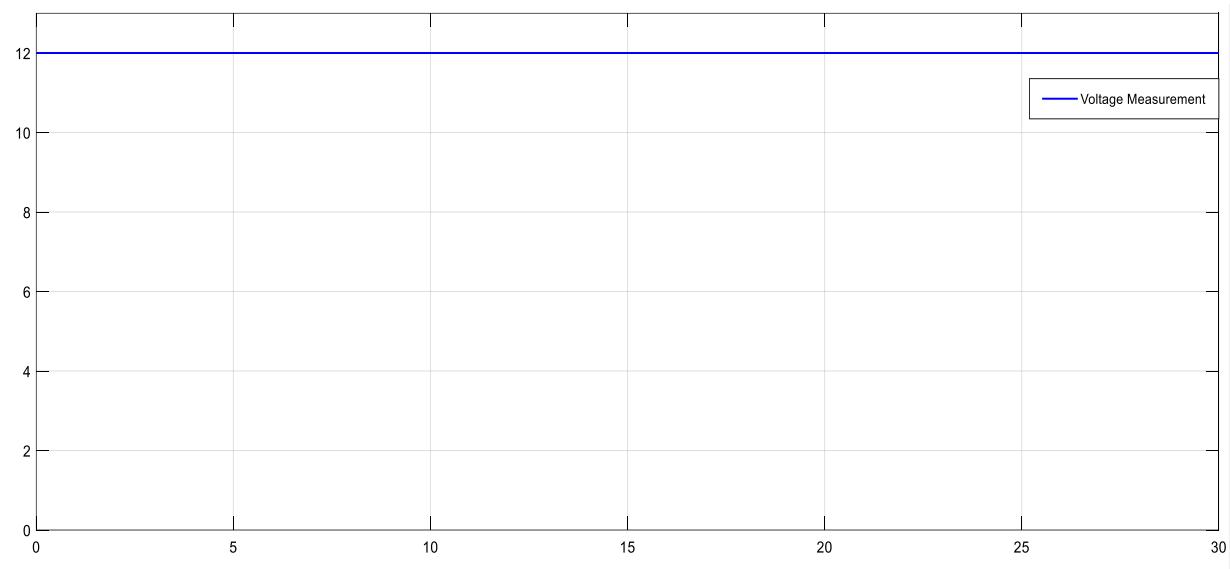
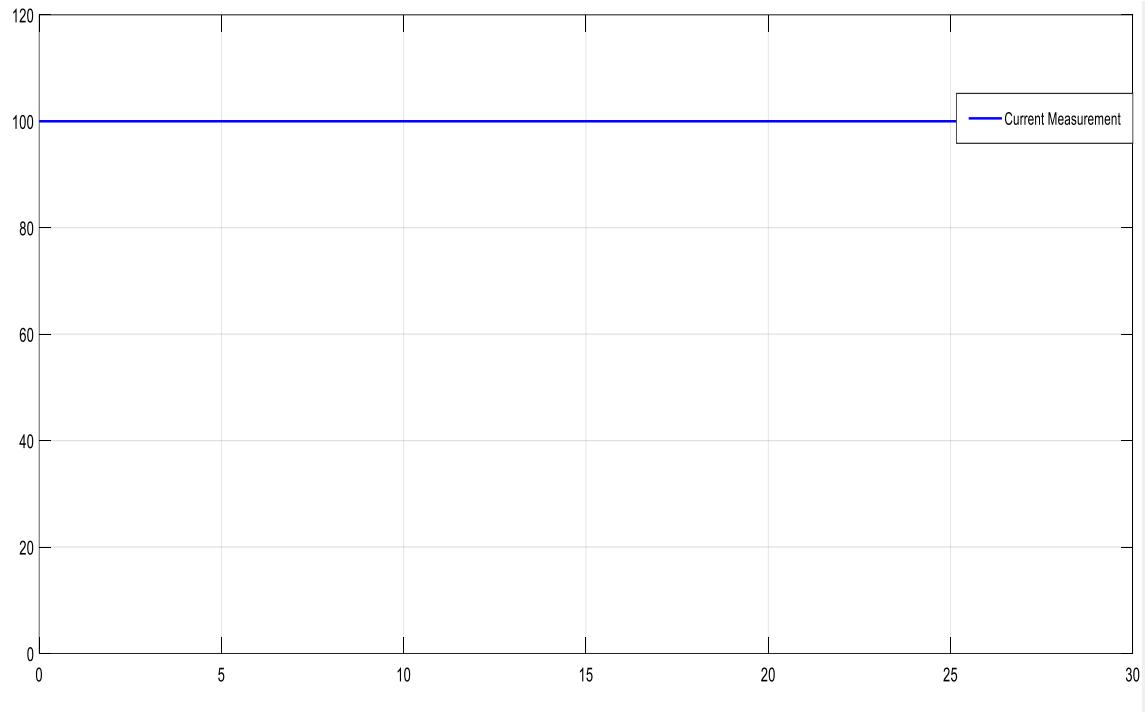
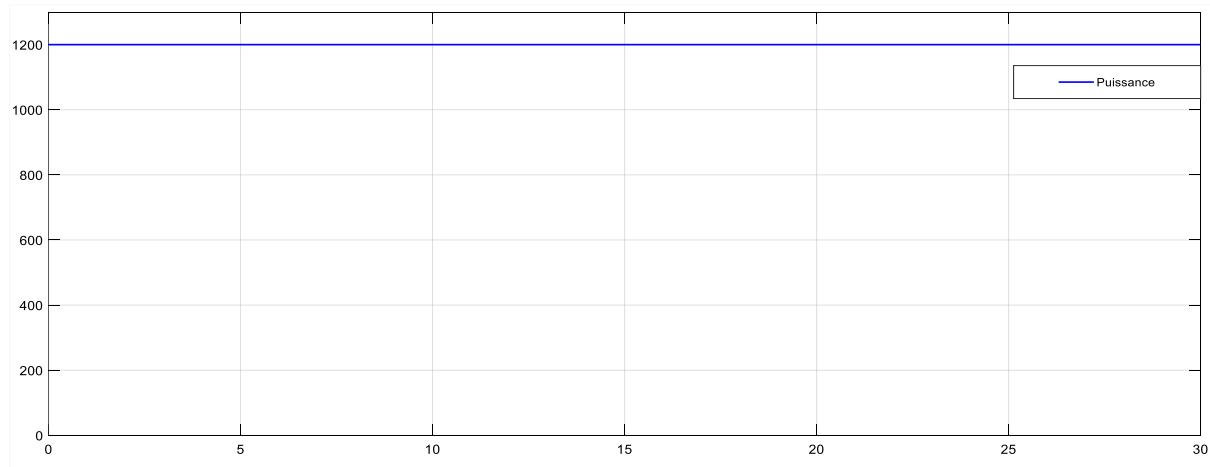


Figure II.18

**Figure II.19****Figure II.20**

Cas 4 : 4 panneau solaire en série + 4 panneaux solaire en parallèle

Dans ce cas on a étudié le comportement de 4 panneau solaire en série de 300 w 36 cellules 12v + 4 en parallèle sous une température stable en 25 degrés et une lumière solaire avec un rayon de 1000 w/m²

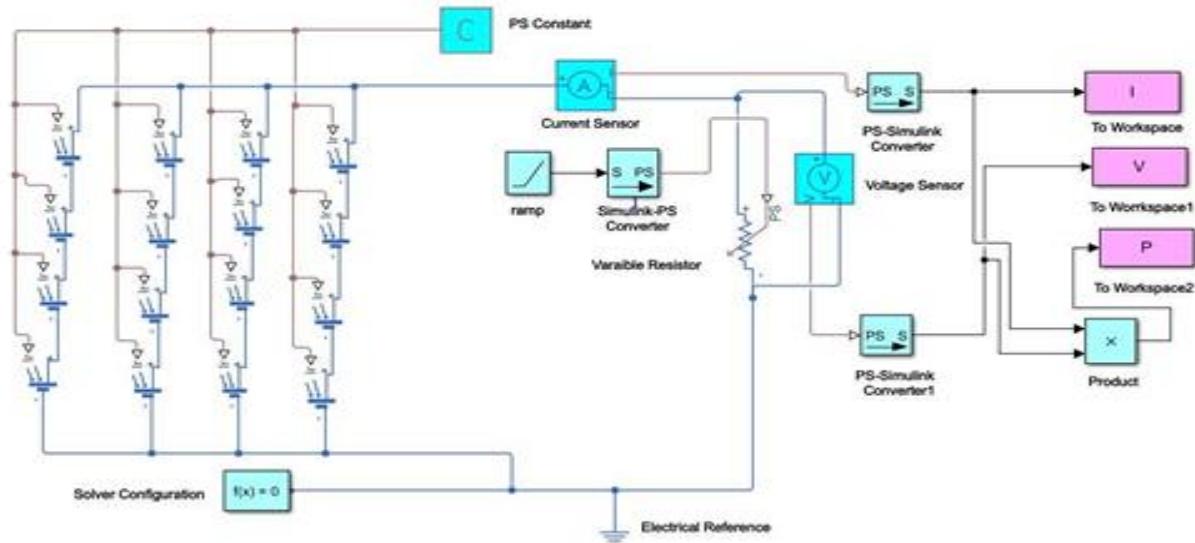


Figure II.21 Modèle Simulink 4 panneau solaire en série + 4 panneaux solaire en parallèle

Les résultats :

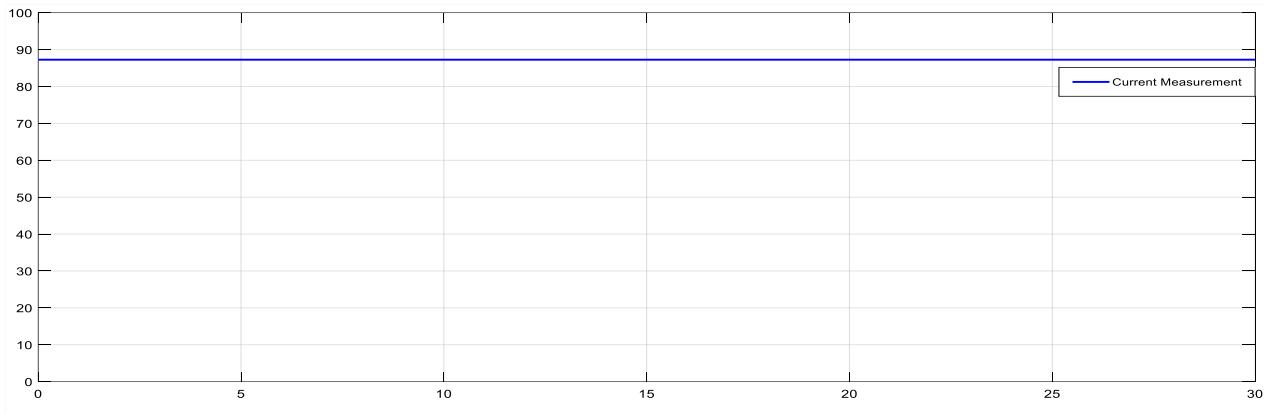
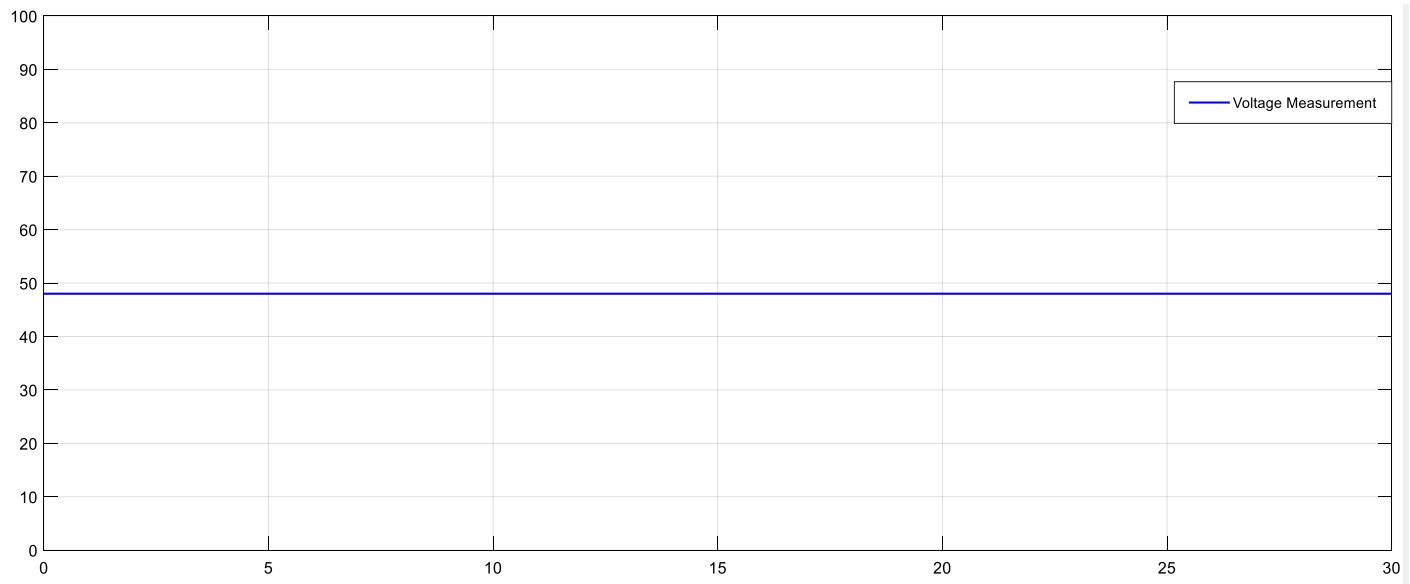
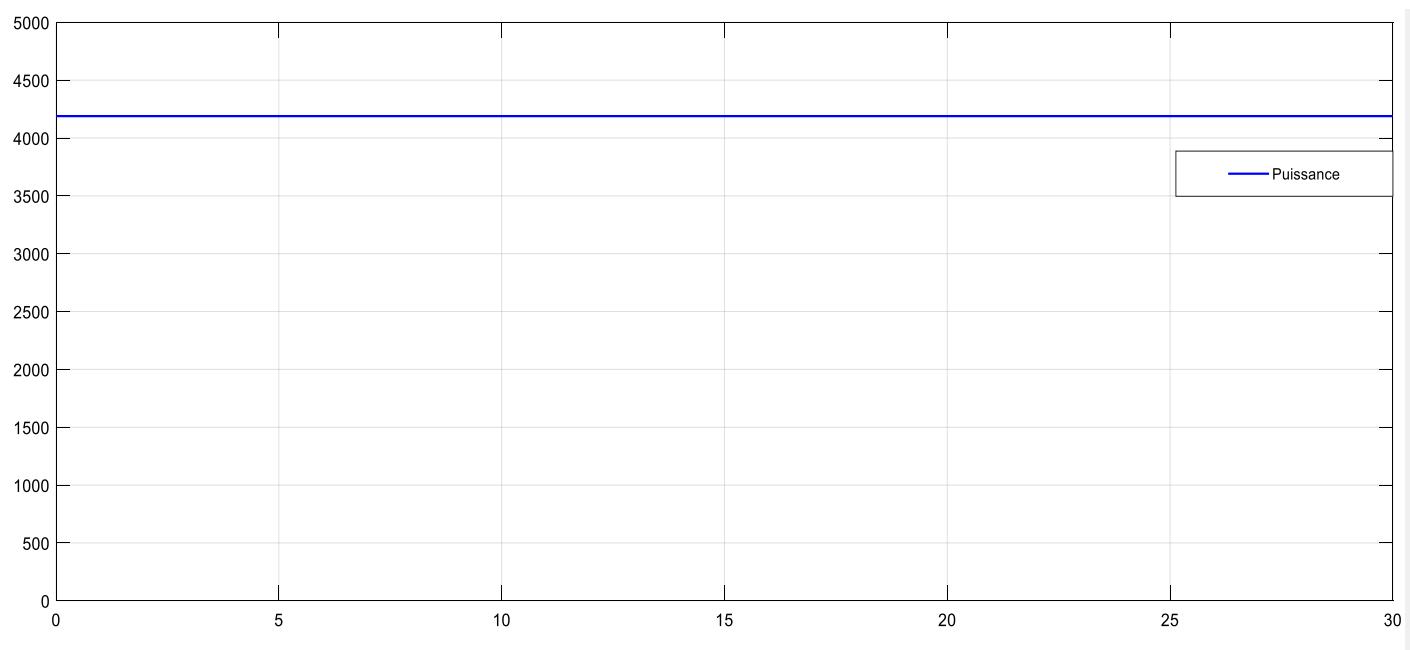


Figure II.22

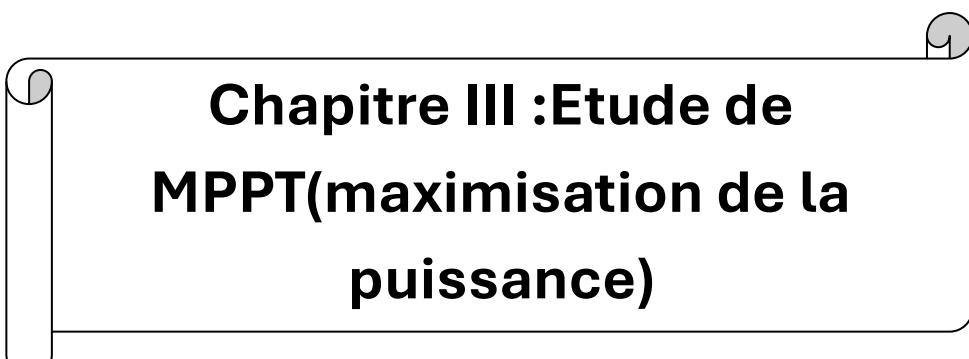
**Figure II.23****Figure II.24**

En conclusion et d'après les résultats de la simulation on peut distinguer que :

1. Le branchement des panneaux solaire en parallèle influe seulement l'intensité par la faire augmenter.
2. Le branchement des panneaux solaire en série influe seulement le voltage par le faire augmenter.
3. Le branchement en parallèle+serie influe le voltage et l'intensité par les faire augmenter

Conclusion :

Ce second chapitre a permis d'approfondir la compréhension des mécanismes fondamentaux intervenant dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques, en particulier ceux liés à l'absorption des photons, la génération et la dissociation des excitons, ainsi que le transport et la collecte des porteurs de charge. L'étude des caractéristiques courant-tension (I-V) a permis d'identifier les paramètres critiques influençant les performances des dispositifs photovoltaïques. Par ailleurs, l'analyse comparative des différentes configurations d'association de panneaux solaires (série, parallèle, mixte) a démontré l'importance de l'architecture du système dans l'optimisation de la puissance délivrée. Ces éléments constituent un socle indispensable à la conception de systèmes photovoltaïques efficaces et adaptés aux conditions d'utilisation, et ouvrent la voie à des optimisations futures sur le plan matériel et énergétique.



**Chapitre III :Etude de
MPPT(maximisation de la
puissance)**

III.1 Introduction :

Les systèmes photovoltaïques (PV) convertissent l'énergie solaire en électricité de manière directe. Cependant, l'efficacité de cette conversion dépend fortement des conditions environnementales (ensoleillement, température, etc.) et du point de fonctionnement du système. Pour maximiser la production d'énergie, il est nécessaire de faire fonctionner le panneau solaire à son point de puissance maximale (Maximum Power Point - MPP). C'est dans ce contexte que s'inscrit l'utilisation de techniques MPPT (Maximum Power Point Tracking), qui permettent d'optimiser la puissance extraite des panneaux photovoltaïques.

III.2 Principe De La Commande MPPT :

Le MPP est le point sur la courbe courant-tension (I-V) d'un module PV où le produit $P=V \times I$ est maximal. Ce point varie constamment en fonction des conditions d'ensoleillement et de température. Le rôle du MPPT est de suivre en temps réel ce point de puissance maximale et d'ajuster le point de fonctionnement du convertisseur DC/DC associé pour y rester. La chaîne de conversion photovoltaïque sera optimisée à travers un convertisseur statique (CS) commandé par une MPPT [20]. Il peut être représenté par le schéma de la Figure III.1

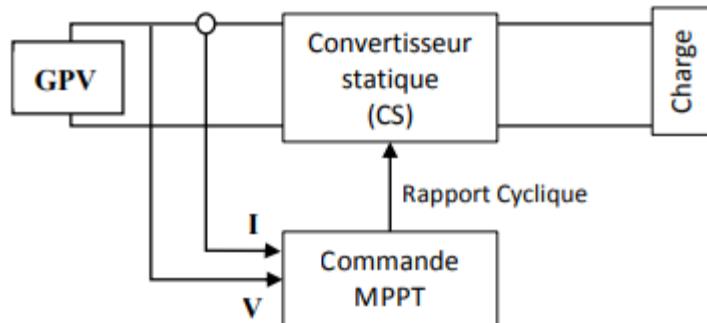


Figure III.1 Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge.

Le suivi du point de puissance maximale (MPPT) est réalisé en agissant sur le rapport cyclique du convertisseur statique, via un signal de commande approprié. Cette modulation permet d'ajuster dynamiquement le point de fonctionnement du générateur photovoltaïque (GPV), afin d'en extraire la puissance maximale. L'algorithme MPPT, dont la complexité dépend de la méthode adoptée, repose généralement sur l'analyse des variations de la tension et du courant en entrée du convertisseur, ce qui permet d'évaluer la puissance instantanée et de guider la recherche du MPPT [21].

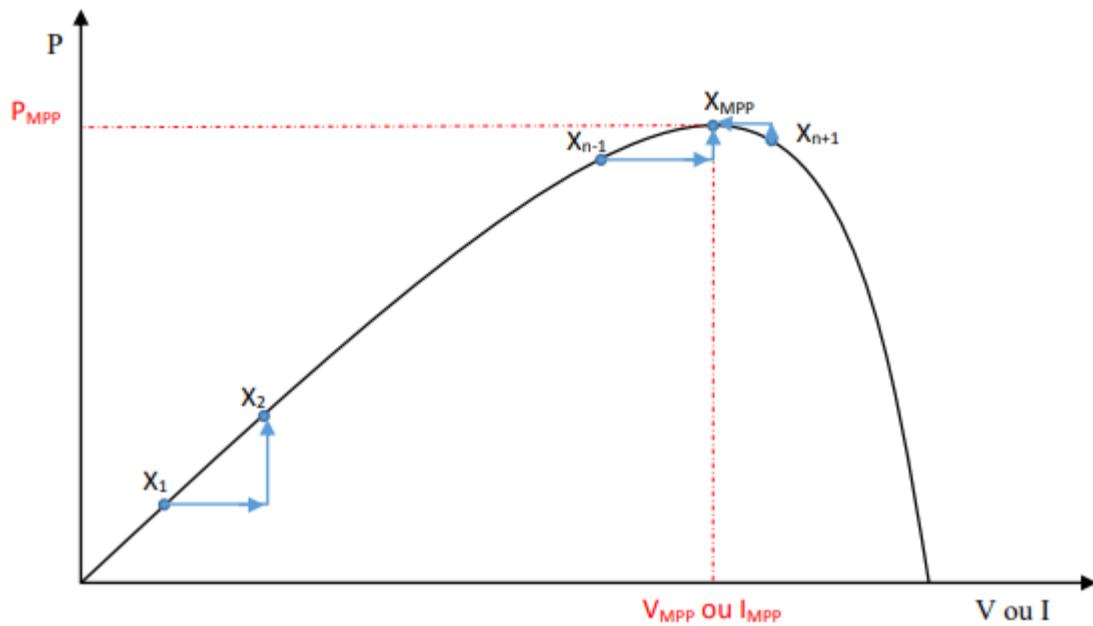


Figure III.2 Principe de la commande MPPT

III.3.1 Simulation du système photovoltaïque

La Figure III.3 donne le schéma block de notre système photovoltaïque étudié avec l'ensemble des étages simulés: GPV, DC-DC et MPPT.

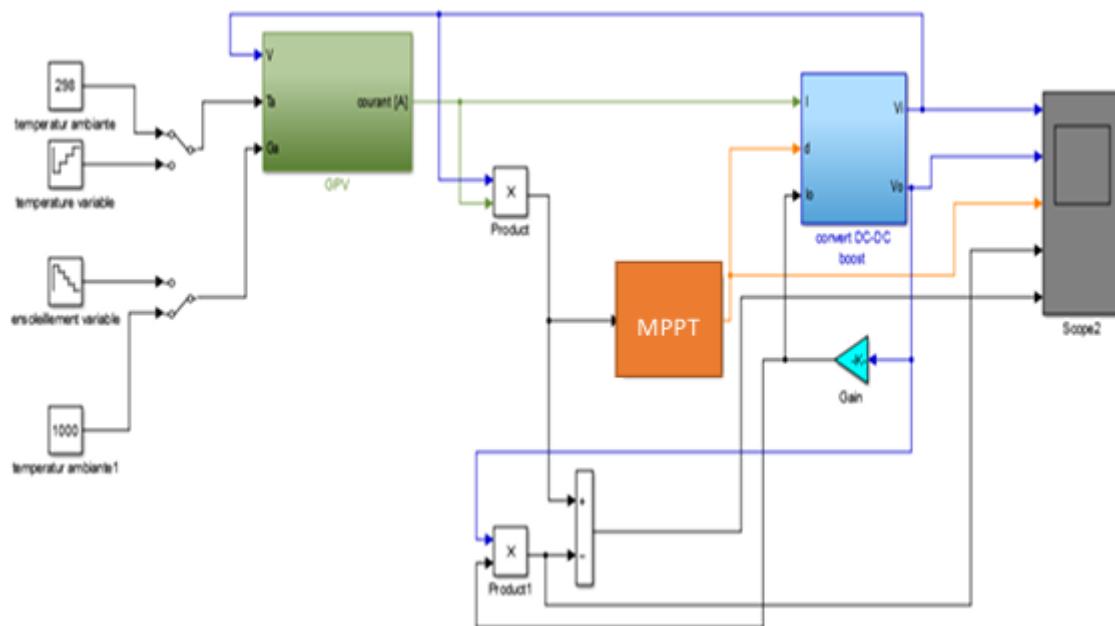


Figure III.3 Schéma bloc sous Simulink du système global

III.3.2 Simulation d'un GPV

Pour simuler le comportement du générateur photovoltaïque (GPV), nous avons utilisé le logiciel Matlab/Simulink, en nous appuyant sur le modèle mathématique présenté au chapitre II. L'implémentation de ce modèle sous Simulink est illustrée à la figure III.4

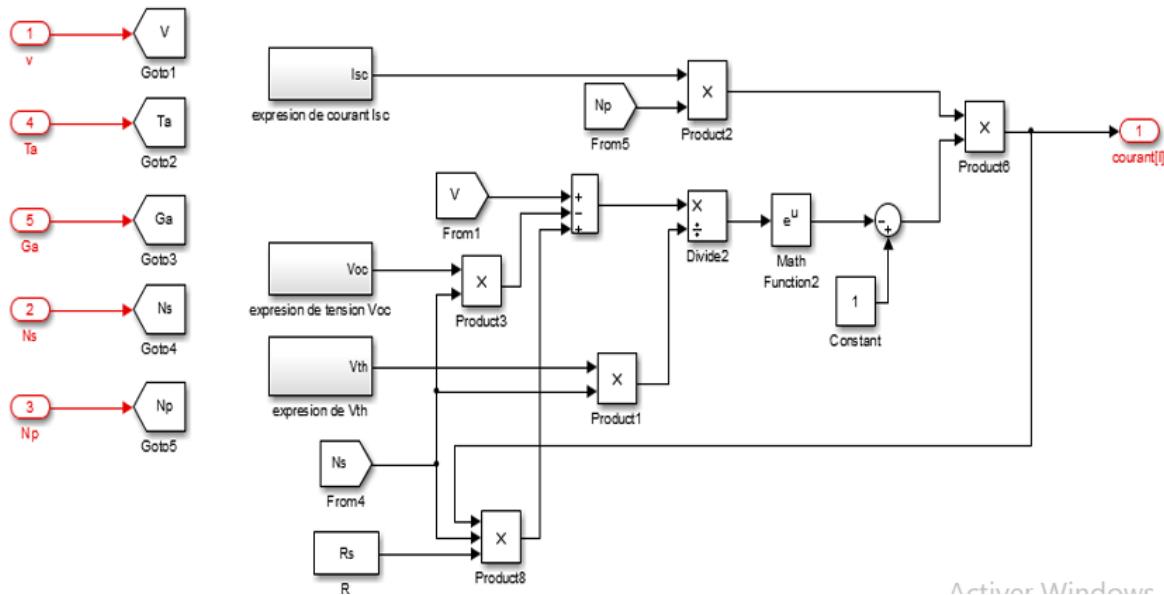


Figure.III.4 Modèle de simulation du GPV

III.4 Convertisseur DC/DC :

Les convertisseurs DC/DC sont utilisés pour transformer une tension continue non régulée à l'entrée en une tension continue régulée à la sortie, en fonction des exigences du système. Ils sont généralement constitués de composants passifs (condensateurs et inductances) et de dispositifs de commutation. Dans des conditions idéales, ces éléments ne consomment pas de puissance active, ce qui explique le rendement élevé de ces convertisseurs.

Le commutateur, souvent un transistor MOSFET, fonctionne en mode binaire (état bloqué ou saturé). Lorsqu'il est bloqué, le courant qui le traverse est nul, ce qui implique une dissipation de puissance négligeable. À l'inverse, lorsqu'il est saturé, la chute de tension à ses bornes est très faible, entraînant des pertes de puissance minimales.

La régulation de la tension de sortie est obtenue en agissant sur le rapport cyclique du signal de commande appliqué au commutateur. Ainsi, l'ensemble de la conversion d'énergie s'effectue principalement à travers les éléments de stockage (inductances et condensateurs) et les composants de commutation.

III.4.1 Convertisseur abaisseur (Buck) :

Le convertisseur DC/DC joue un rôle essentiel dans l'adaptation du point de fonctionnement du panneau photovoltaïque à la charge. Lorsque la tension de sortie requise est inférieure à la tension nominale de fonctionnement du générateur PV, un convertisseur abaisseur (de type

Buck) est généralement utilisé. Dans ce cas, la tension en entrée du convertisseur peut être exprimée comme suit :

$$V_i = \frac{V_s}{D} \quad (\text{Eq III.1})$$

Où : V_i : la tension d'entrée.

V_s : la tension de sortie.

D : le rapport cyclique du convertisseur.

Principe de fonctionnement

Le convertisseur abaisseur (Buck) fonctionne à l'aide d'un interrupteur K (ou commutateur) commandé, sans isolation galvanique entre la source d'entrée et la sortie (voir Figure III.3). Son mode de fonctionnement peut être décomposé en deux phases distinctes, correspondant aux deux états du commutateur.

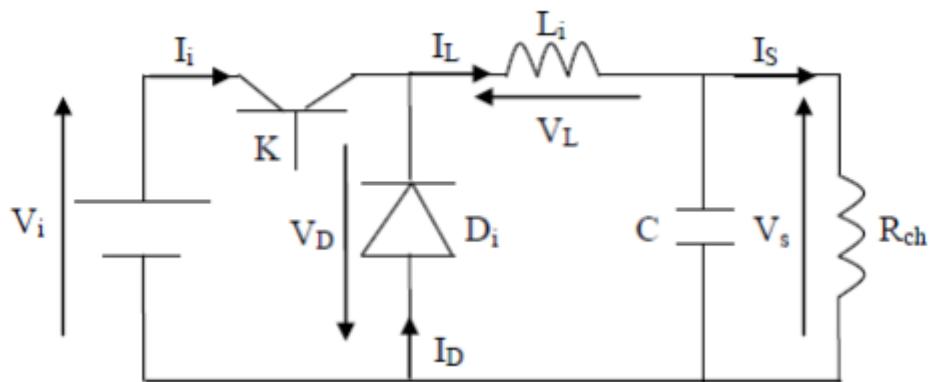


Figure III.5– Schéma de base d'un convertisseur Buck.

• l'état passant

Dans l'état passant, l'interrupteur K est fermé (Figure III.4), la tension aux bornes de l'inductance vaut

$$V_L = V_i - V_s \quad (\text{III-2})$$

Le courant I_L n'augmente pas instantanément, mais plutôt linéairement avec un taux d'accroissement imposé par l'inductance L_i .

• l'état bloqué

Dans l'état bloqué, l'interrupteur K est ouvert (Figure III.5), la diode devient passante afin d'assurer la continuité du courant dans l'inductance. La tension de sortie est :

$$V_s = -V_L \quad (\text{III-3})$$

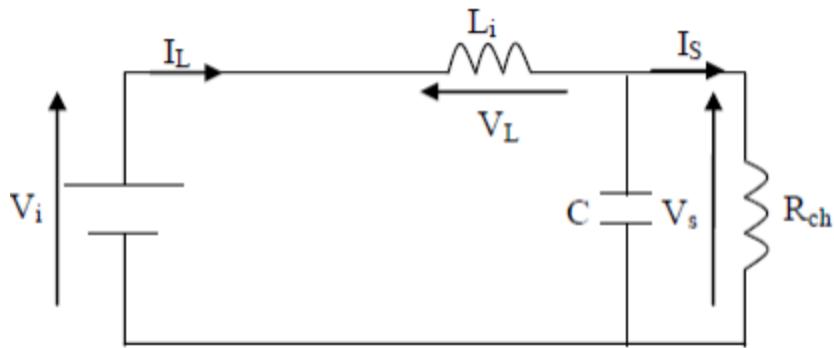


Figure III.6– Convertisseur Buck à l'état passant

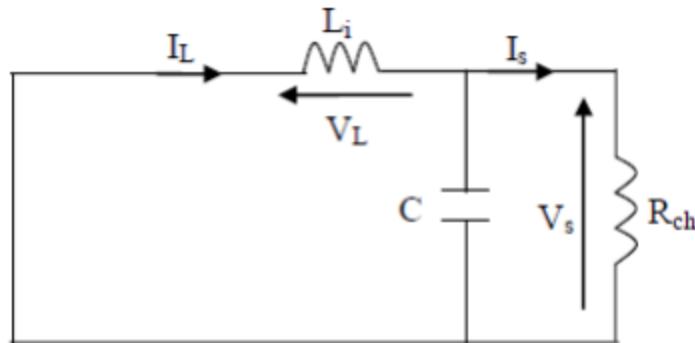


Figure III.7– Schéma du Boost (S fermé)

III.4.2 Convertisseur élévateur (Boost) :

Le schéma présenté à la figure III.8 illustre le circuit d'un convertisseur Boost. Ce type de convertisseur est couramment utilisé dans les systèmes alimentés par batterie lorsqu'une élévation de la tension d'alimentation est nécessaire [22]. Il permet notamment de simplifier l'architecture du système en réduisant le nombre de composants requis pour atteindre la tension souhaitée. Le rapport entre la tension d'entrée et la tension de sortie de ce convertisseur est donné par la relation suivante :

$$V_s = \frac{V_i}{1-D} \quad (\text{III-4})$$

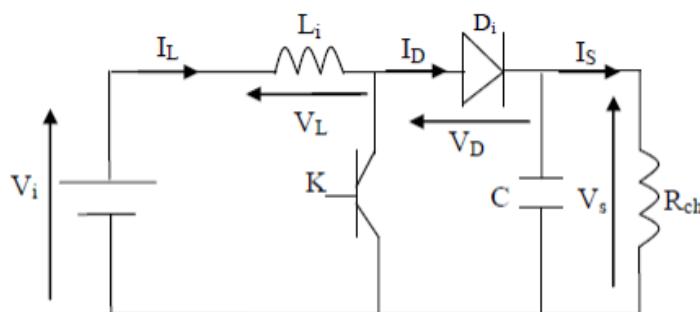


Figure III.8 – Schémas de base d'un convertisseur Boost

Principe de fonctionnement

Alimenté par une source de tension V_i le fonctionnement du convertisseur Boost peut être analysé en deux phases distinctes, en fonction de l'état de l'interrupteur K

- l'état passant

Lorsque l'interrupteur est fermé ($0 < t < DT$) (Figure III.9), le courant dans l'inductance augmente et l'énergie est emmagasinée sous forme d'énergie magnétique. La diode Di est alors bloquée et la charge est, par conséquent déconnectée de l'alimentation.

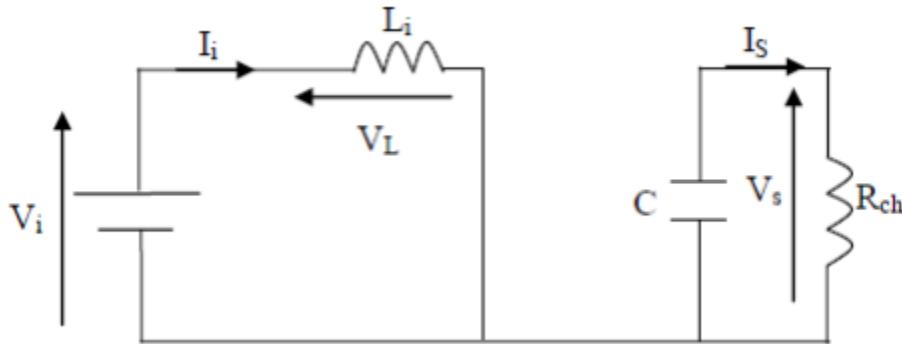


Figure III.9– Schéma du Boost (S fermé).Schéma du Boost (S fermé).

- l'état bloqué

A l'instant $t = DT$, l'interrupteur K s'ouvre (figure III.10), la f.e.m. de l'inductance s'additionne à celle du générateur, conséquence du placement en série de l'inductance avec le générateur (effet élévateur de tension). La diode est alors passante, le courant traverse l'inductance, le condensateur et la charge. Il en résulte un transfert vers la capacité de l'énergie accumulé.

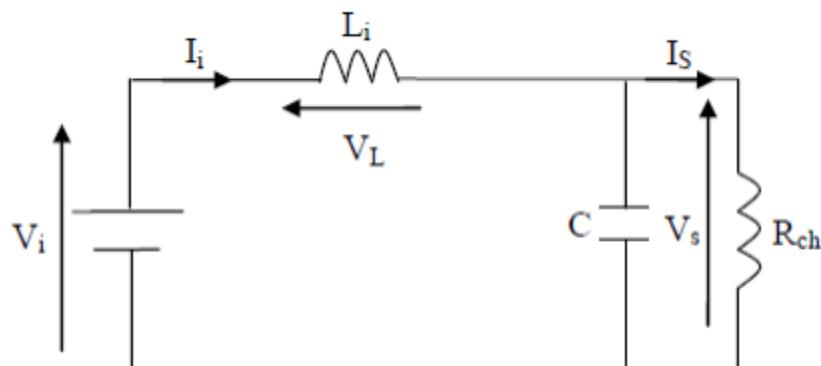


Figure III.10– Schéma du Boost (K ouvert)

III.5 Simulation du convertisseur Boost

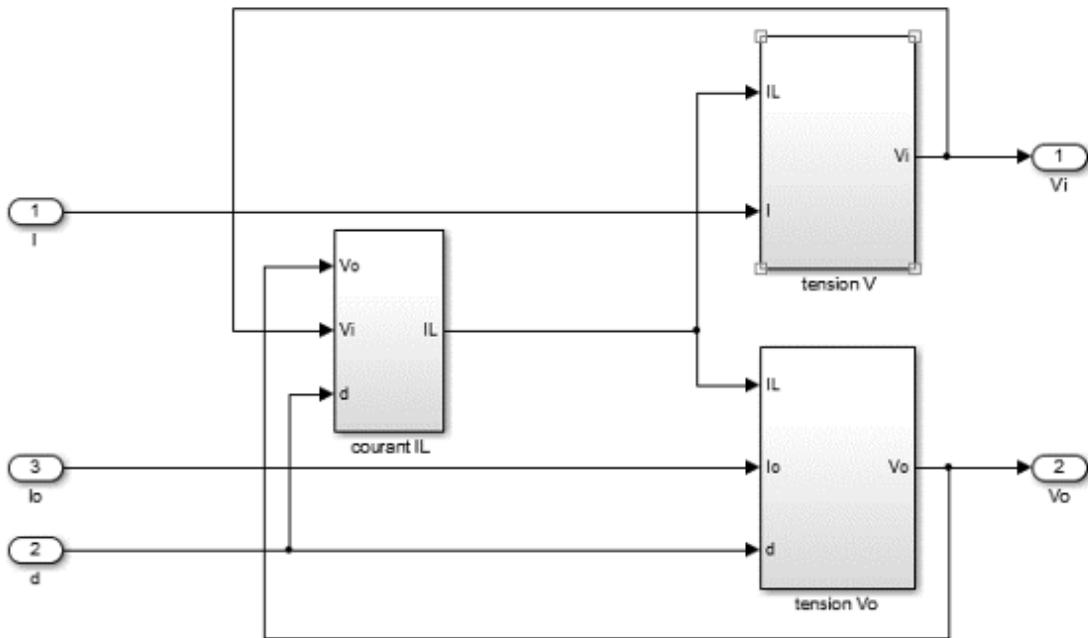


Figure.III.11 Modèle de simulation du CS BOOST

C1	C2	L
560e-6 F	560e-6 F	350e-6 H

Tableau III.1 Paramètres du convertisseur DC-DC boost.

III.6 Classification Des Commandes MPPT :

De manière générale, les commandes MPPT peuvent être classées en fonction de leur mode d'implémentation électronique : analogique, numérique ou hybride. Toutefois, il est souvent plus pertinent de les regrouper en fonction de la méthode de recherche utilisée et des paramètres d'entrée pris en compte par l'algorithme MPPT [23].

III.7.1 Classification Des Commandes MPPT Selon Les Paramètres D'entrée.

A) Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée du CS

Il existe plusieurs types de commandes MPPT qui recherchent le point de puissance maximale (PPM) en se basant sur l'évolution de la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque (GPV). Parmi elles, on trouve des méthodes comme Perturb and Observe ainsi que les algorithmes d'incrément de conductance, qui utilisent directement la puissance fournie par le GPV pour appliquer une action de contrôle adaptée au suivi du PPM. D'autres approches

reposent sur des relations de proportionnalité entre les paramètres optimaux tension et courant au point de puissance maximale(VOPT et IOPT) et les paramètres caractéristiques du module photovoltaïque (tension en circuit ouvert VOC et courant de court-circuit ICC). C'est notamment le cas des commandes MPPT basées sur des réseaux de neurones. Ces dernières peuvent s'appuyer soit sur des systèmes à mémoire importante contenant un grand nombre de cas pré-enregistrés, soit sur des approches approximatives. L'ensemble de ces méthodes se distingue par leur précision et leur rapidité de réaction [24].

B) Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie du convertisseur

La littérature recense également des algorithmes MPPT fondés sur les paramètres de sortie du convertisseur statique (CS). Par exemple, certaines commandes visent à maximiser le courant de sortie, une approche particulièrement adaptée lorsque la charge est une batterie. Dans ce type de système, la puissance maximale (Pmax) est généralement estimée à partir du rendement du convertisseur. Ainsi, plus l'étage de conversion est performant, plus cette estimation est fiable. Toutefois, les systèmes reposant sur un seul capteur présentent en général une précision limitée. Il est à noter que la majorité de ces systèmes ont été initialement développés pour des applications spatiales [25].

III.7.2 Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche

a. MPPT Direct

Ce type de commande MPPT détermine le point de puissance maximale (MPP) à partir des grandeurs mesurées dans le système, telles que les courants, tensions ou puissances. Il est ainsi capable de réagir efficacement à des variations imprévues du fonctionnement du générateur photovoltaïque (GPV). Ces techniques reposent généralement sur des algorithmes de recherche permettant d'identifier le maximum de la courbe de puissance sans interrompre le fonctionnement du système. Le principe consiste à incrémenter la tension de fonctionnement à intervalles réguliers : si la puissance augmente, la direction de recherche est conservée pour l'itération suivante ; dans le cas contraire, elle est inversée. Le point de fonctionnement oscille alors autour du MPP.

Ce principe de base peut être adapté par d'autres algorithmes afin de corriger d'éventuelles erreurs d'interprétation, notamment lorsque la puissance augmente de manière soudaine en raison d'une brusque élévation du niveau d'irradiation, ce qui pourrait fausser la direction de recherche.

La détermination de la puissance instantanée du générateur PV, essentielle à cette recherche, nécessite la mesure simultanée de la tension et du courant, suivie de leur multiplication. Par ailleurs, certains algorithmes introduisent des variations sinusoïdales de faible amplitude sur la fréquence de découpage du convertisseur, dans le but d'analyser les composantes continue et alternative de la tension du GPV. Cela permet de positionner le point de fonctionnement au plus proche du MPP.

Ces méthodes présentent l'avantage d'une grande précision et d'une réactivité élevée.

b. MPPT Indirect

Ce type de commande MPPT exploite la relation existante entre certaines variables facilement mesurables, comme le courant de court-circuit (ISC) ou la tension en circuit ouvert (VOC), et la position approximative du point de puissance maximale (MPP). On y retrouve également les techniques reposant sur l'estimation du point de fonctionnement du générateur photovoltaïque (GPV) à partir d'un modèle paramétrique prédéfini. D'autres approches se basent uniquement sur les variations de température des cellules, mesurées par un capteur, pour ajuster la tension de fonctionnement vers une valeur optimale.

Ces commandes se distinguent par leur simplicité de mise en œuvre. Elles conviennent particulièrement aux systèmes à faible coût et à précision modérée, destinés à fonctionner dans des régions où les conditions climatiques varient.

III.8 Les Algorithmes MPPT

Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT, dont les performances varient selon les propriétés exploitées du générateur photovoltaïque (GPV). La synthèse des principales méthodes de recherche du point de puissance maximale (PPM), présentée dans ce chapitre, nous a permis d'identifier les approches existantes ainsi que les axes d'amélioration potentiels. Cette analyse a constitué la base théorique de nos travaux de simulation développés dans le chapitre suivant.

III.8.1 Approche de la Tension Constante (CV, Constant Voltage)

La méthode de la tension constante, également connue sous le nom de méthode de la tension en circuit ouvert (*open circuit voltage*), repose sur la mesure en temps réel de la tension de circuit ouvert (VOC) ainsi que sur la relation linéaire approximative (équation III-4) qui lie cette tension à la tension au point de puissance maximale (VMPP) du générateur photovoltaïque (GPV) [26] :

$$V_{MPP} = K_1 * V_{oc} \quad (\text{III-5})$$

Le coefficient k_1 est une constante de proportionnalité généralement comprise entre 0,71 et 0,86. Une fois k_1 déterminé, la tension au point de puissance maximale (VMPP) peut être calculée à l'aide de l'équation (III-4), en utilisant la valeur de VOC mesurée périodiquement. Cette mesure est effectuée en ouvrant momentanément le convertisseur de puissance afin de placer le circuit en condition de circuit ouvert. La tension VMPP ainsi obtenue est ensuite utilisée comme tension de référence (V_{ref}).

Le principe de cette méthode repose sur la comparaison entre la tension réelle du panneau photovoltaïque (V_{PV}) et la tension de référence ($V_{ref} = VMPP$). Le signal d'erreur résultant est ensuite traité de manière à ajuster la tension du système pour que $V = V_{ref}$. Ce fonctionnement est illustré à la figure III.12

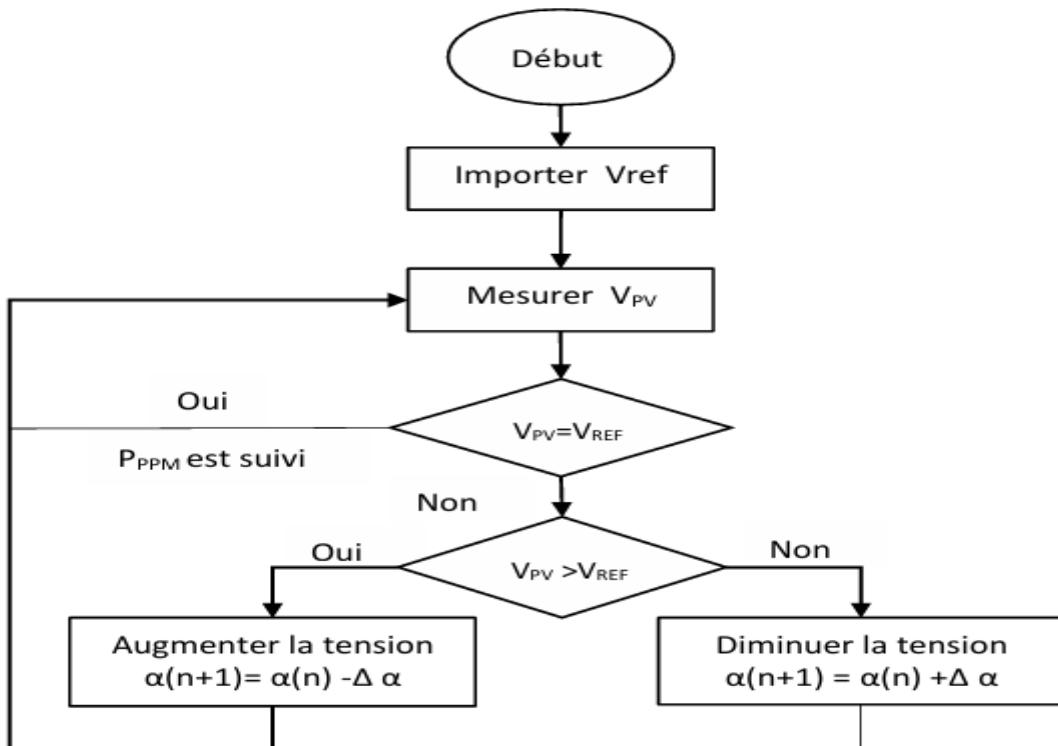


Figure III.12 Algorithme de la Tension Constante

Cette méthode présente deux principaux avantages : une réponse rapide face aux fluctuations et l'absence de variations, même minimes, en régime stationnaire [27]. Toutefois, ces atouts ne compensent pas certaines limites importantes. En effet, la tension du panneau photovoltaïque dépend fortement de l'ensoleillement et de la température, ce qui entraîne un décalage de la tension correspondant au point de puissance maximale (VMPP). Par conséquent, la tension de référence doit être ajustée en fonction des variations climatiques tout au long de l'année. De plus, le MPP ne se situe pas systématiquement entre 71 % et 78 % de la tension en circuit ouvert (VOC), ce qui limite la précision de l'approche. Enfin, il ne faut pas négliger la perte de puissance disponible causée par la déconnexion temporaire de la charge du GPV lors de la mesure de VOC [28].

III.8.2 Approche Du Courant Constant (Constant Current) :

La méthode du courant constant, également appelée méthode du court-circuit (*short-circuit current*), repose sur la mesure en temps réel du courant de court-circuit (ISC) et sur la relation linéaire approximative (équation III-2) qui relie ce courant au courant correspondant au point de puissance maximale (IMPP) du générateur photovoltaïque (GPV) [29]

$$I_{MPP} = K_2 * I_{SC} \quad (\text{III-6})$$

La constante k_2 est un coefficient de proportionnalité, déterminé spécifiquement pour le GPV utilisé. Comme pour la méthode de la tension constante (CV), sa valeur est généralement comprise entre 0,78 et 0,92.

La mesure du courant de court-circuit (ISC) en cours de fonctionnement pose toutefois des difficultés pratiques. Pour y remédier, un commutateur est généralement intégré au convertisseur de puissance afin de court-circuiter temporairement le panneau et mesurer ISC à l'aide d'un capteur de courant.

Une fois cette valeur constante du courant établie, la puissance est calculée pour différentes tensions. Si l'écart entre la puissance calculée et la puissance maximale de référence dépasse un seuil de tolérance défini, la tension est alors soit augmentée, soit diminuée, en fonction de l'évolution de la puissance. Ce processus est répété jusqu'à ce que la différence entre la puissance mesurée et la puissance maximale reste dans la plage de tolérance souhaitée, assurant ainsi que la tension corresponde bien au courant IMPP. Ce principe est illustré à la figure III.13 [30].

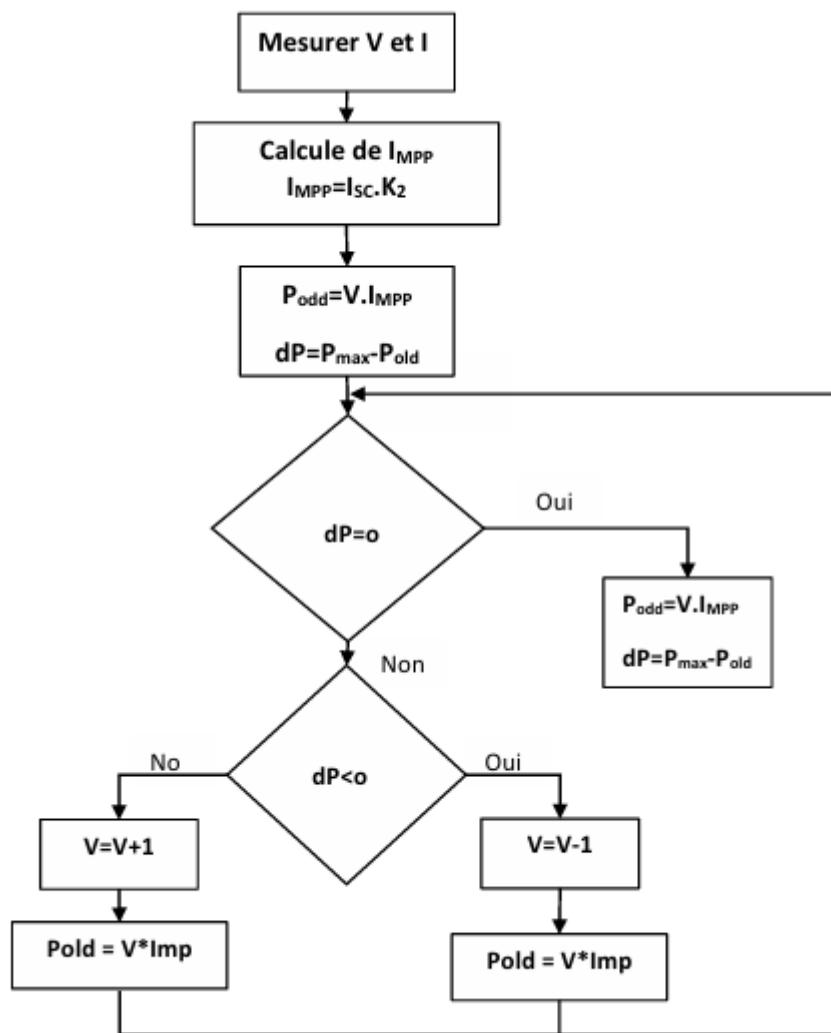


Figure III.13 Algorithme du constant courant

III.8.3 Perturbation Et Observation (P&O, Perturb And Observe)

La méthode *Perturb and Observe* (P&O) est l'une des techniques MPPT les plus couramment utilisées, en raison de sa simplicité et de sa facilité de mise en œuvre. Comme son nom

l'indique, elle repose sur l'introduction d'une perturbation — une légère augmentation ou diminution — de la tension de référence (Vref) ou du courant de référence (Iref), suivie de l'observation de l'impact de cette variation sur la puissance délivrée par le générateur ($P = VI$).

Idéalement, la variable utilisée pour caractériser le MPP doit être peu sensible aux variations climatiques. Le rayonnement solaire influence principalement le courant, tandis que la température agit davantage sur la tension du GPV. Toute fois, la température varie lentement et sur une plage réduite. Il est donc généralement plus judicieux de piloter la tension du GPV [31].

Le principe de commande P&O consiste à appliquer une faible perturbation sur la tension VPV, ce qui entraîne une variation de la puissance PPV. Comme illustré à la figure III.14, si une augmentation de VPV conduit à une hausse de la puissance, cela signifie que le point de fonctionnement se situe à gauche du PPM. En revanche, si la puissance diminue, cela indique que le système a dépassé le point de puissance maximale. Un raisonnement similaire s'applique dans le cas d'une diminution de la tension.

À partir de ces observations sur l'impact des variations de tension sur la caractéristique $P(V)$, il devient alors possible de situer le point de fonctionnement par rapport au MPP, et de le faire converger vers celui-ci grâce à une commande adaptée.

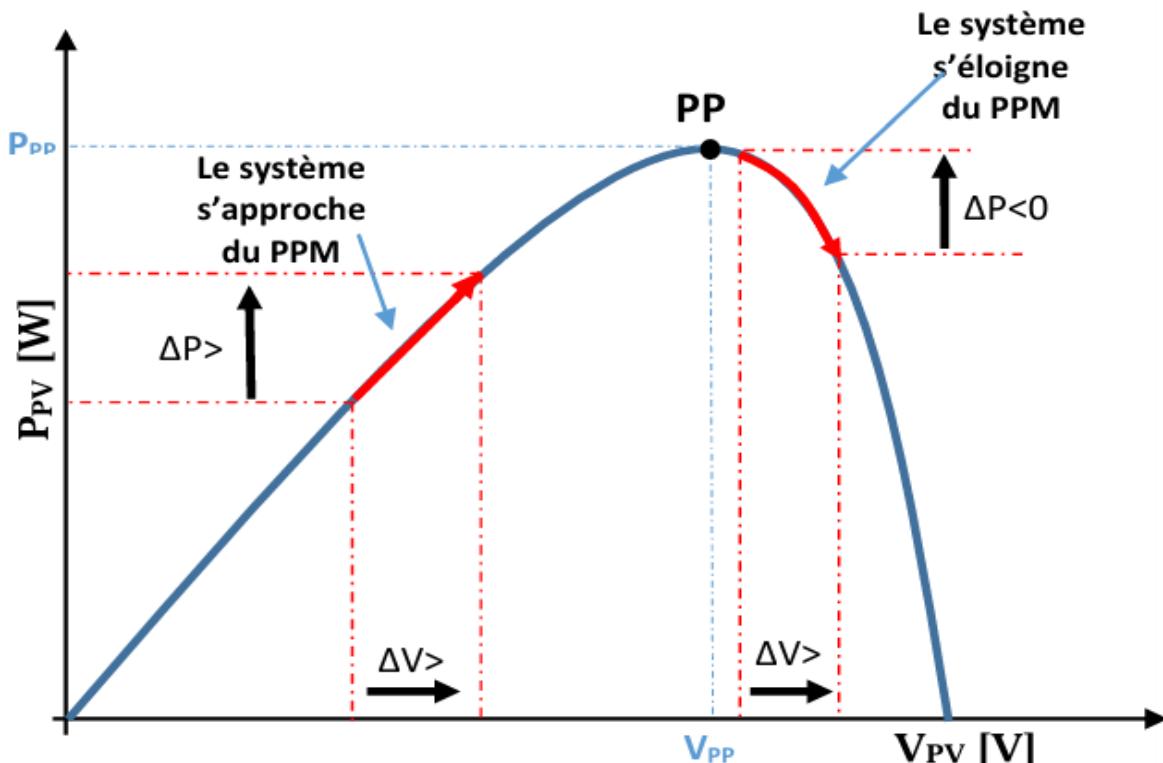


Figure III.14 Recherche du PPM par la méthode (P&O)

À partir des différentes analyses portant sur les effets d'une variation de la tension sur la caractéristique $P(V)$, il devient aisé de situer le point de fonctionnement du système par rapport au point de puissance maximale (PPM), puis de le faire converger vers ce dernier à l'aide d'un algorithme de commande adapté.

Ce type de commande nécessite l'utilisation de deux capteurs : l'un pour la mesure du courant, l'autre pour celle de la tension du générateur photovoltaïque (GPV), afin de calculer en temps réel la puissance délivrée. L'implémentation de la méthode P&O est généralement réalisée à l'aide d'un microprocesseur, bien que des circuits analogiques puissent également être utilisés [32].

La figure III.15 illustre l'algorithme classique d'une commande MPPT de type P&O, dans lequel l'évolution de la puissance est évaluée après chaque perturbation appliquée à la tension.

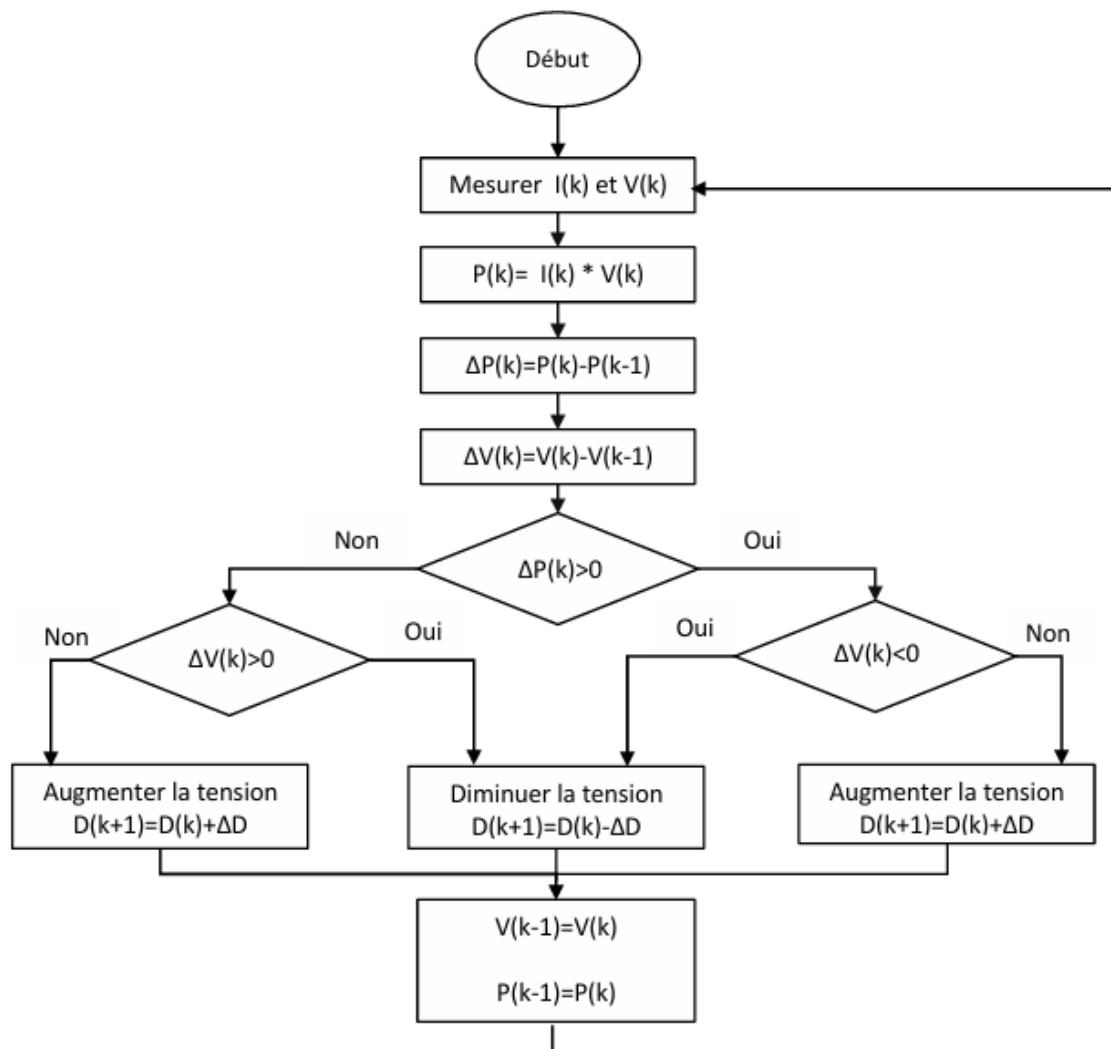


Figure III.15 l'algorithme de P&O classique

La méthode *Perturb and Observe* (P&O) est très répandue en raison de sa simplicité d'implémentation. Toutefois, elle présente certaines limites, notamment des oscillations persistantes autour du point de puissance maximale (PPM) en régime stationnaire. En effet, la recherche du PPM étant effectuée de manière périodique, le système ne peut se stabiliser précisément sur le point optimal, ce qui entraîne des pertes d'énergie [33].

L'amplitude de ces oscillations dépend de la taille du pas de perturbation :

- Si le pas est important, l'algorithme réagit rapidement aux variations brutales des conditions de fonctionnement, mais cela génère davantage de pertes en conditions stables.
- Si le pas est trop faible, les pertes sont réduites dans les environnements stables, mais le système devient moins réactif aux changements rapides d'ensoleillement ou de température.

Il est donc nécessaire de trouver un compromis entre rapidité de réponse et précision, ce qui complique l'optimisation de cette méthode.

Un autre inconvénient apparaît en cas de variations rapides des conditions climatiques. Comme illustré dans la figure III.16, supposons que le point de fonctionnement initial soit A. Si les conditions restent constantes, une perturbation de tension ΔV déplace le système vers le point B. La diminution de puissance observée incite alors l'algorithme à inverser la direction de la perturbation. En revanche, si un changement soudain d'irradiance survient et déplace la courbe de puissance de P_1 à P_2 , cette même perturbation entraîne le passage du point A au point C. L'augmentation de puissance induite est alors à tort attribuée à la perturbation précédente, poussant l'algorithme à poursuivre dans une direction incorrecte, s'éloignant ainsi du véritable PPM.

Ce comportement persiste tant que les conditions ne se stabilisent pas, entraînant un **retard de convergence** vers le point optimal et des pertes de puissance non négligeables.

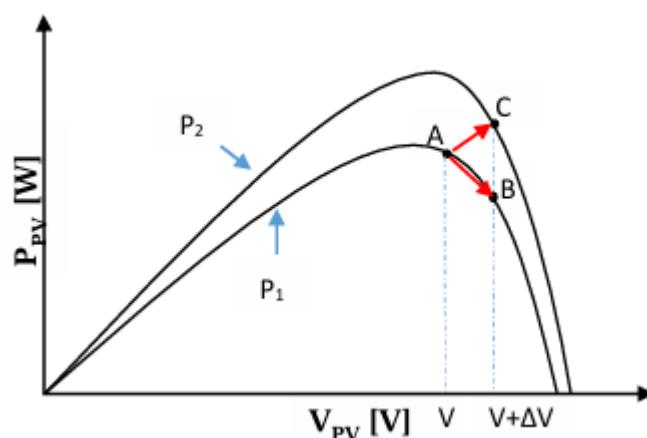


Figure III.16 Divergence de la méthode P&O

Afin de pallier les limites de la méthode P&O classique, notamment les oscillations autour du point de puissance maximale (PPM) et les erreurs de suivi lors de changements rapides des conditions climatiques, plusieurs variantes améliorées de cet algorithme ont été développées. Parmi ces améliorations, on peut citer la méthode de comparaison pondérée à trois points (*Three-Point Weight Comparison*), dont le principe consiste à introduire un troisième point de mesure pour affiner la décision sur la direction de la perturbation.

Dans cette approche, l'algorithme compare trois points :

- Le point actuel **A**,
- Un point **B**, obtenu par une perturbation dans une direction donnée à partir de A,
- Et un point **C**, obtenu par une double perturbation dans la direction opposée à celle ayant conduit au point B.

Cette méthode permet de mieux évaluer la tendance réelle de la courbe de puissance et d'éviter les erreurs de direction dans la recherche du MPP. L'algorithme correspondant est illustré à la Figure III.17.

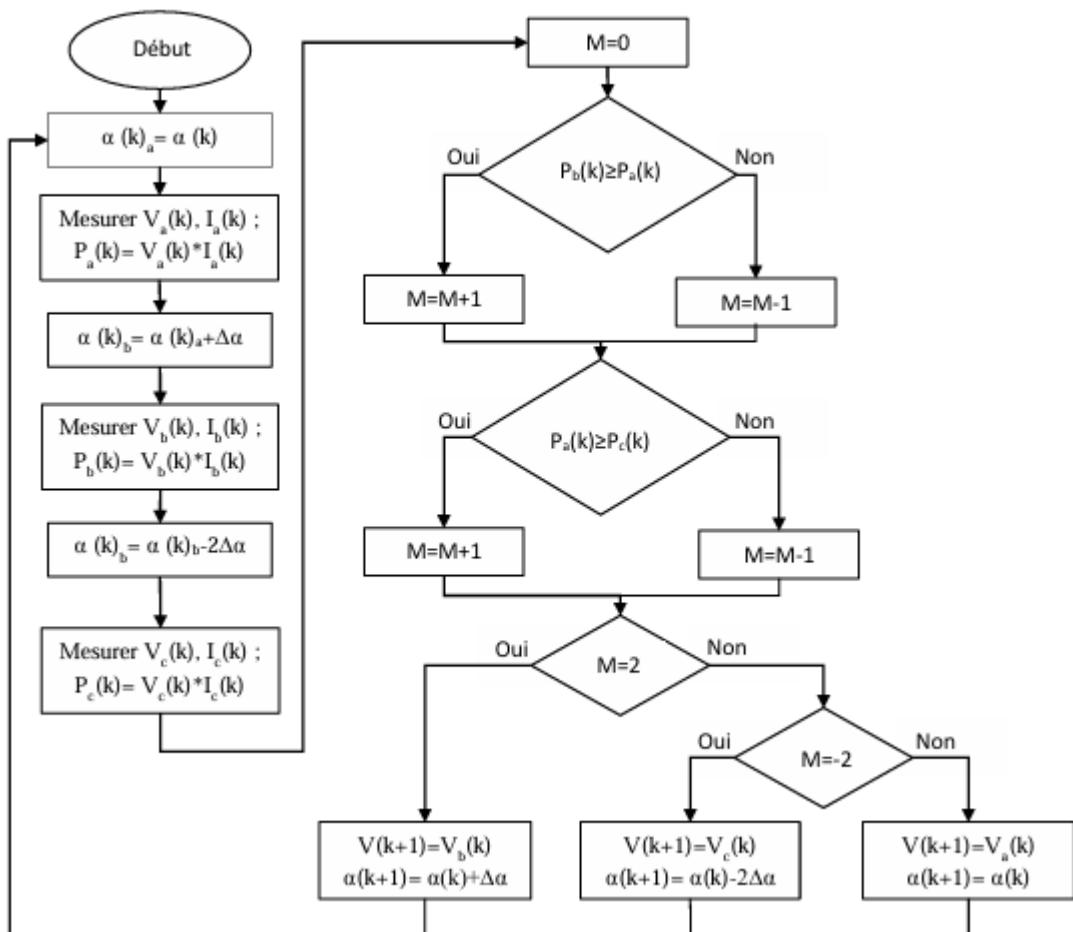


Figure III.17 algorithme du poids d'un troisième point

Une autre amélioration apportée à la méthode P&O consiste à conserver le même algorithme de base tout en rendant le pas de perturbation variable. Contrairement à la version classique à

pas fixe, cette approche ajuste dynamiquement l'amplitude de la perturbation en fonction de la position du point de fonctionnement par rapport au PPM.

L'idée principale est d'utiliser plusieurs échantillons successifs de la puissance de sortie P_{pv} pour évaluer la tendance de la courbe de puissance. Ainsi, lorsque le système se rapproche du point de puissance maximale, le pas est réduit, ce qui limite les oscillations et améliore la stabilité. À l'inverse, lorsqu'il est éloigné du PPM, le pas est augmenté pour accélérer la convergence.

Certaines études [29] recommandent même des expressions spécifiques pour ajuster le pas en fonction de l'évolution de la puissance, optimisant ainsi la performance globale du système.

$$\alpha(k) = \alpha(k-1) \pm N \times \left| \frac{P(k) - P(K-1)}{V(k) - V(K-1)} \right| \quad (\text{III-7})$$

La recherche dans ce domaine est toujours en cours.

III.8.4 Conductance Incrémentale (IncCond, Incremental Conductance)

Cette méthode est basée sur le fait que la pente de la courbe caractéristique de puissance du panneau est nulle au MPP, positive à gauche et négative à droite. Figure III.18

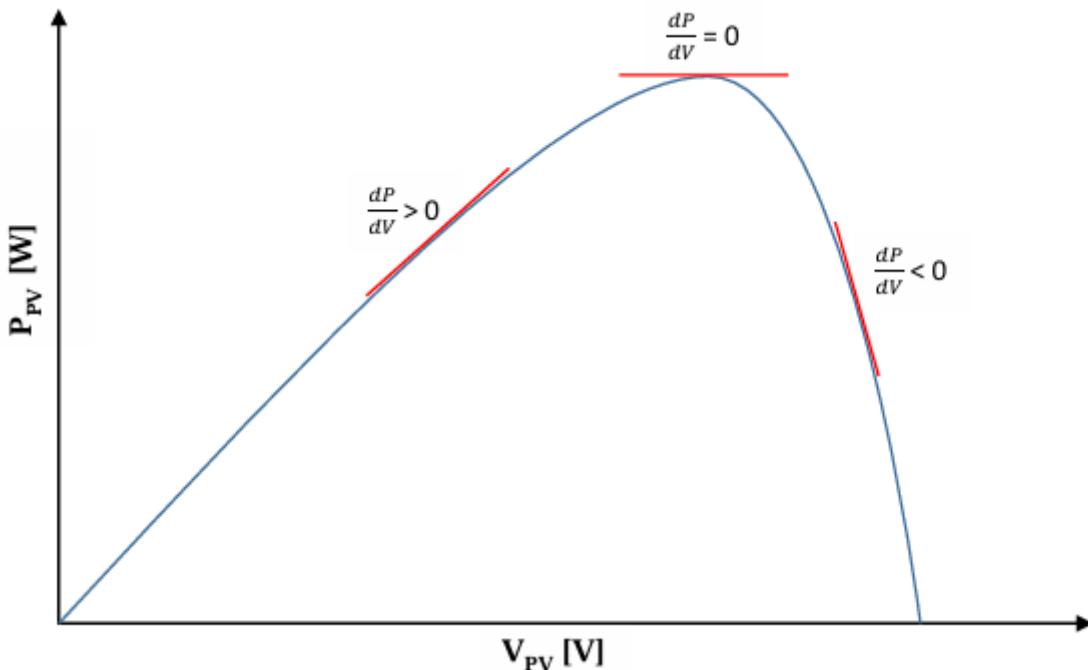


Figure III.18 caractéristique de tension-puissance du panneau

On observer que :

$$\begin{cases} \frac{dP}{dV} = 0 & \text{au PMM} \\ \frac{dP}{dV} > 0 & \text{à gauche du PMM} \\ \frac{dP}{dV} < 0 & \text{à droite du PMM} \end{cases} \quad (\text{III-8})$$

Puisque :

La puissance du panneau solaire est donnée par :

$$P = V \times I \quad (\text{III-9})$$

Et sa dérivée partielle est donnée par :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \cong I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (\text{III-10})$$

Donc, l'équation (III-4) peut être écrite comme suit :

$$\begin{cases} \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} & \text{le point de fonctionnement est sur le PMM} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} & \text{le point de fonctionnement est à gauche du PPM} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} & \text{le point de fonctionnement est sur la droite du PPM} \end{cases} \quad (\text{III-11})$$

Le point de puissance maximale (PPM) peut être atteint en comparant, à chaque instant, la conductance instantanée (I_{PV}/V_{PV}) à l'incrément de conductance (dI_{PV}/dV_{PV}). Lorsque l'incrément de conductance est supérieur à l'opposé de la conductance ($-G$), le rapport cyclique du convertisseur est diminué. En revanche, si l'incrément est inférieur à $-G$, le rapport cyclique est augmenté. Ce processus est répété jusqu'à convergence vers le PPM. L'algorithme correspondant est illustré à la Figure III.19

Dans la pratique, cette méthode, tout comme celle de Perturbation et Observation (P&O), engendre **des** oscillations autour du MPP, car il est difficile d'atteindre précisément la condition $dP/dV=0$. Le système reste ainsi en quête permanente du maximum de puissance. De plus, l'algorithme Incremental Conductance (IncCond) est plus complexe que celui du P&O, ce qui implique **un** temps de calcul plus long.

Une amélioration possible de cette méthode consiste à rapprocher d'abord le point de fonctionnement du MPP par une stratégie initiale, puis à appliquer l'algorithme IncCond pour un suivi précis du point de puissance maximale. Cette approche hybride utilise souvent un point de départ basé sur une charge équivalente résistive, définie par le rapport entre la

tension à vide V_{oc} et le courant de court-circuit I_{sc} . Cette stratégie permet également d'éviter les pièges liés à l'existence de plusieurs maxima locaux, en garantissant le suivi du vrai MPP.

Une autre approche, moins intuitive, consiste à utiliser **la** conductance instantanée et **son** incrément pour générer un **signal** d'erreur qui pilote directement le système vers le point optimal [34].

$$e = \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV} \quad (III-12)$$

Selon l'équation (III-10), l'erreur devient nulle au niveau du point de puissance maximale (**MPP**). Ainsi, l'utilisation d'un régulateur de type PI permet d'annuler efficacement cette erreur. La mise en œuvre de cette méthode nécessite la mesure instantanée de la tension et **du** courant du panneau photovoltaïque, ce qui implique l'utilisation de deux capteurs. Par ailleurs, l'algorithme Incremental Conductance (IncCond) se prête particulièrement bien à une implémentation sur DSP ou microcontrôleur, ces dispositifs étant capables de mémoriser les valeurs précédentes de la tension et du courant, facilitant ainsi le calcul de l'incrément de conductance.

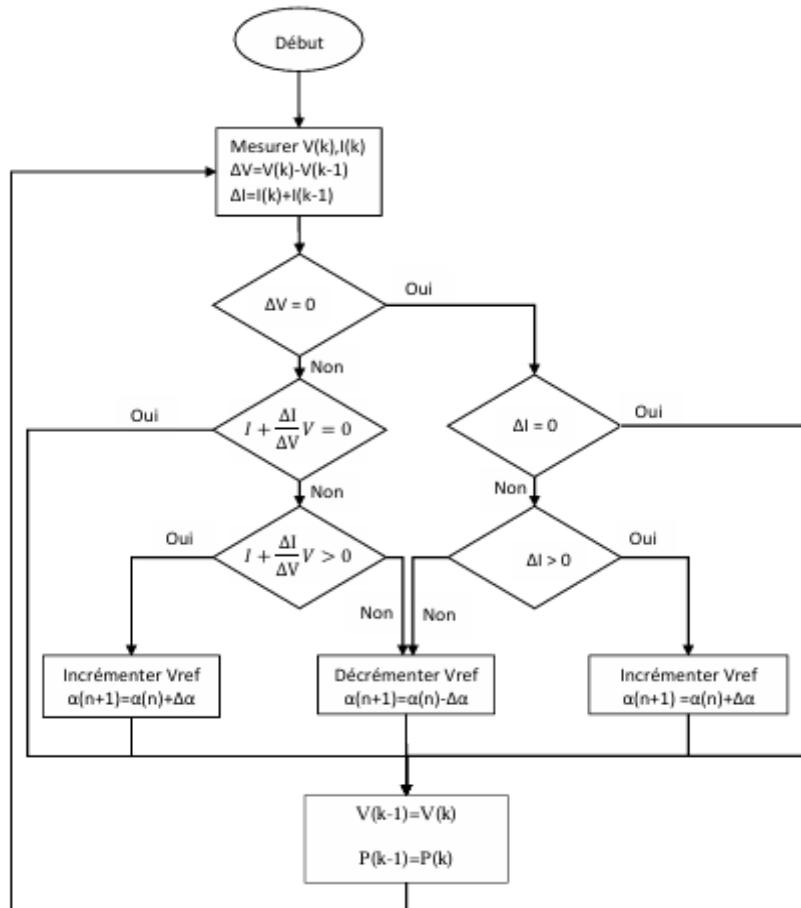


Figure III.19 l'algorithme IncCond classique

Une autre solution est possible encoure comme la methode de p&o .c'est aussi de garder le même algorithme de la méthode IncCond classique ou le pas de perturbation est variable le pas propose est :

$$\alpha(k) = \alpha(k-1) \pm N \times \left| \frac{P(k) - P(K-1)}{V(k) - V(K-1)} \right| \quad (\text{III-13})$$

III.8.5 La Commande Mppt Flou

La commande basée sur la logique floue, couramment désignée dans la littérature anglo-saxonne par Fuzzy Logic Control, connaît un intérêt croissant grâce aux avancées technologiques des microcontrôleurs [35]. Son principal avantage réside dans sa capacité à fonctionner avec des données imprécises, sans nécessiter **un** modèle mathématique rigoureux du système. De plus, elle est bien adaptée au traitement des comportements non linéaires.

Le principe de cette commande repose généralement sur deux variables d'entrée : l'erreur EEE et la variation de l'erreur ΔE \Delta E, ainsi qu'une variable de sortie $\Delta \alpha$ \Delta alpha, représentant la modification du rapport cyclique appliqué au convertisseur statique pour atteindre le point de puissance maximale (PPM). La valeur de sortie est déterminée à l'aide d'une table de règles (ou table de vérité) en fonction de l'évolution des deux entrées.

Une commande à logique floue se compose typiquement de **trois étapes** fondamentales :

- Fuzzification : transformation des variables d'entrée numériques en variables linguistiques ;
- Évaluation des règles (ou inférence) à l'aide d'une table de décision ;
- Défuzzification : conversion de la variable linguistique de sortie en une valeur numérique exploitable par le système.

Durant la phase de fuzzification, les variables d'entrée peuvent prendre les cinq états linguistiques suivants :

- NB : Négatif Grand (*Negative Big*),
- NS : Négatif Petit (*Negative Small*),
- ZE : Zéro (*Zero*),
- PS : Positif Petit (*Positive Small*),
- PB : Positif Grand (*Positive Big*).

La Figure III.20 illustre la structure de base d'un système de commande utilisant la logique floue.

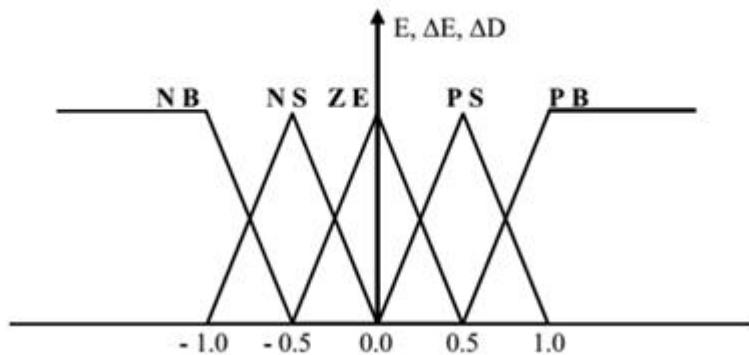


Figure III.20 structure de base de la commande floue Les paramètres d'entrées E et ΔE qui sont liées aux équations suivantes :

$$E(n) = \frac{P(n) - P(n-1)}{V(n) - V(n-1)} \quad (\text{III-13})$$

$$\Delta E(n) = E(n) - E(n-1) \quad (\text{III-14})$$

En fonction de leurs évolutions et d'une table de vérité comme indiquée dans le tableau I, une valeur est attribuée au paramètre de sortie $\Delta \alpha$.

E \ ΔE	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	ZE	ZE	NB	NB	NB
NS	ZE	ZE	NS	NS	NS
ZE	NS	ZE	ZE	ZE	PS
PS	PS	PS	PS	ZE	ZE
PB	PB	PB	PB	ZE	ZE

Tableau III.2 Exemple d'une table de vérité pour une commande logique floue.

La variable linguistique assignée à $\Delta \alpha$, dépend des différentes combinaisons entre E et ΔE . Par exemple, si les variables d'entrée (E et ΔE), ont comme valeur PB et ZE correspondant à un point de fonctionnement très éloigné du PPM, d'après la table de vérité la valeur donnée à la variable de sortie $\Delta \alpha$ est PB, ce qui implique une forte variation positive du rapport cyclique pour atteindre le PPM. En résumé, les variations du rapport cyclique dépendent de la différence de position entre le point de fonctionnement et un PPM. Ainsi, dès que ce dernier s'approche du PPM, les incrémentations appliquées à $\Delta \alpha$ s'affinent jusqu'à atteindre le PPM.

La defuzzification, consiste à convertir cette fois, une variable linguistique en variable numérique. Cette étape ne s'applique qu'à la variable de sortie $\Delta \alpha$, afin de pouvoir piloter le convertisseur de puissance pour atteindre le PPM.

En résumé, cette méthode s'avère être très performante lors de changement des conditions climatiques, cependant sa précision en statique est fortement liée à la complexité de la table de vérité employée entraînant la nécessité du choix obligatoire d'un microcontrôleur ayant une grande capacité de calculs tenant compte des nombreuses disparités des paramètres électriques du panneau. Ici, typiquement, cette commande peut présenter les meilleures performances en termes de précision et de rapidité de recouvrement de PPM mais elle entraîne obligatoirement une consommation énergétique non négligeable liée au microprocesseur ainsi qu'un surcoût [36].

III.8.6 Autres Méthodes

Il existe dans la littérature plusieurs algorithmes MPPT **avancés**, souvent basés sur des approches innovantes et plus sophistiquées. Ces méthodes visent à améliorer la précision, la rapidité ou l'adaptabilité du suivi du point de puissance maximale (MPP). Parmi les plus notables, on peut citer :

- Les algorithmes basés sur les réseaux de neurones, capables d'apprendre et de s'adapter à différents profils d'ensoleillement ;
- La méthode des tables de correspondance (*Look-Up Table*), qui utilise des valeurs préenregistrées pour une estimation rapide du MPP ;
- Les algorithmes d'identification en temps réel du MPP, qui adaptent leur comportement dynamiquement en fonction des conditions de fonctionnement ;
- La méthode β , fondée sur des relations empiriques spécifiques entre les paramètres électriques du panneau ;
- L'algorithme de la capacité parasite (*Parasitic Capacitance*), exploitant l'effet capacitif inhérent aux cellules photovoltaïques ;
- La méthode de balayage du courant (*Current Sweep*), consistant à faire varier le courant sur une plage définie afin d'identifier directement le point de puissance maximale.

Ces techniques, bien que plus complexes à implémenter, offrent un meilleur rendement dans des environnements aux conditions climatiques variables ou imprévisibles.

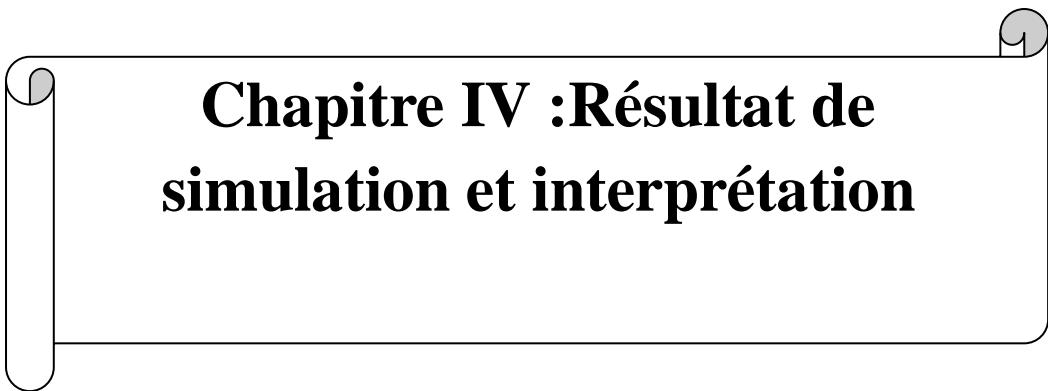
III.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude approfondie des différentes techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) utilisées dans les systèmes photovoltaïques. Le suivi du MPP est essentiel pour garantir une exploitation optimale de l'énergie solaire, dans un contexte où les conditions d'ensoleillement et de température sont en constante évolution.

Nous avons tout d'abord abordé les principes de base du fonctionnement des convertisseurs DC/DC et leur rôle dans la chaîne de conversion énergétique. Ensuite, les différentes stratégies MPPT ont été classées selon leurs paramètres d'entrée et leur type de recherche. Cette classification a permis de mieux comprendre les avantages, les limites, ainsi que les domaines d'application de chaque méthode.

Les algorithmes classiques, tels que Perturb & Observe (P&O) et Incremental Conductance (IncCond), ont été largement détaillés, en soulignant leurs performances, leurs faiblesses, et les diverses améliorations proposées dans la littérature, notamment par l'introduction de pas variables ou de comparaisons multiples. Nous avons également exploré des approches plus avancées, telles que la **commande floue** ou les méthodes fondées sur des réseaux de neurones, offrant des performances accrues mais au prix d'une plus grande complexité de mise en œuvre.

En somme, aucun algorithme ne peut être considéré comme universellement optimal. Le choix d'une méthode MPPT dépend fortement des objectifs recherchés (simplicité, rapidité, précision, coût) ainsi que des conditions d'exploitation du système photovoltaïque. Les travaux de simulation qui suivront dans le prochain chapitre permettront de comparer ces approches dans un cadre expérimental et de valider les performances théoriques présentées ici.



Chapitre IV :Résultat de simulation et interprétation

IV.1 Introduction

La simulation constitue un outil fondamental pour l'analyse des performances théoriques d'un système. Elle permet d'effectuer des tests dans un environnement contrôlé, tout en assurant une observation précise des résultats. Cette démarche s'inscrit entre les deux phases essentielles de la conception : l'étude théorique et la réalisation du prototype. Grâce à la flexibilité offerte par la simulation, il est possible de modifier aisément la conception afin d'explorer un large éventail de scénarios de fonctionnement et d'identifier ainsi la configuration optimale.

Matlab/Simulink est un environnement de simulation reconnu, doté d'une interface graphique conviviale permettant la modélisation à l'aide de diagrammes blocs. Il offre la possibilité de construire des modèles hiérarchiques, facilitant l'analyse du système à différents niveaux. Par ailleurs, sa structure modulaire permet d'interconnecter facilement plusieurs sous-systèmes pour simuler un ensemble cohérent et complet.

IV.2 Simulation du système photovoltaïque

La Figure IV.1 donne le schéma block de notre système photovoltaïque étudié avec l'ensemble des étages simulés: GPV, DC-DC et MPPT.

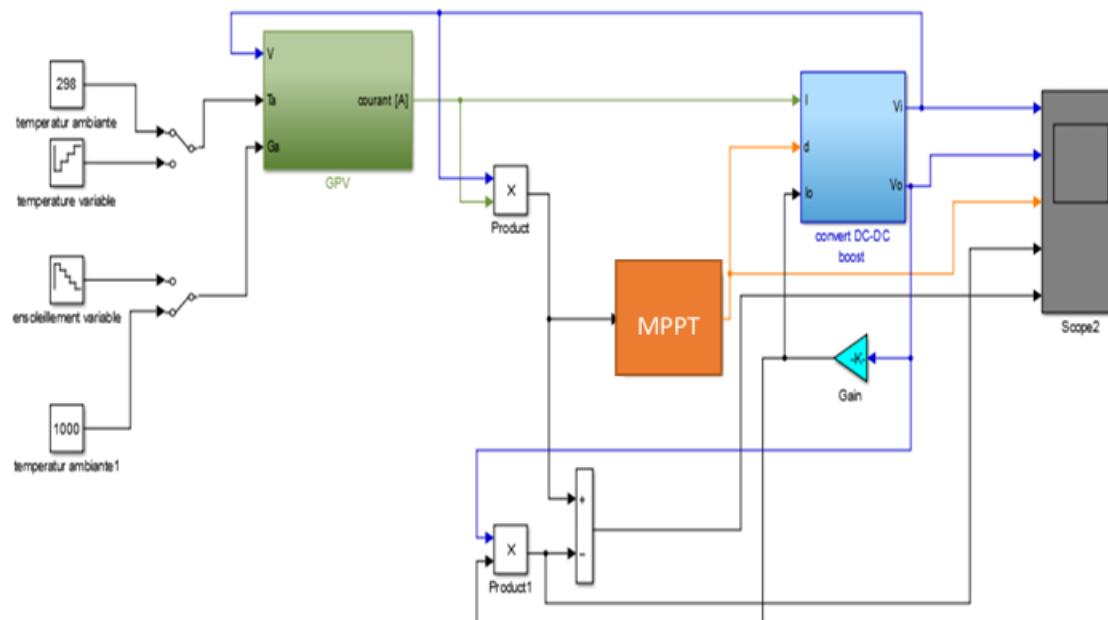


Figure IV.1 Schéma bloc sous Simulink du système global

IV.3 Simulation du système photovoltaïque avec onduleur

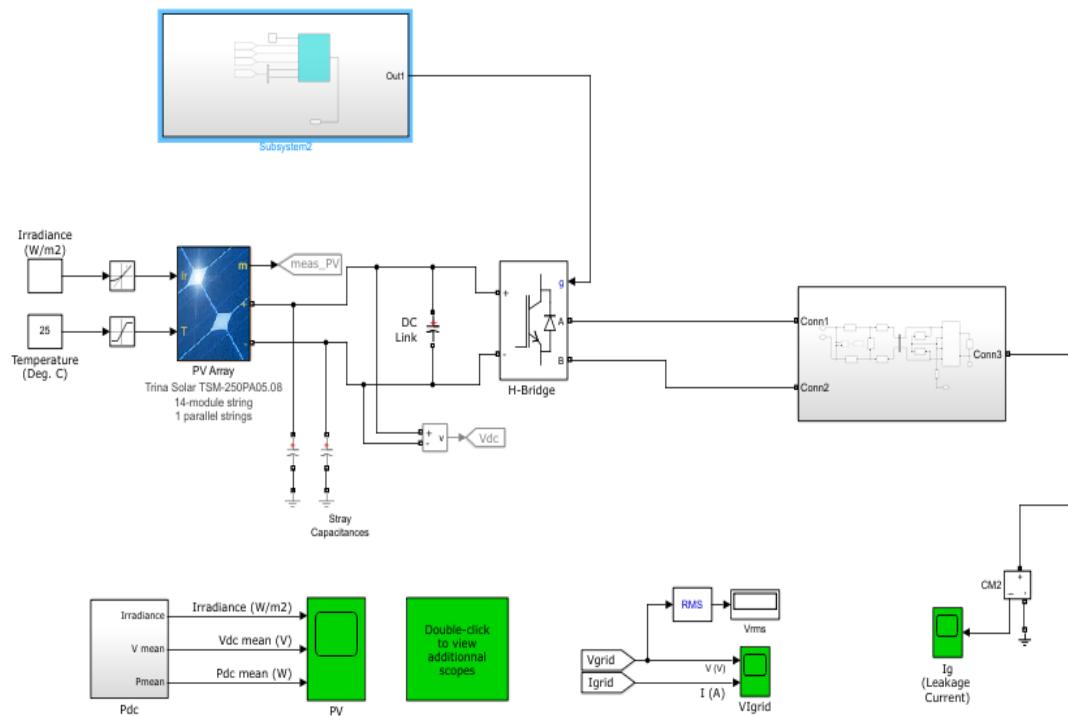


Figure IV.2 Système PV avec interface H-Bridge sous Simulink

IV.3.1 Résultats et discussions

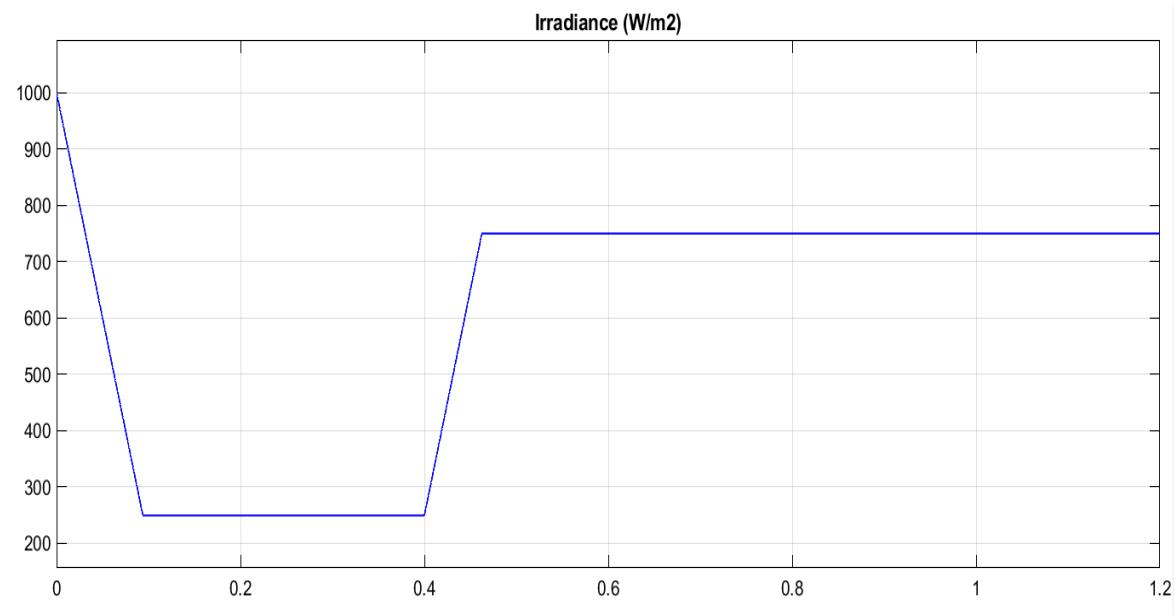
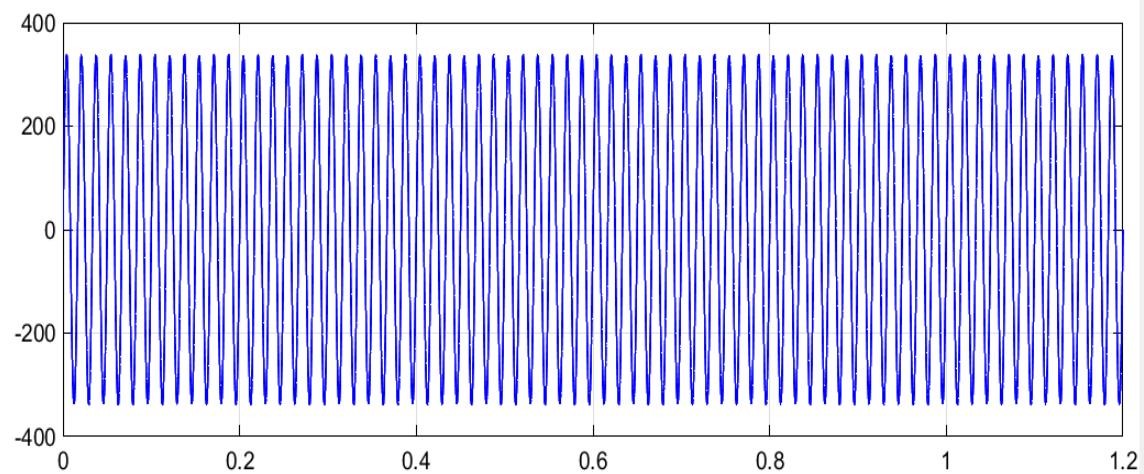
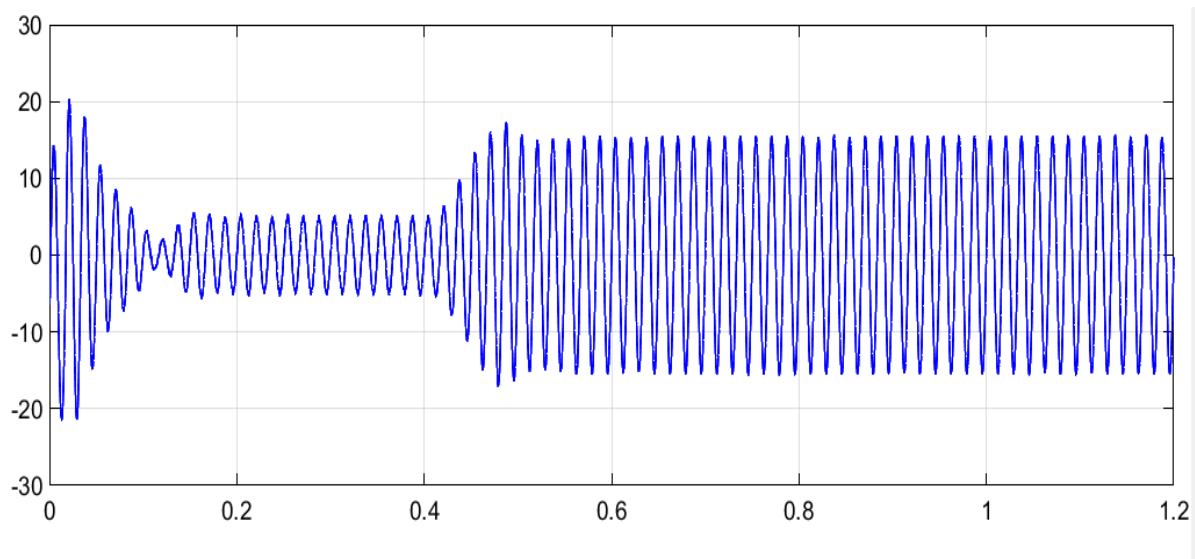


Figure IV.3 Radiance

**Figure IV.4** Voltage**Figure IV.5** Intensité

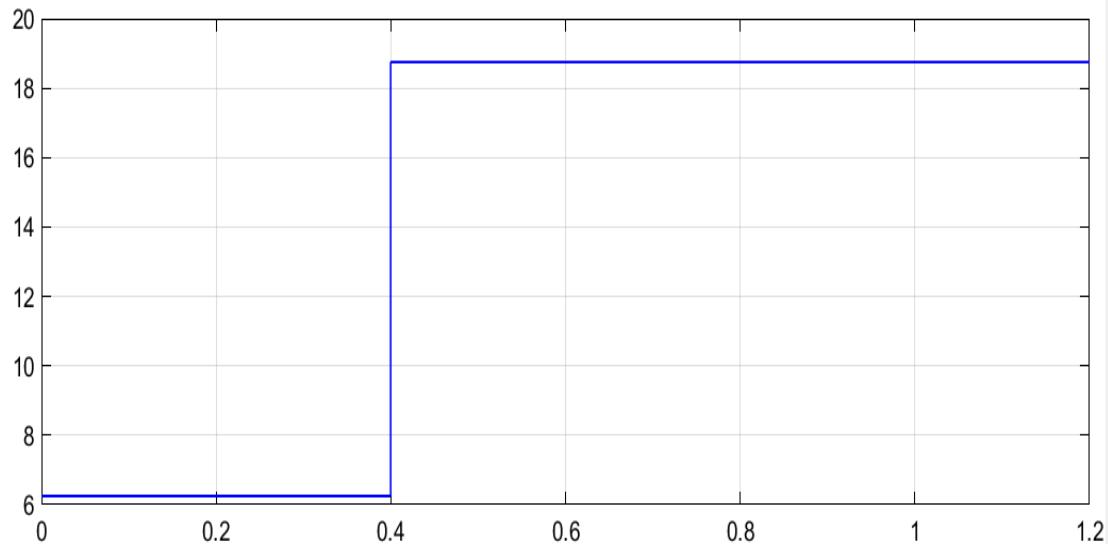
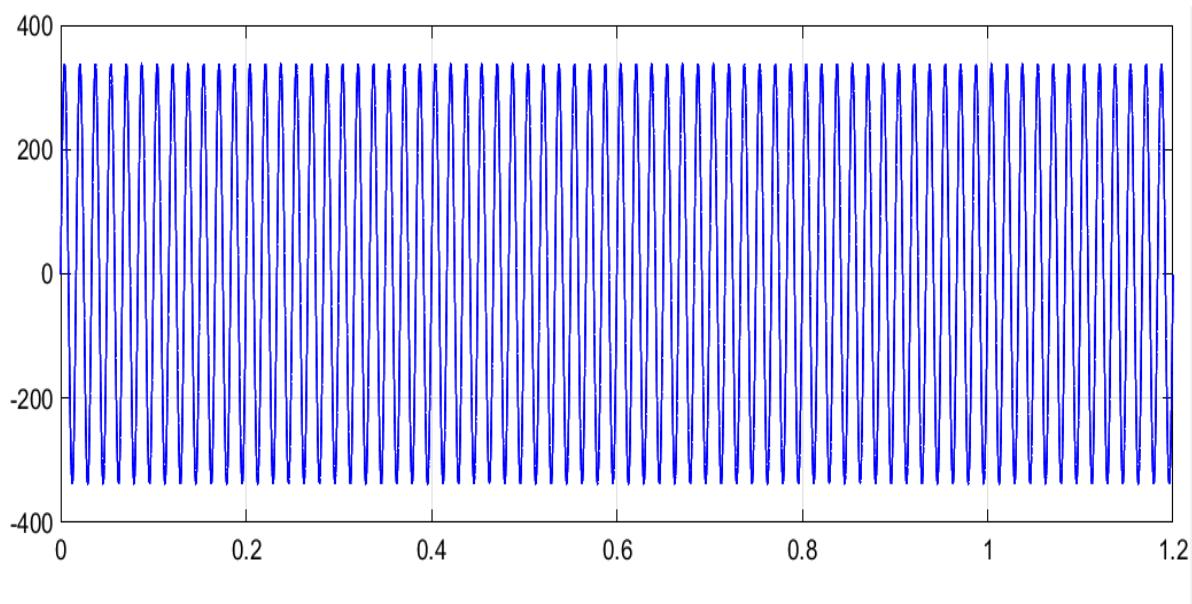
Cas 2 :**Figure IV.6** Température

Figure IV.7 voltage

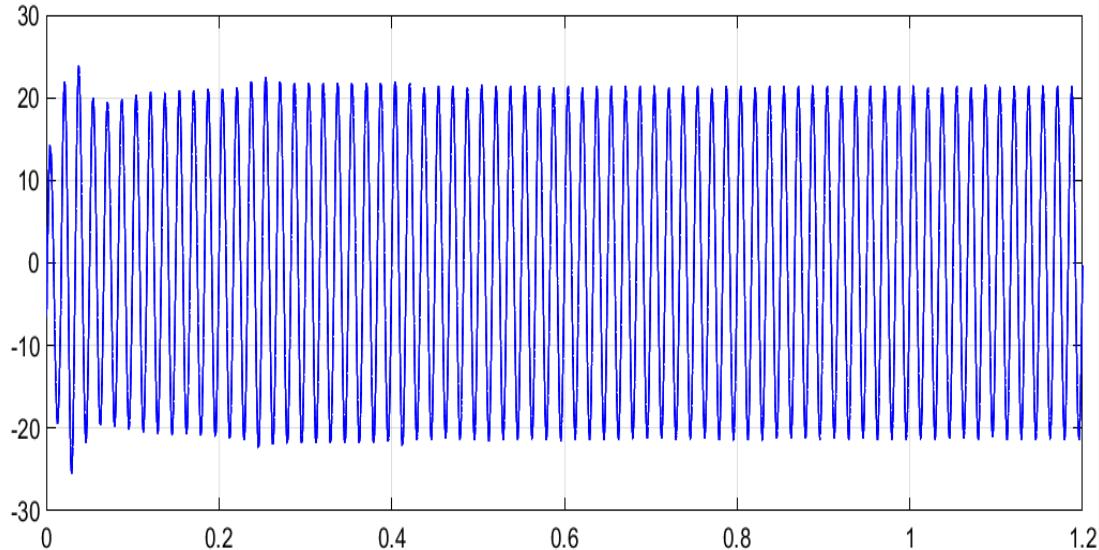


Figure IV.8 Intensité

Dans ce cas, l'onduleur joue un rôle essentiel dans la conversion du courant continu produit par le champ photovoltaïque en courant alternatif injecté dans le réseau. Le modèle Simulink utilise une structure de type pont en H (H-Bridge) pour cette conversion.

1. Comportement de la tension et du courant de sortie

Sous des conditions d'irradiance et de température données (par exemple 1000 W/m^2 et 25°C), la tension de sortie continue du champ photovoltaïque (V_{dc}) est stabilisée via le DC Link, avant d'être modulée par l'onduleur. L'onde de sortie obtenue à la sortie de l'onduleur présente une forme quasi sinusoïdale, comme le montrent les mesures de V_{grid} et I_{grid} .

L'utilisation d'un filtrage adéquat (non représenté explicitement dans ce schéma mais généralement présent en aval) est supposée afin d'éliminer les harmoniques résiduels.

2. Effets de la variation des conditions climatiques

Lorsque l'irradiance diminue ou que la température augmente, on observe une baisse de la tension de sortie du panneau, ce qui impacte directement l'amplitude de la tension alternative injectée dans le réseau. Les résultats obtenus montrent une réduction de la puissance active délivrée (P_{dc}) et une variation de la tension efficace (V_{rms}). Cela met en évidence la nécessité d'un suivi du point de puissance maximale (MPPT) pour optimiser le rendement.

3. Courant de fuite (leakage current)

Le modèle inclut également une mesure du courant de fuite (I_g), qui est un paramètre critique dans les systèmes PV connectés au réseau, notamment pour des raisons de sécurité. Les simulations montrent que ce courant reste dans les limites acceptables, indiquant un bon isolement du système.

4. Analyse qualitative

L'ensemble des résultats montre que le système onduleur fonctionne de manière satisfaisante pour injecter une puissance électrique propre et stable dans le réseau. Le pont en H permet une modulation efficace de la tension, et le système dans son ensemble répond bien aux

variations des conditions climatiques. Toutefois, pour une validation complète, une analyse fréquentielle des harmoniques et une étude de conformité aux normes de qualité réseau (telles que IEEE 1547 ou EN 50160) seraient recommandées.

IV.4 Simulation du système photovoltaïque avec hacheur

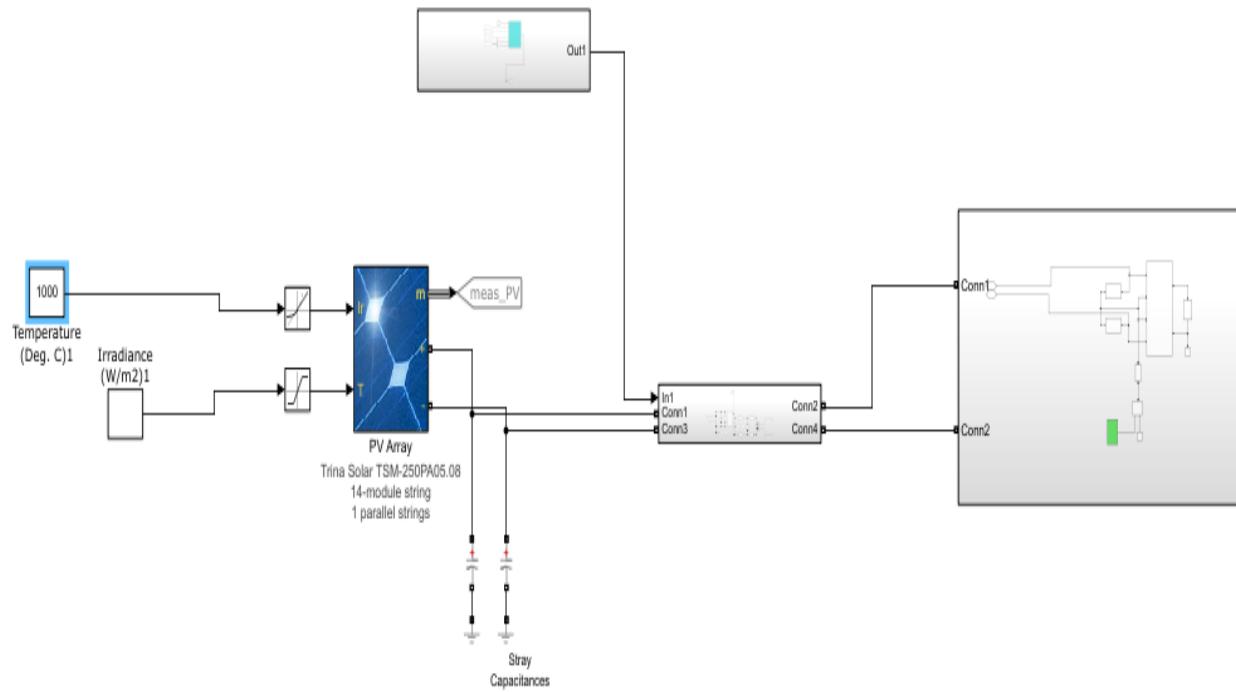


Figure IV.9 Système PV avec convertisseur DC/DC sous Simulink

IV.4.1 Résultats et discussions

Cas 1 : Irradiation variable

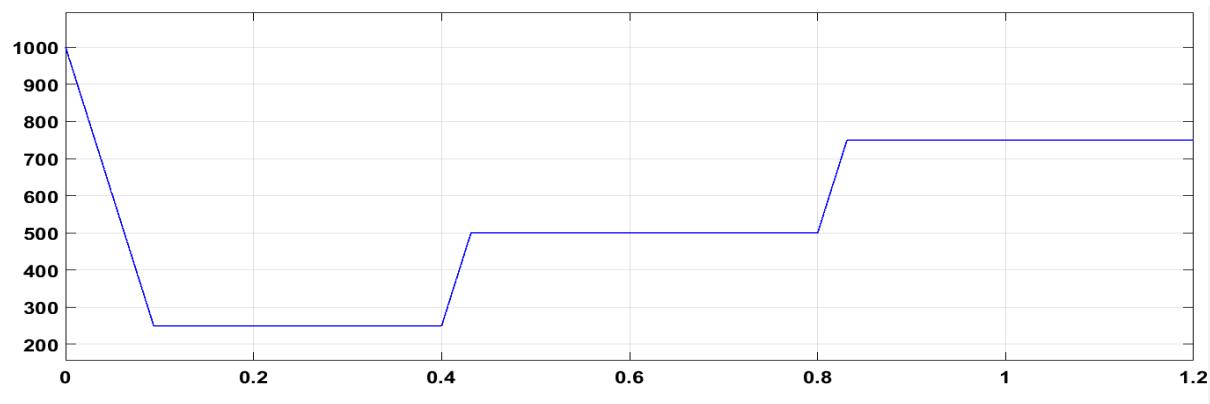


Figure IV.10 La variation de la radiance (éclairage)

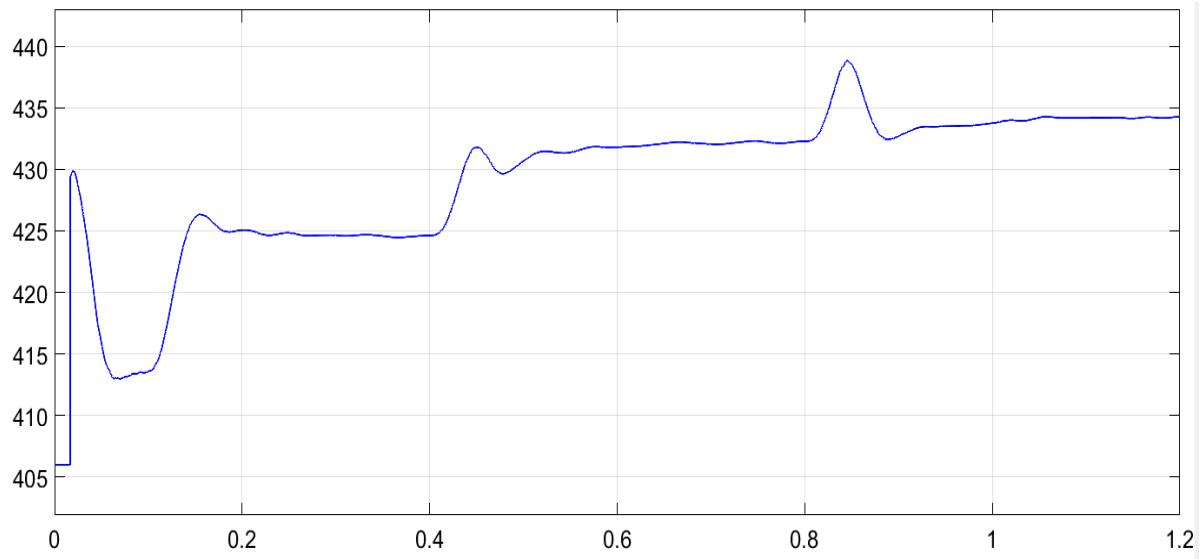


Figure IV.11 La tension

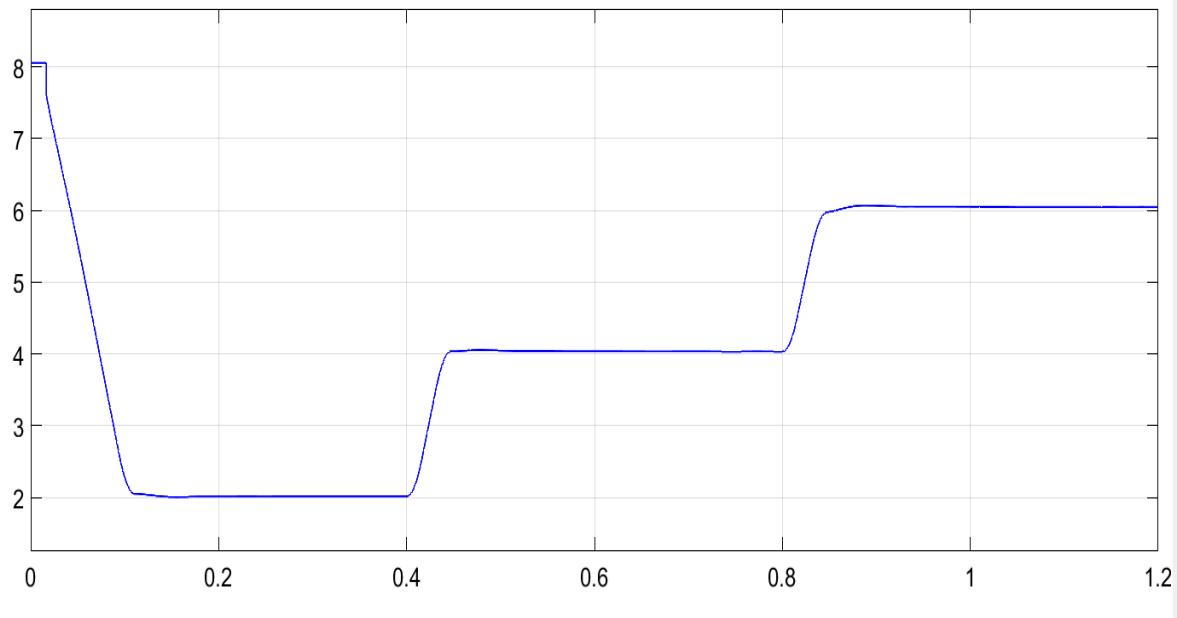


Figure IV.12 L'intensité

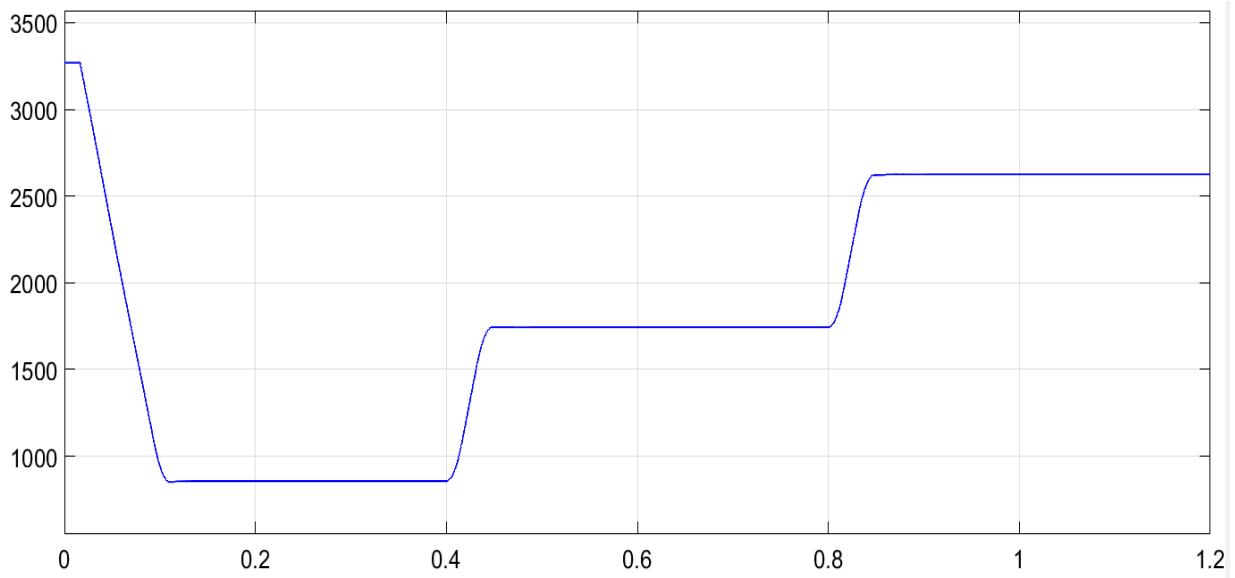


Figure IV.13 La puissance apparente

Cas 1 : Irradiance variable

a. Effet sur la tension

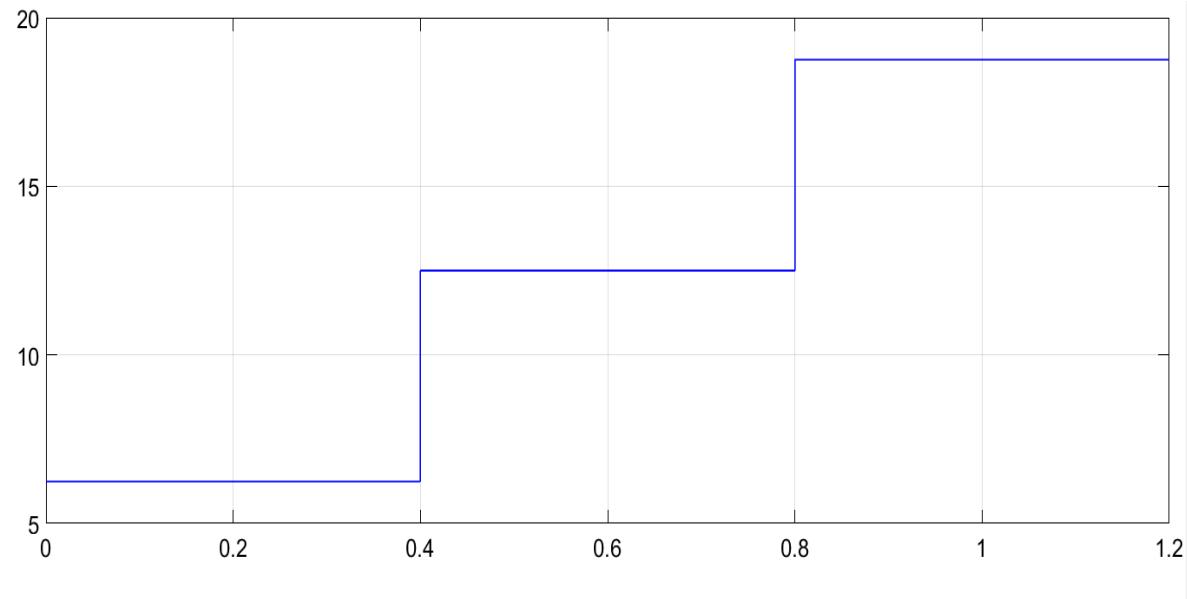
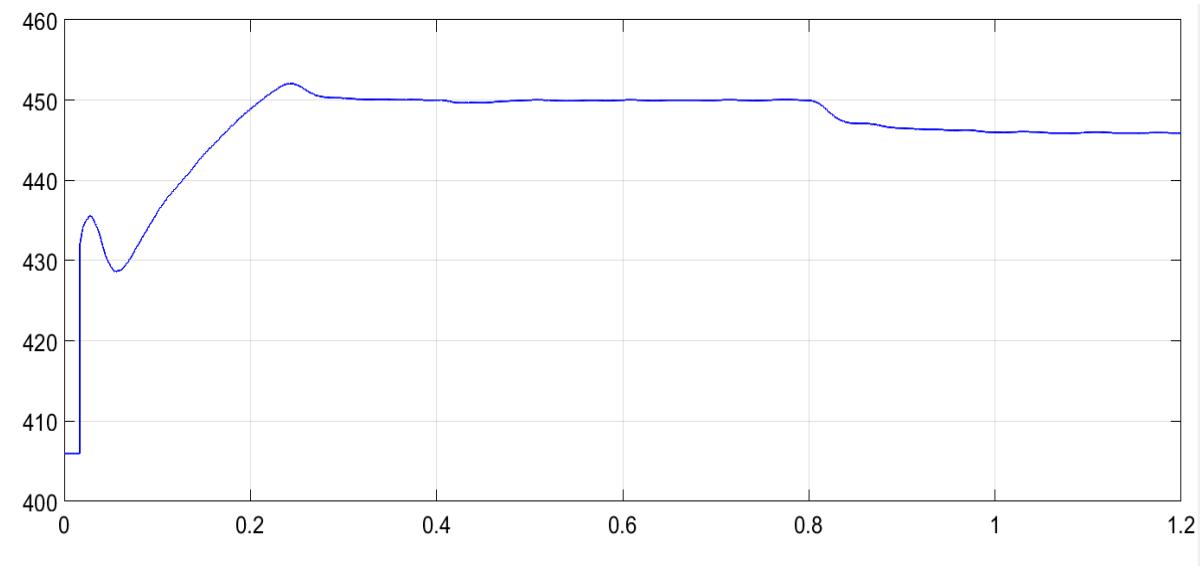
Lorsque l'irradiance augmente, la tension en sortie du générateur photovoltaïque varie légèrement. Cela s'explique par le fait que la tension dépend principalement de la température de jonction plutôt que de l'irradiance. Ainsi, la variation de la tension reste relativement faible.

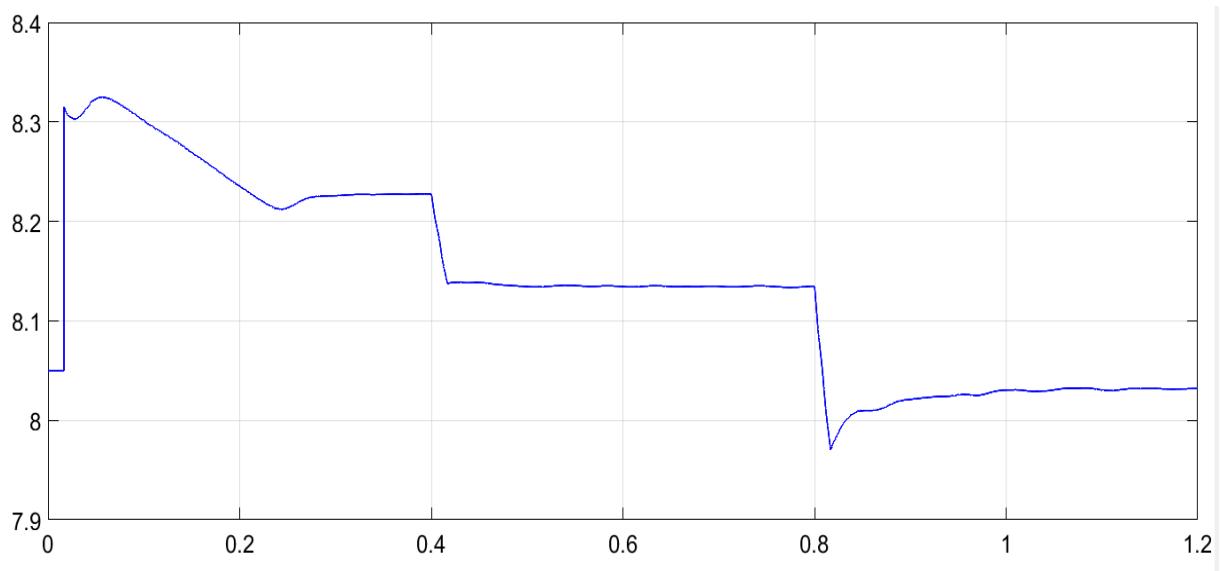
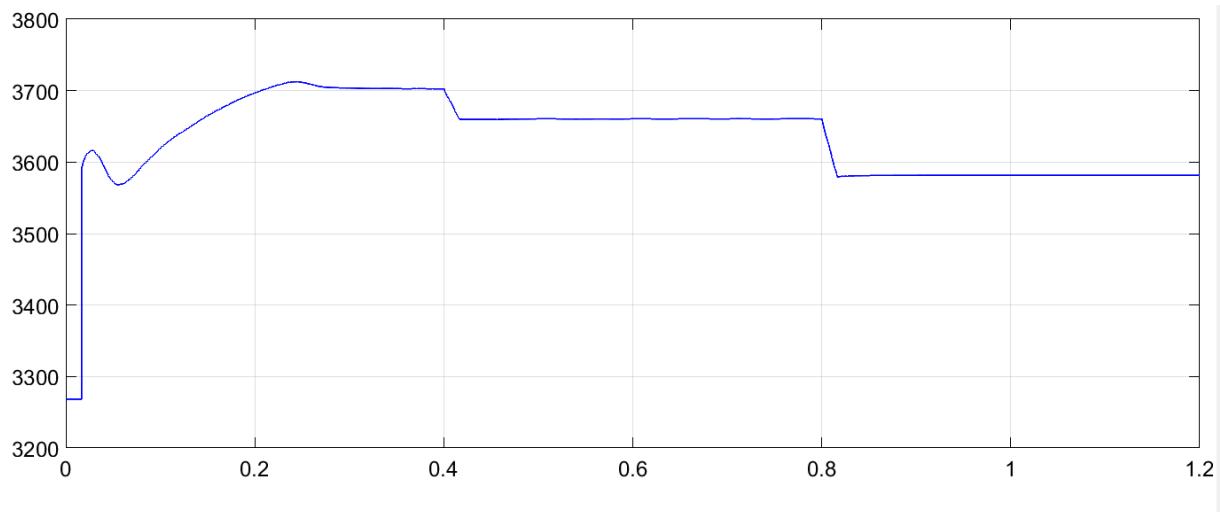
b. Effet sur l'intensité

En revanche, l'intensité (courant de sortie) est fortement influencée par l'irradiance. Une augmentation de l'irradiance entraîne une augmentation proportionnelle du courant produit par le générateur PV

c. Puissance apparente

La puissance apparente en sortie du système augmente avec l'irradiance, même avec une tension presque constante, l'augmentation du courant entraîne une croissance notable de la puissance disponible.

Cas2 : température variable**Figure IV.14** Les variations de la température**Figure IV.15** La tension

**Figure IV.16** L'intensité**Figure IV.17** La puissance apparente

Cas 2 : Température variable

Dans ce second scénario, la température a été modifiée tandis que l'irradiance a été maintenue constante.

a. Effet sur la tension

La température a une influence négative sur la tension de sortie. Plus la température augmente, plus la tension diminue. Cela est dû à l'augmentation du courant de saturation inverse de la diode dans la cellule photovoltaïque, ce qui réduit la tension de seuil

b. Effet sur l'intensité

L'intensité varie très peu avec la température. Elle peut légèrement augmenter en raison d'un effet mineur de l'élévation de température sur le courant photo-généré, mais cette variation reste marginale.

c. Puissance apparente

La puissance apparente diminue avec l'augmentation de la température. Cette baisse est principalement due à la diminution de la tension

IV.5 Conclusion des résultats

Les simulations montrent que :

- L'irradiance affecte principalement l'intensité et donc la puissance générée.
- La température a un effet important sur la tension et donc aussi sur la puissance produite.

Cela confirme les modèles théoriques des cellules photovoltaïques et met en évidence l'importance de contrôler les conditions d'environnement pour maximiser le rendement d'un système photovoltaïque.

IV.6 Simulation du système PV avec hacheur et onduleur en série

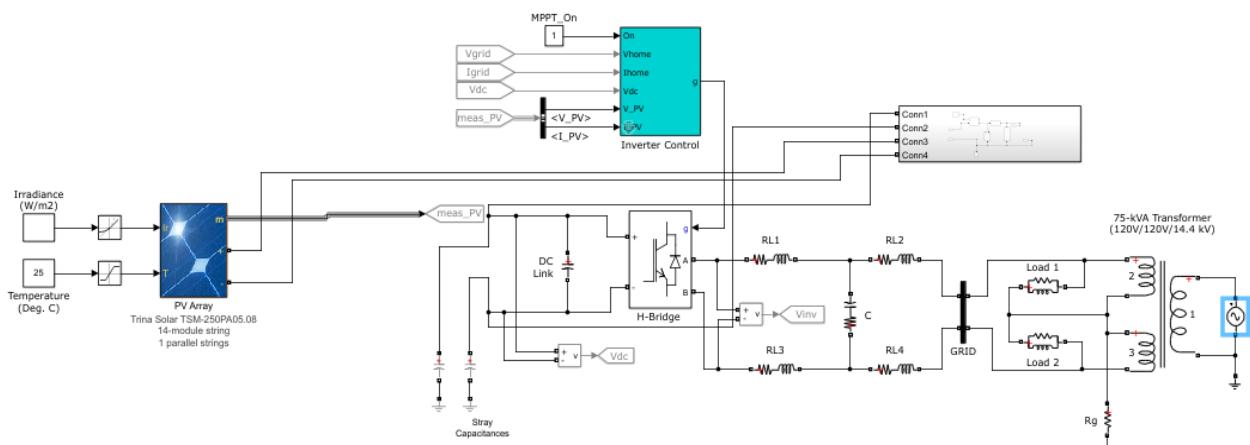


Figure IV.18 Système PV avec hacheur et onduleur en série

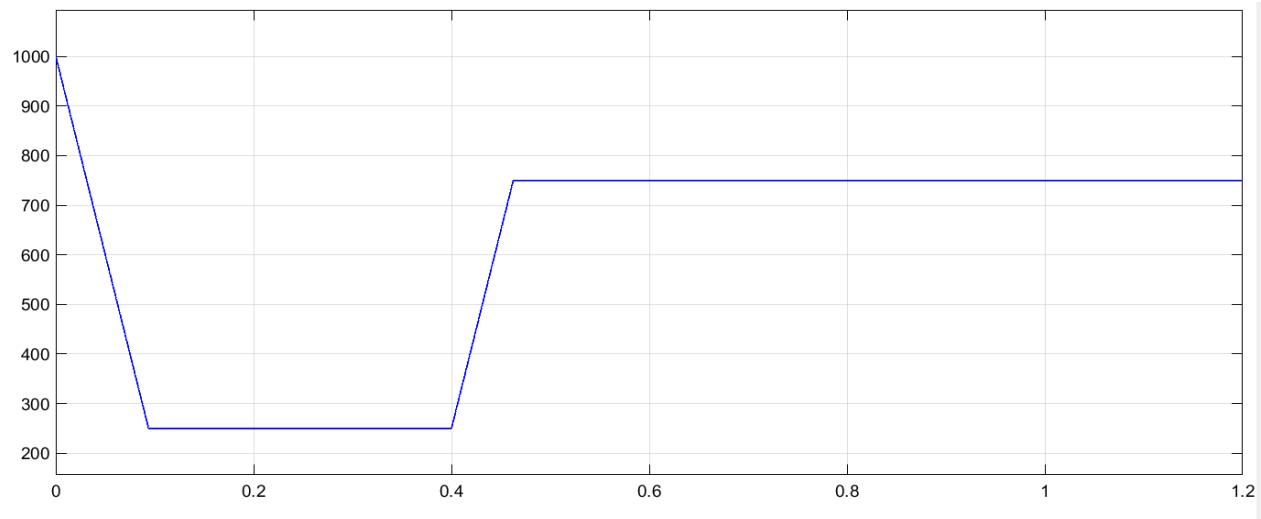


Figure IV.19 Les radiations

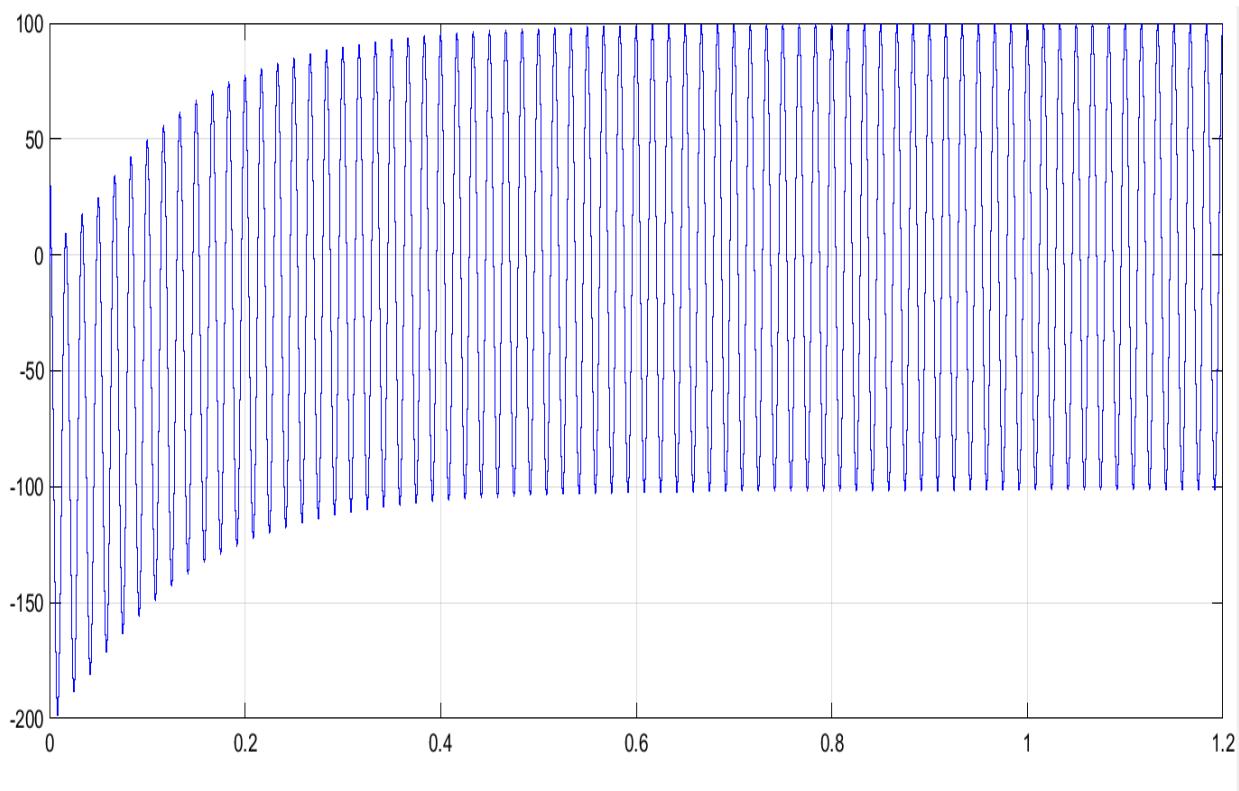


Figure IV.20 les courants

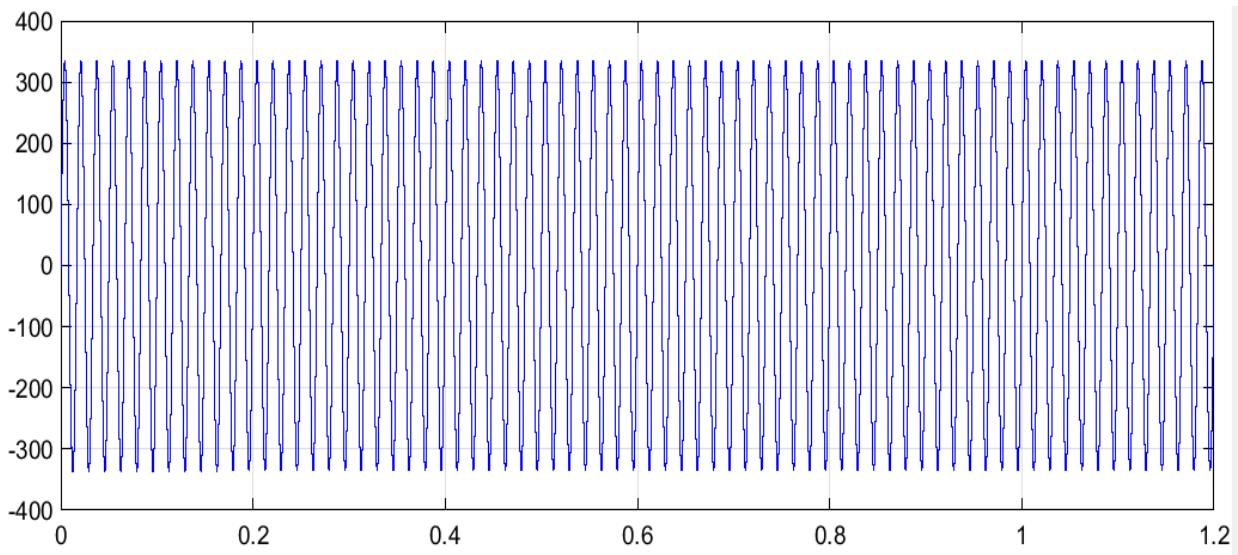


Figure IV.21 les tensions

IV.7 Conclusion

Le chapitre IV a été consacré à la simulation et à l'analyse des performances des systèmes photovoltaïques sous différentes conditions de fonctionnement. Grâce à l'environnement Matlab/Simulink, nous avons pu modéliser et tester plusieurs configurations, notamment l'association des panneaux (série, parallèle, mixte), l'impact des variations d'irradiance et de température, ainsi que l'intégration de convertisseurs DC/DC et d'onduleurs. Les résultats obtenus ont confirmé les principes théoriques abordés dans les chapitres précédents, mettant en évidence l'influence significative des conditions environnementales sur les performances des systèmes photovoltaïques.

Les simulations ont également permis d'illustrer l'importance des techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) pour optimiser la production d'énergie, en particulier dans des conditions variables. Les convertisseurs DC/DC et les onduleurs jouent un rôle crucial dans l'adaptation et la stabilisation de la tension et du courant, assurant ainsi une injection efficace de l'énergie produite dans le réseau ou vers les charges.

En résumé, ce chapitre a démontré la pertinence des outils de simulation pour valider les modèles théoriques et optimiser les systèmes photovoltaïques. Les résultats obtenus ouvrent la voie à des améliorations futures, notamment en termes d'efficacité énergétique et d'intégration dans des environnements réels. Ces travaux constituent une base solide pour la conception et la mise en œuvre de systèmes photovoltaïques performants et adaptés aux besoins énergétiques actuels.



Conclusion générale

Ce mémoire s'inscrit dans une dynamique globale de transition énergétique, marquée par la nécessité de substituer les énergies fossiles par des sources durables et à faible impact environnemental. L'énergie solaire, en particulier la filière photovoltaïque, apparaît comme une solution crédible et prometteuse, capable de répondre à la fois aux enjeux climatiques et aux besoins croissants en électricité.

Dans une première phase, nous avons retracé l'évolution des différentes sources d'énergie, en soulignant la pertinence technologique et environnementale du photovoltaïque. Une attention particulière a été portée aux différentes générations de cellules solaires, de la filière silicium classique aux technologies émergentes telles que les cellules à couches minces, organiques ou à base de pérovskites.

Nous avons ensuite approfondi les mécanismes physiques fondamentaux qui sous-tendent le fonctionnement des cellules photovoltaïques, en examinant les étapes critiques de la conversion photon-électron et la manière dont elles influencent les performances globales du dispositif. Les paramètres électriques caractéristiques (I_{cc} , V_{oc} , FF , η , EQE) ont été étudiés afin de cerner les leviers d'optimisation du rendement.

Enfin, une attention particulière a été portée aux techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT), qui s'avèrent indispensables pour adapter le fonctionnement des modules aux variations d'éclairement et de température. Les simulations ont démontré l'efficacité des différentes stratégies d'association et de conversion dans l'amélioration du rendement énergétique.

En somme, ce travail met en évidence l'importance d'une approche intégrée – alliant connaissance des matériaux, compréhension des phénomènes physiques, électronique de puissance et optimisation algorithmique – pour le développement de systèmes photovoltaïques performants. Les perspectives d'évolution sont encourageantes et confirment que le photovoltaïque, par son potentiel technologique et sa souplesse d'intégration, constitue un pilier essentiel d'un futur énergétique durable.

Liste des symboles

E : Énergie (J)

h : Constante de Planck ($6,63 \times 10^{-34}$ J·s)

c : Vitesse de la lumière (3×10^8 m/s)

λ : Longueur d'onde (m)

v : Fréquence (Hz)

q : Charge élémentaire ($1,602 \times 10^{-19}$ C)

k : Constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K)

T : Température (K)

E_g : Énergie de la bande interdite (eV)

I_ph : Courant photogénéré (A)

I_sc : Courant de court-circuit (A)

V_oc : Tension en circuit ouvert (V)

V_mpp : Tension au point de puissance maximale (V)

I_mpp : Courant au point de puissance maximale (A)

P_mpp : Puissance maximale (W)

FF : Facteur de forme (Fill Factor)

η : Rendement de conversion (%)

EQE : Rendement quantique externe

D : Rapport cyclique

V_i : Tension d'entrée (V)

V_s : Tension de sortie (V)

I_i : Courant d'entrée (A)

I_s : Courant de sortie (A)

R_s : Résistance série (Ω)

R_sh : Résistance shunt (Ω)

MPPT : Suivi du point de puissance maximale

L_D : Longueur de diffusion des excitons (m)

τ : Durée de vie des porteurs (s)

G : Irradiance solaire (W/m^2)

α : Coefficient d'absorption

dI/dV : Dérivée du courant par rapport à la tension

dP/dV : Dérivée de la puissance par rapport à la tension

Bibliographie

- [1] Agence Internationale de l'Énergie (AIE). (2019). *World Energy Outlook 2019*. Paris : International Energy Agency
- [2] GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). (2018). *Climate Change 2018: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. Disponible sur : <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>
- [3] CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives). (s.d.). *Fonctionnement d'une centrale nucléaire*. Disponible sur : <https://www.cea.fr>
- [4] Global Wind Energy Council (GWEC). (2019). *Global Wind Report 2018*. GWEC. Disponible sur : <https://gwec.net/global-wind-report-2018/>
- [5] Global Wind Energy Council (GWEC). (2019). *Global Wind Report 2018*. GWEC. Disponible sur : <https://gwec.net/global-wind-report-2018/>
- [6] EDF. (s.d.). *L'énergie hydraulique et les énergies marines*. Disponible sur : <https://www.edf.fr/groupe-edf/produire-une-energie-plus-propre/lenergie-hydraulique>
- [7] BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières). (2020). *L'énergie géothermique – fonctionnement et usages*. Disponible sur : <https://www.brgm.fr>
- [8] Agence de la transition écologique (ADEME). (2021). *L'énergie solaire : fonctionnement, types de centrales et perspectives*. Disponible sur : <https://www.ademe.fr>
- [9] Becquerel, A. (1839). *Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires*. Comptes rendus de l'Académie des Sciences, 9, 561-567.
- [10] Becquerel A., 1839. Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 9, 561-567.
- Smith W., 1873. On the photographic properties of selenium. *The Electrician*, 10, 57–59.
- [11] Millikan, R. A., 1916. Production of electricity by a solar cell. (*Source historique, souvent citée dans des revues d'histoire de la physique*).
- Chapin, D. M., Fuller, C. S., & Pearson, G. L., 1954. A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power. *Journal of Applied Physics*, 25(5), 676–677.
- [12] REN21, 2020. *Renewables 2020 Global Status Report*. <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/>.
- International Energy Agency (IEA), 1980s-1990s. Historical reports on solar energy adoption and policy incentives.

- [13] Green, M. A., 2012. *Third Generation Photovoltaics: Advanced Solar Energy Conversion*. Springer.
- Volta, A., 1800. *On the electricity excited by the mere contact of conducting substances of different kinds*. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 90, 403-431.
- [14] Green, M. A., 2012. *Third Generation Photovoltaics: Advanced Solar Energy Conversion*. Springer.
- King, R. R., Bhusari, D., Knight, J. C., et al., 2019. Solar cell efficiency tables (Version 53). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 27(1), 3–12.
- [15] Green, M. A., Dunlop, E. D., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., Kopidakis, N., & Hao, X., 2023. Solar cell efficiency tables (version 63). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 31(1), 3-15. <https://doi.org/10.1002/pip.3480>
- [16] Köhler, A., & Bässler, H., 2015. *Electronic Processes in Organic Semiconductors: An Introduction*. Wiley-VCH.
- [17] Yu, P. Y., & Cardona, M., 2010. *Fundamentals of Semiconductors: Physics and Materials Properties* (4th ed.). Springer.
- [18] Köhler, A., & Bässler, H., 2015. *Electronic Processes in Organic Semiconductors: An Introduction*. Wiley-VCH.
- [19] Green, M. A., 2019. *Solar Cells: Operating Principles, Technology and System Applications* (2nd ed.). Prentice Hall
- [20] Liu, F., & Yang, Z., 2011. *Maximum Power Point Tracking (MPPT) Techniques for Photovoltaic Systems: A Review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 578–588.
- [21] Luque, A., & Hegedus, S. (Eds.), 2011. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering* (2nd ed.). Wiley.
- [22] Rashid, M. H., 2014. *Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications* (4th ed.). Pearson.
- [23] Esram, T., & Chapman, P. L., 2007. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 22(2), 439–449.
- Patel, H., & Agarwal, V., 2008. MATLAB–Simulink based study of photovoltaic arrays in partial shaded conditions. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 23(1), 302–310.
- [24] Rafeek, A. T., & Suresh Kumar, M., 2015. Neural Network Based Maximum Power Point Tracking Controller for Photovoltaic System. *International Journal of Computer Applications*, 126(10), 21-26.

- [25] Rahman, M. M., Islam, M. R., & Miyatake, M., 2014. Overview of maximum power point tracking technologies for photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 192-203.
- [26] Esram, T., & Chapman, P. L., 2007. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 22(2), 439–449.
- [27] Luque, A., & Hegedus, S. (Eds.), 2011. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering* (2nd ed.). Wiley.
- [28] Esram, T., & Chapman, P. L., 2007. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 22(2), 439–449.
- [29] Liu, F., & Yang, Z., 2011. Maximum power point tracking (MPPT) techniques for photovoltaic systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 578–588.
- Luque, A., & Hegedus, S. (Eds.), 2011. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering* (2nd ed.). Wiley
- [30] Patel, H., & Agarwal, V., 2008. MATLAB–Simulink based study of photovoltaic arrays in partial shaded conditions. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 23(1), 302–310.
- Rashid, M. H., 2014. *Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications* (4th ed.). Pearson.
- [31] Villalva, M. G., Gazoli, J. R., & Filho, E. R., 2009. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(5), 1198-1208.
- [32] Mahmoud, M. S., 2016. *Power Electronics for Renewable Energy Systems, Transportation and Industrial Applications*. Wiley.
- [33] Liu, F., & Yang, Z., 2011. Maximum power point tracking (MPPT) techniques for photovoltaic systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 578–588.
- [34] Jain, S., & Agarwal, V., 2007. A new algorithm for rapid tracking of approximate maximum power point in photovoltaic systems. *IEEE Power Electronics Letters*, 4(1), 4–7.
- [35] Tsaousoglou, M., & Papathanassiou, S., 2013. Fuzzy logic-based maximum power point tracking controller for photovoltaic systems. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 4(1), 140–148.
- [36] Rezaei, N., Mohammadi, M., & Askarzadeh, A. (2019). Maximum power point tracking of photovoltaic systems using fuzzy logic control: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 103, 122–135.