

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية
Université de Ghardaïa

N° d'enregistrement



كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
قسم الآلية والكهروميكانيك
Département d'automatique et électromécanique

Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme

Licence professionnelle

Domaine : Sciences et technologies,
Filière : Energies renouvelables
Spécialité : Energies renouvelables et environnement

Thème

Étude et Optimisation des Performances d'un Générateur Photovoltaïque

Présenté par :
Manal LAMECHE – Fatima Zohra BENAROUS – Chaïmaa SENOUCI

Soutenue publiquement le 20/05/2025

Devant le jury composé de :

Mohcen BACHAOUET	Professeur	Université de Ghardaïa	Président(e)
Abdelhak BOUCHA-KOUR	Directeur de recherche	URAER	Encadreur
Noureddine BENBA-HA	MRB	URAER	Co-encadreur
Charef Abdelkrim MOSBAH	MCA	Université de Ghardaïa	Examineur

Année universitaire 2024/2025

ملخص

على الإشعاع الشمسي ودرجة حرارة (PVG) للمولد الكهروضوئي (PV) وخصائص جهد-الطاقة (IV) تعتمد خصائص شدة-الجهد الخلية ، ولكن أيضًا على الشيخوخة الإجمالية للمولد الكهروضوئي. لهذه الأسباب ، يمكن للمولد الكهروضوئي فقط توفير أقصى طاقة لجهد معين وتيار التي تجعل من الممكن تعظيم الكفاءة الإجمالية للمولد الكهروضوئي استنادًا MPPT محدد جيدًا. يتعلق الهدف الرئيسي من هذا العمل بدراسة عملية يتكون نظامنا من المولد الكهروضوئي ، محول . "P&O" و طريقة الإزعاج والملاحظة "INC" إلى خوارزميات التحسين التقليدية مثل زيادة التوصيل يعتبر مرحلة تكيف بين المولد الكهروضوئي والحمل. تتم مقارنة النتائج المعروضة لتحديد طريقة التحسين الأكثر فعالية من حيث DC / DC تعزيز الأداء والسرعة والاستقرار.

INC ، P&O ، MPPT ، DC / DC ، محول PV الكلمات مفتاحية: مولد

Résumé

Les caractéristiques intensité-tension (IV) et puissance-tension (PV) d'un générateur photovoltaïque (GPV) dépendent de l'irradiation solaire et de la température des cellules, mais aussi du vieillissement global du GPV. Pour ces raisons, le GPV ne peut fournir une puissance maximale que pour une tension particulière et un courant bien déterminé. L'objectif principal de ce travail porte sur l'étude d'un procédé MPPT qui permet de maximiser le rendement global d'un GPV basé sur des algorithmes d'optimisation conventionnelles telles que l'incrémentation de la conductance 'INC' et la méthode perturbation et observation 'P&O'. Notre système est constitué d'un GPV, un convertisseur DC/DC boost considéré comme un étage d'adaptation entre le GPV et de la charge. Les résultats présentés sont ensuite comparés pour déterminer la méthode d'optimisation la plus efficace en termes de rendement, de rapidité et de stabilité.

Mots clés : Générateur PV, convertisseur DC/DC, MPPT, P&O, INC

Abstract

The current-voltage (IV) and power-voltage (PV) characteristics of a photovoltaic generator (PVG) depend on solar irradiation and cell temperature, as well as the overall aging of the PVG. For these reasons, the PVG can only deliver maximum power for a specific voltage and a specific current. The main objective of this work is to study an MPPT method that maximizes the overall efficiency of a PVG based on conventional optimization algorithms such as conductance incrementation (INC) and the perturbation and observation (P&O) method. Our

system consists of a PVG, a DC/DC boost converter considered as a matching stage between the PVG and the load. The results presented are then compared to determine the most effective optimization method in terms of efficiency, speed, and stability.

Key words: PV generator, DC/DC converter, MPPT, P&O, INC

Remerciements

À ceux qui ont été la lumière qui a illuminé notre chemin, et le soutien qui a renforcé notre détermination dans la quête du savoir.

À nos chers parents, qui ont semé en nous l'amour de l'apprentissage, et nous ont offert tendresse et sacrifices sans limites... À vous, nous dédions le fruit de ce parcours, car vous êtes l'origine, le cœur, et la fierté de toute réussite.

À nos frères, sœurs et proches bien-aimés, qui ont été pour nous un appui solide à chaque étape, et les partenaires sincères de notre joie aujourd'hui.

À nos amis et compagnons de route, avec qui nous avons partagé les efforts, les ambitions et le plaisir de cette réussite.

À notre chère grand-mère : Ton âme bienveillante continue de nous accompagner, tes prières sincères et ton amour constant ont toujours été notre force... À ta mémoire pure, nous écrivons et te dédions ce travail avec fidélité et amour éternels.

À notre honorable encadrant, Mr : **Abdelhak Bouchakour** , qui a été bien plus qu'un superviseur scientifique : un modèle de savoir, d'éthique et d'humilité... Toute notre gratitude pour vos conseils éclairés, votre patience et votre soutien indéfectible.

Nous adressons également nos sincères remerciements aux membres du jury, qui nous ont honorés par leur présence et l'évaluation de ce travail, ainsi que par leurs remarques enrichissantes qui restent une source d'inspiration pour aller plus loin.

Nous dédions ce modeste travail à tous ceux qui ont marqué notre parcours, ne serait-ce que par un mot ou une prière.

Table des matières

Remerciements	iii
Résumé	Error! Bookmark not defined.
Table des matières	Error! Bookmark not defined. ii
Liste des figures.....	iv
Liste des tableaux	vii
Liste des abréviations	viii
Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : État de l'art des systèmes photovoltaïques	5
1.1 Introduction.....	5
1.2 La demande énergétique mondiale	5
1.3 Production d'électricité à partir de sources renouvelables dans le monde.....	6
1.4 Situation actuelle et perspectives d'avenir.....	8
1.5 Production d'électricité d'origine renouvelable en Algérie.....	8
1.6 Potentiel solaire en Algérie.....	11
1.7 Le principe de l'effet PV.....	11
1.8 Technologies des cellules PV.....	12
1.8.1 Technologie de la 1ère génération : cellules cristallines.....	12
1.8.2 Technologie de la 2ème génération : couches minces "thin films".....	13
1.8.3 Technologie de 3ème génération : multi-jonction, concentration.....	14
1.9 Rendement énergétique des différents types de cellules PV.....	15
1.10 Classification des systèmes PV.....	15
1.11 Les avantages et les inconvénients de l'énergie PV.....	17
1.11.1 Les Avantages.....	17
1.11.2 Les Inconvénients.....	18
1.12 Conclusion	19
Chapitre 2 : Générateur photovoltaïque	20
2.1 Introduction	20
2.2 Modélisation de la chaîne de conversion PV.....	20
2.2.1 Modèle électrique d'une cellule PV.....	21
2.2.2 Paramètres externes d'une cellule PV.....	22
2.3 Association des cellules solaires, module PV.....	24

2.3.1 Association en série.....	24
2.3.2 Association en parallèle.....	25
2.3.3 Association série/parallèle.....	25
2.4 Caractéristiques I(V) et P(V) d'un module PV.....	26
2.5 Influence de l'éclairement sur la caractéristique IV et PV.....	27
2.6 Influence de la température sur la caractéristique IV et PV.....	27
2.7 Influence de l'ombrage sur les caractéristiques d'un module PV.....	28
2.8 Système de protection des modules PV.....	29
2.9 Conclusion.....	31
Chapitre 3 : Maximisation de la puissance d'un générateur Pv.....	32
3.1 Introduction.....	32
3.2 Connexion directe entre le GPV et la charge.....	32
3.3 Synthèse des techniques de suivi du point maximale de puissance (MPPT).....	33
3.3.1 Principe de fonctionnement du MPPT.....	34
3.3.2 Méthode de Perturbation et Observation (PPM).....	34
3.3.3 Méthode de la Conductance Incrémentale (INC).....	35
3.4 Simulation et interprétation des résultats.....	37
3.4.1 Caractéristiques sous les conditions STC ($T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $G=1000\text{ W/m}^2$).....	39
3.4.2 Caractéristiques sous irradiation solaire variable.....	40
3.4.2.1 Puissance transmise à la charge.....	41
3.4.2.2 Résultats de l'évolution de l'algorithme P&O.....	42
3.4.2.3 Résultats de l'évolution de l'algorithme INC.....	43
3.4.3 Caractéristiques sous température variable.....	44
3.4.3.1 Résultats de l'évolution de l'algorithme P&O.....	45
3.5 Conclusion.....	46
Conclusion générale.....	47
Bibliographies.....	49

Liste des figures

Figure1-1 : Part de l'énergie renouvelable dans la production mondiale d'électricité.....	6
Figure1-2 : Production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde.....	8
Figure1-3 : Le principe de l'effet PV.....	12
Figure1-4 : Cellules cristallines.....	13
Figure1-5 : Cellule à couche mince.....	13
Figure1-6 : Cellules multi-jonction et à concentration.....	14
Figure1-7 : Système PV raccordé au réseau.....	16
Figure1-8 : Système PV autonome.....	16
Figure1-9 : Système hybride (4 sources).....	17
Figure2-1 : Système de conversion PV étudié.....	20
Figure2-2 : Circuit équivalent de la cellule solaire.....	21
Figure2-3 : Courant de court-circuit I_{co}	22
Figure2-4 : Tension de circuit ouvert V_{co}	22
Figure2-5 : Influence des résistances shunt et série sur la caractéristique $I(V)$ de PV.....	23
Figure2-6 : Évolution des constructions des systèmes de production PV.....	24
Figure2-7 : Cellules en série.....	25
Figure2-8 : cellule en parallèle.....	25
Figure2-9 : Connexion en association série/parallèle.....	26
Figure2-10 : Caractéristique IV et PV du module PV.....	27
Figure2-11 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique IV du GPV.....	27
Figure2-12 : Influence de la température sur la caractéristique IV, PV.....	28
Figure2-13 : Configuration d'un module PV sous ombrage partiel.....	28
Figure2-14 : Caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ en fonctionnement normal et sous ombrage.....	29
Figure2-15 : Structure d'un GPV protégé par des diodes (by-pass et anti-retour.....	29
Figure2-16 : Fonctionnement de la diode de bypass en présence d'ombrage.....	30
Figure2-17 : Position de la diode de bypass.....	30
Figure3-1 : Connexion directe entre le GPV et la charge via une diode anti-retour.....	32
Figure3-2 : Schéma électrique du hacheur Boost.....	33
Figure3-3 : Caractéristiques IV, PV et trajectoire PPM.....	34
Figure3-4 : Schéma synoptique du couplage PV/MPPT.....	34
Figure3-5 : Organigramme de l'algorithme P&O.....	35
Figure3-6 : Variation de dP/dV dans la caractéristique PV.....	36
Figure3-7 : Organigramme de l'algorithme INC.....	37
Figure3-8 : Résultats de l'évolution de l'algorithme P&O dans des conditions STC.....	39
Figure3-9 : Résultats de l'évolution de l'algorithme INC dans des conditions STC.....	40
Figure3-10 : Variation de l'irradiation solaire.....	41
Figure3-11 : Résultats de l'évolution de l'algorithme P&O des grandeurs de la charge.....	41
Figure3-12 : Résultats de l'évolution de l'algorithme INC des grandeurs de la charge.....	42
Figure3-13 : Résultats de l'évolution de l'algorithme P&O sous irradiation variable.....	43
Figure3-14 : // de l'évolution de l'algorithme INC sous irradiation solaire variable.....	43-44
Figure3-15 : Variation de la température.....	44
Figure3-16 : Résultats de l'évolution de l'algorithme P&O sous température variable.....	45
Figure3-17 : Résultats de l'évolution de l'algorithme INC sous température variable.....	45

Liste des tableaux

Tableau 1-1 : Production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde.....	7
Tableau 1-2 : Projet solaire 1000 des centrales PV connectées au réseau électrique	9
Tableau 1-3 : Projet solaire 2000 affecté au Groupement chinois CWE-HXCC-YRED.....	10
Tableau 1-4 : Reste du Projet solaire 2000 affecté à autre Groupement	10
Tableau 1.5 : Potentiel solaire en Algérie.....	11
Tableau 1.6 : Comparaisons de rendement des différentes technologies de modules PV.....	14
Tableau 3-1 : Conception du système solaire PV.....	38
Tableau 3-2 : Caractéristiques du panneau PV sous STC.....	38
Tableau 3-3 : Conception du hacheur boost.....	38
Tableau 3-4 : Tableau comparatif entre les deux algorithmes MPPT.....	46

Liste des notations

Symbol	Designation
G	Rayonnement solaire (W/m^2).
I_0	Courant de saturation de la diode (A).
I_{ph}	Photo-courant (A).
I_{max}	Courant maximal (A).
I_{sc}	Courant de court-circuit (A).
FF	Facteur de forme
N_s	Nombre de module en série
N_p	Nombre de module en parallèle
V_{PV}	Tension du GPV (V)
I_{PV}	Courant GPV (A)
P_0	Puissance incidente sur le GPV
i_L	Courant du Convertisseur DC/DC
C_{PV}	Capacité du Convertisseur DC/DC
R_s	Résistance série (Ω)
T	Température de la cellule ($^{\circ}\text{K}$)
T_{ref}	Température de référence de la cellule ($^{\circ}\text{K}$)
V_{oc}	Tension du circuit ouvert (V)
K	Constante de Boltzmann $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
N	Facteur d'idéalité de la diode
μ_{Isc}	Coefficient de température du courant de court-circuit ($\text{A}/^{\circ}\text{C}$)
P_{PV}	Puissance du générateur PV (W)
q	Charge d'électron $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$.

Introduction générale

Le besoin de l'homme en énergie pour satisfaire ses besoins a conduit à sa production par un processus de conversion des ressources naturelles en formes exploitables. Cependant, l'augmentation continue de la population et la croissance industrielle ont poussé le monde à exploiter cette énergie de manière intensive.

Les énergies fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel) représentent 80 % de la production primaire sur laquelle le monde a compté pendant des décennies. Ce sont des ressources non renouvelables qui se sont formées au cours de millions d'années par la dégradation de matières organiques sous haute pression et température, ce qui les rend faciles à extraire et à utiliser [1-2].

Ces sources ont joué un rôle essentiel dans la révolution industrielle et ont contribué au développement économique mondial de manière inédite, en fournissant des quantités massives d'énergie avec une grande efficacité. Cependant, la forte dépendance aux énergies fossiles rencontre de nombreux obstacles, les plus importants étant l'épuisement de ces ressources et les effets environnementaux négatifs résultant des émissions de gaz, du réchauffement climatique et des changements climatiques.

Dans ce contexte des défis environnementaux et économiques auxquels le monde fait face aujourd'hui, les énergies renouvelables sont devenues la solution idéale pour parvenir à un équilibre entre la satisfaction des besoins énergétiques de l'humanité et la préservation de l'environnement. Elles sont considérées comme une solution vitale, car elles proviennent de sources naturelles durables et inépuisables, telles que le soleil, le vent, l'eau et la biomasse. Ces sources se distinguent par leur caractère écologique, car elles ne génèrent pas d'émissions nuisibles contribuant au changement climatique. Ainsi, les énergies renouvelables varient à travers le monde en fonction des technologies utilisées et des ressources naturelles disponibles dans chaque région. Parmi les plus importantes, on trouve : l'énergie solaire, hydraulique, biomasse et géothermique.

La diversité de ces sources offre une grande opportunité pour le monde de réduire sa dépendance aux combustibles fossiles, de limiter la pollution environnementale et d'atteindre la durabilité. C'est ainsi que réside l'importance des énergies renouvelables, considérées comme la base d'un avenir reposant sur des ressources propres et sûres qui répondent aux besoins des générations futures [3-4].

Dans le contexte de l'intérêt croissant pour les énergies renouvelables et des recherches continues pour leur développement, l'énergie photovoltaïque (PV) est l'une des principales sources d'énergie renouvelable qui a connu une large diffusion et un développement significatif au niveau mondial au cours des dernières décennies. Cette technologie repose sur la conversion directe de la lumière du soleil en énergie électrique à l'aide de cellules solaires, ce qui en fait une solution prometteuse pour relever les défis environnementaux et énergétiques auxquels le monde fait face aujourd'hui.

Les systèmes PV se sont imposés comme l'une des solutions les plus optimales et les plus durables, respectueuses de l'environnement, contribuant à réduire la dépendance aux combustibles fossiles et à limiter les émissions de gaz à effet de serre. Grâce aux progrès technologiques et à la baisse des coûts de production des panneaux solaires, ces systèmes sont devenus plus efficaces et moins coûteux, ce qui en fait un choix économique et écologique idéal. L'énergie PV est utilisée dans une large gamme d'applications, allant de la production d'électricité pour les foyers aux grandes centrales électriques, ce qui renforce son rôle en tant que source d'énergie propre et durable [5].

L'Algérie est l'un des pays leaders dans le monde arabe et en Afrique en matière de grandes potentialités dans le domaine des énergies renouvelables, grâce à sa position géographique privilégiée et à la diversité de ses ressources naturelles. Elle s'efforce de diversifier ses sources d'énergie en misant sur les énergies propres et renouvelables pour réaliser un développement durable et garantir la sécurité énergétique.

Parmi les ressources énergétiques renouvelables les plus importantes de notre pays se trouve l'énergie solaire, grâce à sa vaste superficie désertique et à ses taux de rayonnement solaire parmi les plus élevés au monde, ce qui fait de l'énergie solaire la source d'énergie la plus fiable. En tant que don naturel disponible partout, l'énergie solaire repose sur l'exploitation des rayons du soleil et leur conversion en différentes formes, qu'elles soient thermiques ou électriques.

Parmi les techniques d'exploitation de l'énergie solaire, l'énergie PV se distingue comme étant la plus utilisée et répandue. Cette technologie repose sur la conversion directe de la lumière du soleil en énergie électrique à l'aide de cellules PV, où les photons provenant des rayons solaires libèrent des électrons dans le matériau semi-conducteur, générant ainsi un courant électrique qui peut être utilisé immédiatement ou stocké [6-7].

Bien qu'elle soit l'une des meilleures sources d'énergie renouvelable, avec sa disponibilité et sa propreté, l'énergie solaire fait face à plusieurs défis qui affectent son efficacité et sa durabilité. Parmi ces défis, on trouve :

La variabilité de l'irradiation solaire :

La production d'énergie est affectée par les conditions climatiques changeantes, telles que la pluie, les nuages ou l'angle de l'irradiation solaire entre le jour et la nuit. L'efficacité réduite :

- L'efficacité des panneaux solaires n'est pas idéale et peut être affectée par des températures élevées et la poussière.
- Le coût élevé du stockage : L'énergie solaire dépend du stockage de l'électricité pour une utilisation nocturne ou en l'absence de soleil, ce qui augmente les coûts d'exploitation.

Face à cette évolution constante de la technologie solaire, il est devenu nécessaire d'améliorer l'efficacité des systèmes utilisés pour convertir l'énergie solaire en électricité, notamment avec les défis liés aux conditions environnementales et à l'irradiation solaire. C'est ainsi que sont apparus des systèmes de contrôle avancés, parmi lesquels le système de suivi du point maximal (MPPT), qui vise à maximiser l'utilisation des panneaux solaires, quelle que soit l'évolution des conditions.

Le système MPPT (Maximum Power Point Tracking) repose sur des techniques efficaces pour suivre le point de fonctionnement optimal des panneaux solaires, afin d'extraire la puissance électrique maximale possible. Parmi les méthodes utilisées pour atteindre cet objectif, on trouve :

- La méthode P&O (Perturb and Observe) : C'est l'une des méthodes les plus utilisées, qui consiste à introduire des variations de tension et à observer leur impact sur la puissance produite.
- La méthode INC (Incremental Conductance) : Elle repose sur le calcul précis des variations du courant et de la tension pour déterminer le point de puissance maximale.

Dans ce mémoire, nous avons appliqué deux méthodes MPPT classiques, la méthode de perturbation et d'observation (P&O) et la méthode de conductance incrémentale (INC) pour la recherche du point de puissance maximale sous des variations des conditions météorologiques (luminosité et température). Cette comparaison consiste à étudier les performances de ces contrôleurs MPPT (temps de réponse et ondulation) autour du point de puissance optimal. La méthode (INC) montre qu'elle a de meilleures performances par rapport à la méthode (P&O), une très faible erreur en régime permanent, une absence d'ondulation autour du MPP et qu'elle est robuste aux différentes variations des conditions atmosphériques.

Chapitre 1 : État de l'art des systèmes PV

1.1 Introduction

La consommation énergétique mondiale est principalement assurée par des énergies non renouvelables (fossiles). En raison du fait que ces dernières sont épuisables, des stratégies énergétiques sont mises en œuvre, visant à accroître l'efficacité du système électrique, à réduire les déchets et à passer à des sources d'énergie renouvelables (hydraulique, éolienne, solaire, houle, biomasse, géothermie, marémotrice). Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie qui peuvent être reconstituées suffisamment rapidement pour être considérées comme inépuisables à l'échelle humaine. Les systèmes PV permettent d'exploiter l'énergie du soleil pour une variété d'utilisations ; ils sont fiables et fournissent une source d'électricité non polluante qui peut être utilisée pour une variété de choses [8] [1].

Ce chapitre a pour objectif de fournir une vue d'ensemble sur les technologies PV dans le monde, en se concentrant sur la demande mondiale en énergie et les dernières évolutions techniques dans ce domaine. Il met également en lumière les efforts déployés en Algérie pour développer ces systèmes et exploiter leur potentiel considérable, tout en analysant les défis liés à leurs applications en termes d'avantages et d'inconvénients.

1.2 La demande énergétique mondiale

Le monde connaît aujourd'hui une augmentation croissante de la demande en énergie, stimulée par la croissance démographique rapide et l'expansion industrielle et technologique. L'énergie constitue un élément vital pour répondre aux besoins de la vie quotidienne, allant de l'alimentation des maisons et des usines au soutien des systèmes de transport et de communication [3].

La majorité de l'électricité produite dans le monde provient de la décomposition de combustibles fossiles (pétrole, charbon ou gaz naturel) ou de combustibles nucléaires, qui représentent la plus grande part de la production mondiale. Néanmoins, ces sources font face à d'importants défis, tels que la limitation des ressources naturelles et leurs impacts négatifs sur l'environnement [9] [5]. Face à ces défis, le monde connaît une transition progressive vers l'adoption des énergies renouvelables, telles que l'énergie solaire, l'énergie éolienne et l'énergie

hydraulique, considérées comme des solutions plus durables et respectueuses de l'environnement pour répondre à la demande croissante en énergie Figure (1.1) :

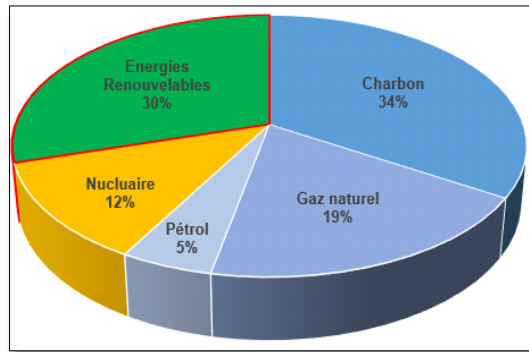


Figure 1.1 : Part de l'énergie renouvelable dans la production mondiale d'électricité

1.3 Production d'électricité à partir de sources renouvelables dans le monde

La production d'électricité à partir de sources d'énergie renouvelable dans le monde représente une transformation radicale du système énergétique, constituant une alternative durable et écologique aux sources d'énergie traditionnelles telles que les combustibles fossiles. Elle contribue à la durabilité environnementale et économique en utilisant des sources d'énergie naturelles. Avec les progrès technologiques et l'amélioration continue de l'efficacité, les énergies renouvelables sont devenues la principale option pour répondre à la demande croissante d'électricité sans nuire à l'environnement ni épuiser les ressources naturelles [10-11].

Les principales sources d'énergie renouvelable pour la production d'électricité se résume :

- **L'énergie solaire** : On distingue deux voies technologiques principales pour la production d'électricité d'origine solaire : la production thermodynamique, aussi appelée solaire thermique à concentration, et la production PV. La concentration solaire nécessite des ciels clairs et secs (climat tropical sec) où l'ensoleillement direct est important : les zones les plus favorables sont l'Afrique du Nord et le Sud-ouest en Europe. Le principe général de cette technologie repose sur la concentration des rayons du soleil à l'aide de miroirs dans le but de chauffer des fluides caloporteurs à haute température (de 400 à 1000°C).

La production PV utilise la lumière du soleil pour la transformer en électricité au moyen de cellules, majoritairement à base de silicium. Le silicium est fabriqué à partir de la silice (notamment présente dans le sable), une matière abondante sur terre. Ainsi quand la lumière pénètre le silicium, elle apporte de l'énergie sous forme de photons. Les photons vont communiquer leur énergie aux atomes de silicium, conduisant à la création de charges

électriques. Les électrons de la zone dopée au phosphore vont rejoindre les trous de la zone dopée au bore via la connexion extérieure. Ils sont alors collectés par les grilles en métal. Au passage, leur déplacement crée un courant électrique.

- **L'énergie éolienne :** L'énergie éolienne est une source d'énergie renouvelable importante utilisée pour convertir le vent en électricité via des éoliennes. L'énergie éolienne est l'une des sources d'énergie renouvelable à la croissance la plus rapide au monde, fournissant environ 10 % de l'électricité produite mondialement. Les pays leaders, tels que la Chine, les États-Unis, l'Allemagne et l'Inde, possèdent les plus grands projets de production d'électricité à partir de l'énergie éolienne.
- **L'énergie hydroélectrique :** L'énergie hydroélectrique est l'une des sources d'énergie renouvelable les plus anciennes et les plus utilisées pour produire de l'électricité, où le mouvement de l'eau dans les barrages ou les rivières est converti en électricité. Les pays leaders dans ce domaine comprennent le Canada, le Brésil, la Norvège, la Chine et les États-Unis. L'énergie hydroélectrique représente environ 16 % de la production mondiale d'électricité.
- **La biomasse :** L'énergie de la biomasse repose sur la conversion de matériaux organiques, tels que les restes de plantes et d'animaux, en électricité, par combustion ou conversion en gaz de biomasse. Cette technologie est utilisée dans certains pays pour produire à la fois de l'électricité et de la chaleur. La biomasse fournit environ 2 à 3 % de la production mondiale d'électricité, les principaux pays utilisateurs étant les membres de l'Union européenne, les États-Unis et le Brésil.
- **L'énergie géothermique :** L'énergie géothermique exploite la chaleur provenant du sous-sol terrestre pour produire de l'électricité, et ce type d'énergie est principalement utilisé dans les régions volcaniques ou à forte chaleur géothermique. Les principaux pays dans ce domaine comprennent l'Islande, les États-Unis, les Philippines et la Nouvelle-Zélande. L'énergie géothermique reste une source relativement petite d'énergie renouvelable, mais elle est importante pour certains pays avancés dans ce domaine

tableau (1.1)

Tableau 1.1 : Production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde

Sources	En Gégà watt	En pourcents
L'énergie hydroélectrique	1233	40.14 %
L'énergie solaire	855	27.83 %
L'énergie éolienne	824	26.82 %
L'énergie marine	0.6	0.02 %
La biomasse	143	4.65%

L'énergie géothermique	16	0.52%
Totale	3071.6 GW	

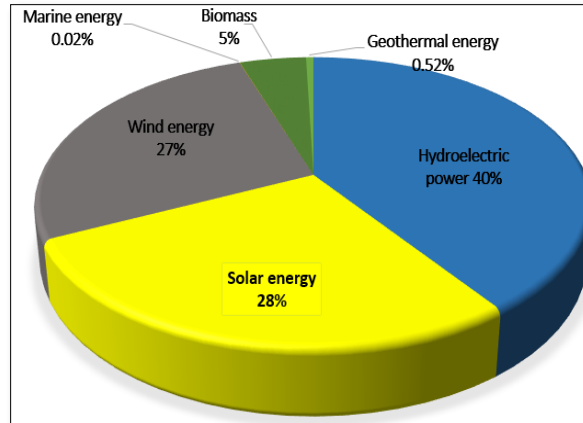


Figure 1.2 : Production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde

1.4 Situation actuelle et perspectives d'avenir

En 2023, la capacité installée des énergies renouvelables a dépassé les 3 000 gigawatts dans le monde [11], ce qui reflète l'augmentation des investissements dans ce secteur, soutenus par des politiques gouvernementales et une prise de conscience environnementale croissante. Les énergies renouvelables représentent environ 30 % de la production mondiale d'électricité, avec une poursuite de cette croissance attendue en raison des innovations technologiques et du soutien gouvernemental. Cette transition ne se limite pas seulement à l'amélioration de l'environnement, mais contribue également à la création de nouvelles opportunités d'emploi et au renforcement de la croissance économique, favorisant ainsi le développement durable à long terme.

L'expansion de l'utilisation des énergies renouvelables constitue un pilier fondamental pour réaliser un avenir énergétique propre et durable, et représente une étape importante vers la réduction des émissions de carbone et la réalisation des objectifs environnementaux mondiaux.

1.5 Production d'électricité d'origine renouvelable en Algérie

Les énergies renouvelables en Algérie représentent un pilier fondamental pour atteindre un développement durable et diversifier l'économie nationale en dehors des combustibles fossiles. Avec la poursuite de l'amélioration des infrastructures et le développement des technologies locales, il est prévu que les énergies renouvelables jouent un rôle clé dans l'approvisionnement énergétique de l'Algérie et garantissent sa durabilité à long terme, tout en renforçant la position de l'Algérie en tant que principal fournisseur d'énergie propre dans la région [12-13].

Selon le Programme algérien de développement des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique (PNEREE) de 2012, l'Algérie vise une puissance installée d'origine renouvelable de 22 000 MW d'ici 2030 dont 12 000 MW seront dédiés à couvrir la demande nationale en électricité et 10 000 MW à l'exportation.

Le nouveau programme précise les objectifs d'installation à l'horizon 2030 :

- 13 575 MW c de solaire PV;
- 5 010 MW c d'énergie éolienne ;
- 2 000 MW c de solaire thermodynamique (CSP) ;
- 1 000 MW c de biomasse (valorisation des déchets) ;
- 400 MW c de cogénération ;
- 15 MW c d'énergie géothermique.

Au total, 22 GW sont nécessaires, d'ici 2030, les énergies renouvelables représenteront 37 % de la capacité installée et 27 % de la production d'électricité pour la consommation nationale. Le groupe Sonlgaz a réalisé des investissements dans des sources d'énergie nouvelles et renouvelables. L'entreprise propose de construire 67 projets de centrales solaires dans le cadre de son programme de développement des énergies renouvelables, dont 27 centrales PV, 27 centrales hybrides, 6 centrales solaires thermiques et 7 centrales éoliennes.

Parmi ces projets nationaux qui ont été lancés, le projet « Solaire 1000 » et « Solaire 2000 » Le tableau (1.2) : montre appel d'offre international et national en terme : d'étude, ingénierie, génie civile, fourniture, montage, formation et mise en service du projet solaire 1000.

Le tableau 1.2 : Projet solaire 1000 des centrales PV connectées au réseau électrique Algérien.

	Groupe	Site des centrales	Puissance (MW)	Cout (Md DA)
1	AMMIMER ENERGIE SPA	Beni ounif (Bechar)	50	5.18
2	AMMIMER ENERGIE SPA	Ain beida (Ouergla)	100	9.34
3	GROUPE OZGUN/BOU-ZIDA	Hassi delaa (6)	300	24.56
4	CHINA STATE CONSTRUCTION	Foulia (Eloued)	300	28.33
5	Eurl Hamdi	Tamacine (Touggort)	250	20.56
		Totale	1000	87.97

Sonelgaz Energies renouvelables(Sonelgz-EnR) a annoncé récemment l'attribution des marchés international dans le cadre du projet de 2000 MW en énergie solaire PV, qui consiste en la réalisation de quinze (15) centrales solaires PV, à travers 12 wilayas, avec une puissance unitaire qui varie entre 80 et 220 MW.

Le montant total du projet 'Solar 2000' est estimé à plus de 171 milliards de dinars (environ 1,2 milliard de dollars) avec des délais de réalisation allant de 7 à 16 mois. D'après les estimations, le projet devrait générer 10.000 emplois.

On remarquera la présence en force des entreprises chinoises qui se sont vues attribuer la réalisation de la plupart des centrales solaires photovoltaïques. La participation chinoise au projet est composée de 2 groupements et 3 entreprises qui vont réaliser au total neuf (09) centrales sur les 14 prévues pour un montant de plus de 119 milliards de dinars, soit 70% du projet.

Ainsi, la réalisation de 5 centrales solaires PV d'une capacité allant de 80 MW à 220 MW a été attribuée au Groupement chinois CWE-HXCC-YRED.

Le tableau 1.3 : Projet solaire 2000 affecté au Groupement chinois CWE-HXCC-YRED

	Site des centrales	Puissance (MW)	Cout (Md DA)
1	Batmet (M'sila)	220	17.96
2	Guellet Sidi Saad (Laghouat)	200	16.23
3	Douar El Maa (El Oued)	200	16.44
4	Ouled Djellal	80	7.31
5	Abadla (Béchar)	80	7.18
	Totale	780	65.12

D'autres Groupements et entreprises (chinoises, Turque et Algériennes) se sont vues attribuer aussi à la réalisation de 9 grandes centrales solaires.

Le tableau 1.4: Reste du Projet solaire 2000 affecté à autre Groupement (chinoises, Turque et Algériennes)

	Groupement	Site des centrales	Puissances (MW)	Cout (Md DA)
1	Shanxi Installation Group Ltd	Ouled Fadel (Batna)	80	7.8
2	CSCEC	Tendla (El M'ghaier)	200	15.76
3	PowerChina NTL-SinoHydro	Laghrou (Biskra)	200	18.13
4	PowerChina Eng Corporation Limited	Khanguet Sidi Nadj (Biskra)	150	12.8
5	PowerChina Zhongnan Eng.	Kenadsa (Béchar)	120	11.85

6	CSCEC	Touggourt	150	14.47
7	Groupement Ozgun Insaat-Zergoun	Guerrara (Ghardaïa)	80	9.62
8	Eurl Hamdi	El Euche (Bordj Bou Arréridj)	80	8.03
9	Eurl Hamdi	Taleb Larbi (El Oued)	80	8.04
		Totale	1140	106.5

La construction des centrales solaires a débuté en janvier 2024. La plupart des entreprises ont terminé les travaux de génie civil, et ne laissant que les travaux d'électricité (panneaux PV, armoires et transformateurs).

1.6 Potentiel solaire en Algérie

En Algérie, l'énergie PV constitue l'une des priorités nationales pour réussir la transition énergétique. Grâce à sa situation géographique unique et à ses ressources naturelles abondantes, l'Algérie possède un potentiel solaire énorme, le classant parmi les pays les plus exposés au rayonnement solaire au monde, avec une moyenne de plus de 3 000 heures d'ensoleillement par an, notamment dans les régions désertiques. Avec un ensoleillement moyen de 6,57 kWh/m²/jour, la quasi-totalité du territoire national bénéficie de plus de 2000 heures d'ensoleillement par an, dont 3700 heures au Sahara. Le tableau ci-dessous présente le potentiel solaire de l'Algérie en chiffres et selon la localisation [14].

Tableau 1.5: Potentiel solaire en Algérie

	Régions côtières	Hautes plateaux	Sahara
Superficie %	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/ans)	2650	3000	3500
Énergie moyenne reçue (kWh/m ² /year)	1700	1900	2650

1.7 Le principe de l'effet PV

La photopile, qu'on appelle aussi cellule solaire ou PV, est fabriquée à l'aide de matériaux semi-conducteurs. On peut la représenter comme une diode plate qui est sensible à la lumière. Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium (Si), qui sont dopées différemment. La couche N dopée en phosphore présente un excès d'électrons périphériques et la couche P dopée en Bor présente un déficit d'électrons périphériques.

Lorsque cette diode est exposée à des photons lumineux dont l'énergie ($h\nu$) est supérieure à celle de l'énergie du semi-conducteur, appelée l'énergie de bande gap (E_g),

l'électron passe de la bande de valence (Type N couche) à la bande de conduction (Type P couche) créent une différence de potentiel entre les deux couches et leur permet de franchir la barrière de potentiel et d'engendrer un courant électrique continu [15-16].

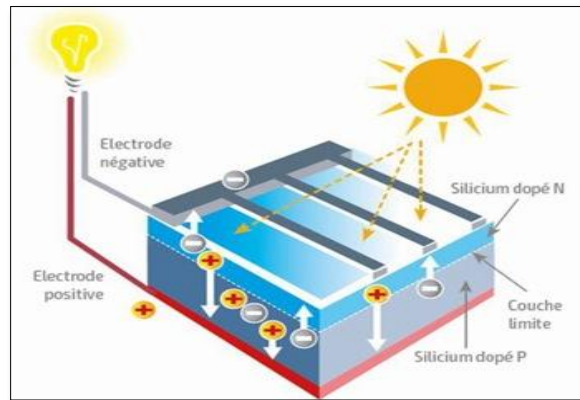


Figure 1.3 : Le principe de l'effet PV

1.8 Technologies des cellules PV

Une cellule PV peut être réalisée avec de nombreux semi-conducteurs. En réalité, il existe aujourd'hui trois types principaux de cellule solaire suivant leur mode de production : le silicium cristallin, les couches minces et les cellules organiques [17-18].

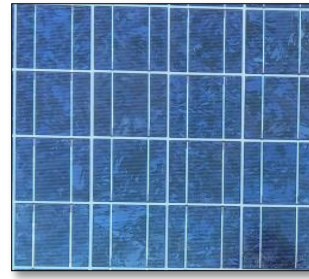
1.8.1 Technologie de la 1^{ère} génération : cellules cristallines

Les cellules de première génération sont basées sur une seule jonction P-N qui utilisent généralement le silicium sous forme cristalline comme matériau semi-conducteur. La méthode de production basée sur les wafers (fines tranches) de silicium. Cette méthode est très énergivore et donc très chère, elle nécessite par ailleurs un silicium d'une grande pureté. Le silicium cristallin domine le marché à plus de 80%. Cette filière comporte deux technologies : le silicium monocristallin et le silicium multi cristallin.

- Les cellules de silicium monocristallin sont effectivement composées d'un seul cristal divisé en deux couches. Ces cellules sont les plus efficaces, de 14% à 24%, mais elles sont aussi les plus chères.
- Les cellules de silicium poly-cristallines (multi-cristallin) sont composées d'un agglomérat de cristaux avec une efficacité de 13% à 18%, a grandement contribué à baisser le coût des modules.



(a) Cellules monocristallin



(b) Cellules poly-cristallin

Figure 1.4 : Cellules cristallines

Les cellules monocristallines se distinguent à leurs coins cassés et à leur aspect uniforme. Les cellules poly-cristallines ont un aspect plus irisé provenant de l'orientation des différents réseaux cristallins par rapport au plan de coupe. L'un des inconvénients de ces deux technologies sont le rendement faible sous un faible éclairement.

1.8.2 Technologie de la 2^{ème} génération : couches minces "thin films"

Dans le cas de "couches minces", le semi-conducteur est directement déposé par vaporisation sur un matériau support (du verre par exemple). On distingue plusieurs types de cellules couches minces à savoir :

- Le silicium amorphe (a-si).
- Le tellure de Cadmium (CdTe).
- Le cuivre/indium/sélénium ou cuivre/indium/Gallium/sélénium (CIS ou CIGS).

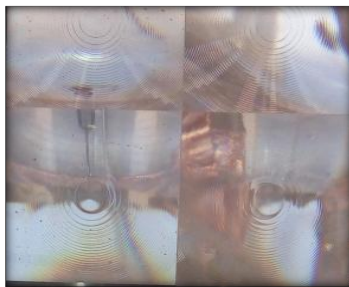
**Figure 1.5 : Cellule à couche mince**

Son prix est plus faible que les cellules cristallines; en revanche, son rendement est inférieur à celui des cellules cristallines, il est entre 7% et 11%. Elles fonctionnent avec un éclairement faible captent très bien le rayonnement diffus. Elles sont donc moins sensibles aux variations de rayonnement direct offrant donc une très bonne alternative aux cellules cristallines sur des sites soumis à des ombrages sévères.

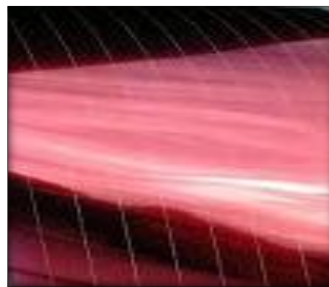
1.8.3 Technologie de 3^{ème} génération : multi-jonction, concentration

Elles sont constituées de molécules organiques combinant flexibilité et légèreté. Il y a trois types de ces cellules :

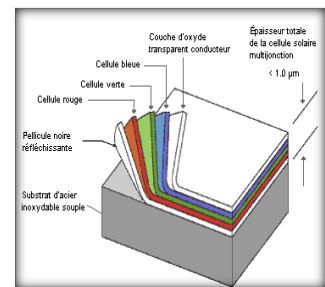
- **Cellules multicouches** : superposition de multiples cellules aux propriétés différentes (utilisant des bandes d'énergie différentes permettant un balayage plus large du spectre solaire).
- **Cellules à concentration** : (permet d'utiliser des photons à basse énergie qui ne sont habituellement pas absorbés par la cellule). Les rendements obtenus sous concentration sont très prometteurs (de l'ordre de 30 %).
- **Cellules organiques** : sont des cellules PV dont au moins la couche active est constituée de molécules organiques. Il en existe principalement les cellules PV organiques et les cellules PV organiques en polymères moléculaires.



(a) Cellule à concentration



(b) Cellule organique



(c) Cellule multicouche

Figure 1.6 : Cellules multi-jonction et à concentration

Tableaux 1.6 : Comparaisons de rendement des différentes technologies de modules PV [19]

Type	Rendement%		Avantages	Inconvénients
	En labo	commercial		
Monocristallin	26.1%	14-24%	Bon rendement pour une cellule.	Coût de fabrication élevé, perte de matière en cours de fabrication.
Poly-cristallin	21.5%	12-18%	Bon rendement pour un module.	Coût de fabrication élevé, perte de matière en cours de fabrication.
Amorphe(a-SI)	10.8%	6-9%	Facile à fabriquer.	Mauvais rendement.
CdTe	22.1%	17.2%	Absorbe 90% des photons incidents.	Cadmium très polluant.
Cis ou CIGS	22.3%	20.4%	Energie de gap ajustable, 99% des photons absorbés.	Manques de matière première.

Concentration	48.4%	39.7%	Rendement élevé , Réduction de la quantité de matériau .	Coût d'installation élevé , Sensibilité aux conditions météorologiques.
Organique	35%	29.9%	Faible cout de fabrication , flexible.	Rendement encore trop bas.
Multi-jonction	47.2%	32.1%	Très haut rendement ,Absorptions de plusieurs longueurs d'onde	Fabrication complexe et coûteuse , Difficulté d'intégration aux systèmes classiques.

1.9 Rendement énergétique des différents types de cellules PV

Le rendement d'un panneau solaire est la quantité d'énergie lumineuse convertie en électricité divisée par la quantité d'énergie entrant dans le système. Il est calculé en pourcentage. Le rendement d'un panneau PV est déterminé par un certain nombre de facteurs, notamment le type de panneau, son orientation, son inclinaison et la situation géographique de son installation.

Par exemple : la puissance crête d'un panneau solaire de 1,6 m² avec un rendement de 18% et sous un éclairement de 1 000 W/m² est calculée par : $1,6 \times 18 \% \times 1\,000 = 280 \text{ Wc}$.

1.10 Classification des systèmes PV

Les systèmes PV sont classés en trois grandes catégories principales en fonction des facteurs techniques, de conception et de l'objectif d'utilisation [20-21]:

➤ Systèmes connectés au réseau (On-Grid)

Ces systèmes sont directement reliés au réseau électrique, permettant de transmettre l'énergie excédentaire au réseau et de réduire la facture d'électricité ou même de vendre l'excédent. Ils sont couramment utilisés dans les zones urbaines, les bâtiments commerciaux et les maisons, en raison de leur faible coût et de l'absence de batteries, ce qui en fait une solution économique et pratique dans les régions avec un réseau électrique stable.

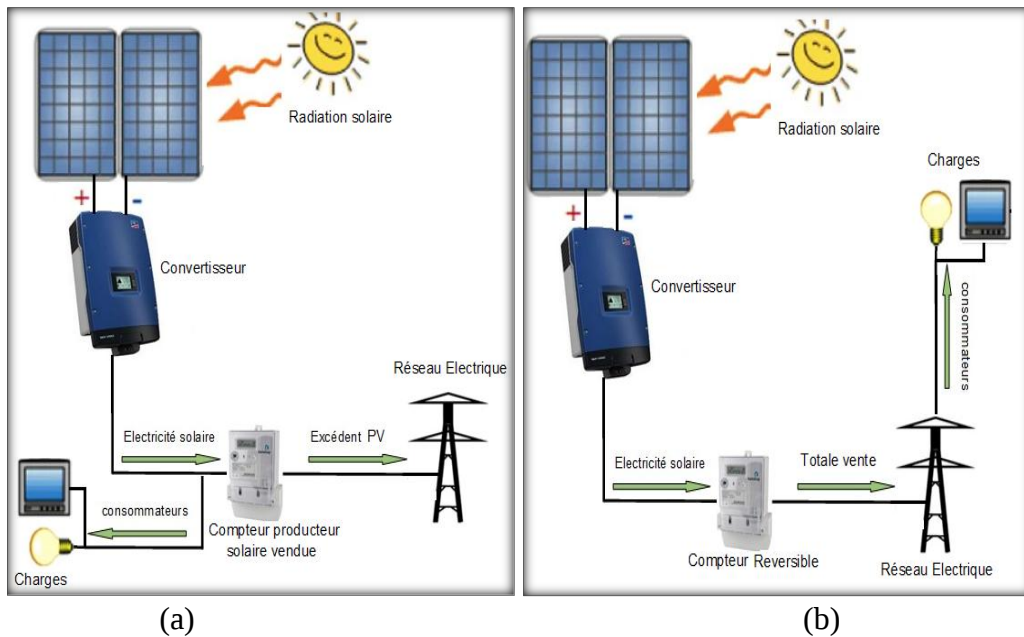


Figure 1.7 : Système PV raccordé au réseau, (a) uniquement ses excédents, (b) totalité de production.

➤ Systèmes autonomes (Off-Grid)

Ces systèmes fonctionnent de manière indépendante, sans connexion au réseau, et dépendent de batteries pour stocker l'énergie. Ils sont idéaux pour les zones éloignées sans accès à l'électricité, telles que les zones rurales, les fermes et les installations isolées. Bien qu'ils soient indépendants, ces systèmes sont plus coûteux en raison de l'utilisation des batteries et de leur dépendance aux conditions climatiques pour la production d'énergie.

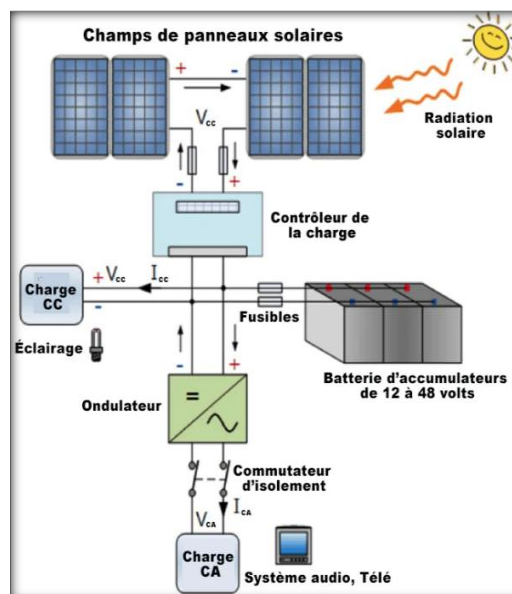


Figure 1.8 : système PV autonome

➤ Systèmes hybrides (Hybride)

Ces systèmes combinent les avantages des systèmes connectés au réseau et des systèmes autonomes. Ils utilisent des batteries pour le stockage de l'énergie tout en maintenant une connexion au réseau électrique ou en intégrant des sources d'énergie supplémentaires telles que les générateurs diesel ou l'énergie éolienne. Ces systèmes offrent une grande flexibilité et garantissent la continuité de l'approvisionnement en énergie en cas de panne de courant, ce qui les rend adaptés aux bâtiments avec des besoins énergétiques élevés ou aux régions sujettes à des coupures fréquentes, bien qu'ils soient plus coûteux et plus complexes.

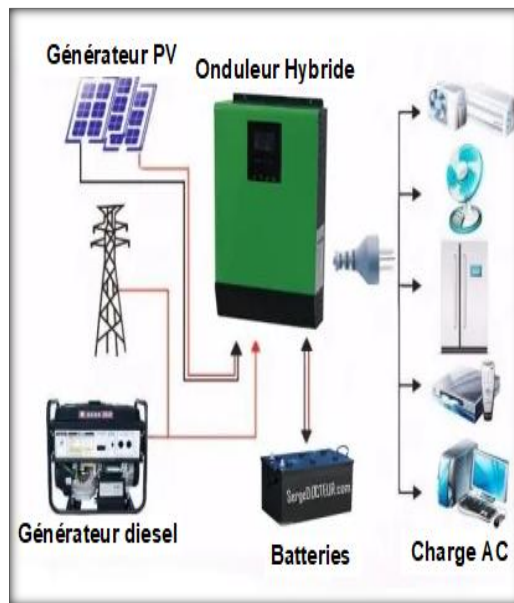


Figure 1.9 : Système hybride (4 sources)

Ces types de systèmes répondent à divers besoins dans les applications résidentielles, industrielles et agricoles, assurant ainsi une plus grande flexibilité et efficacité dans l'utilisation de l'énergie solaire.

1.11 Les avantages et les inconvénients de l'énergie PV

Malgré les avantages qu'elle présente, l'énergie PV présente certaines inconvénients qui peuvent être résumés comme suit [22]:

1.11.1 Les Avantages

- **Source renouvelable et respectueuse de l'environnement :** L'énergie PV repose sur la lumière du soleil, une ressource inépuisable, sans émissions polluantes telles que le dioxyde de carbone.
- **Faibles coûts de fonctionnement et de maintenance :** En raison de l'absence de pièces mobiles, les systèmes PV nécessitent peu de maintenance, ce qui réduit les dépenses opérationnelles.

- **Flexibilité d'installation et d'utilisation :** Les panneaux solaires peuvent être installés sur des toits, des terrains vacants, et même dans des zones isolées, offrant ainsi une indépendance énergétique.
- **Longévité :** Les cellules solaires fonctionnent efficacement pendant 20 à 25 ans, ce qui en fait un investissement à long terme.
- **Faible niveau sonore :** La production d'électricité se fait de manière totalement silencieuse, contrairement aux générateurs traditionnels qui produisent beaucoup de bruit.
- **Possibilité d'extension et d'adaptation :** Il est facile d'ajouter davantage de panneaux pour répondre à divers besoins énergétiques, des petits appareils aux grandes centrales.
- **Pas de besoin de carburant ou de main-d'œuvre spécialisée :** Cela en fait une solution économique dans certaines situations, particulièrement dans les régions où l'approvisionnement en carburant est difficile.

1.11.2 Les Inconvénients

- **Coût initial élevé :** L'installation de systèmes PV nécessite un investissement initial considérable, en particulier pour l'achat des panneaux solaires et des systèmes de stockage.
- **Efficacité de conversion limitée :** Bien que les technologies évoluent, l'efficacité des panneaux solaires reste relativement faible (environ 20-28 % pour le silicium).
- **Sensibilité aux conditions météorologiques :** L'efficacité des panneaux solaires diminue lors de journées nuageuses ou pluvieuses, et ils ne produisent pas d'énergie la nuit.
- **Espace nécessaire :** Les projets à grande échelle nécessitent de grandes surfaces pour l'installation des panneaux, ce qui peut constituer un obstacle dans certaines régions.
- **Impact des températures élevées :** Des températures élevées peuvent réduire l'efficacité des panneaux solaires, nécessitant des systèmes de refroidissement ou une meilleure conception des panneaux.
- **Coûts de stockage :** Le stockage de l'énergie nécessite des batteries coûteuses avec une durée de vie limitée.
- **Problèmes de recyclage et de disposition :** Les panneaux solaires contiennent des matériaux qui peuvent être nuisibles à l'environnement, nécessitant des méthodes sûres pour leur élimination en fin de vie.

- **Rentabilité économique limitée dans certains cas :** Par rapport aux générateurs traditionnels ou à des technologies comme les chauffe-eaux solaires, les systèmes PV peuvent ne pas être la solution la plus efficace dans certaines applications à forte consommation d'énergie.

1.12 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré les développements continus dans le domaine des systèmes PV, qui constituent l'une des solutions les plus innovantes et durables pour la production d'énergie propre. Les recherches et les applications pratiques ont fourni des preuves solides de leur capacité à réduire les émissions de carbone et à fournir de l'énergie dans les zones isolées. Nous avons également mis en lumière les défis techniques et économiques, tels que l'efficacité limitée de la conversion de l'énergie et les coûts élevés dans certains cas, qui demeurent des obstacles à leur déploiement à grande échelle.

Malgré ces défis, les systèmes PV présentent des perspectives prometteuses pour entraîner un changement radical dans les méthodes de production d'énergie à l'échelle mondiale. On s'attend à ce que les innovations dans ce domaine, telles que l'amélioration de l'efficacité des cellules solaires et le développement des technologies de stockage de l'énergie, les rendent de plus en plus compétitives par rapport aux sources d'énergie traditionnelles. Ces systèmes offrent des solutions efficaces et durables, et continueront de jouer un rôle central dans la transition vers une énergie plus durable et respectueuse de l'environnement.

En conclusion, les systèmes PV demeurent une option prometteuse pour améliorer la durabilité environnementale et renforcer la sécurité énergétique. Ils jouent un rôle clé dans la réalisation des objectifs mondiaux en matière d'énergie renouvelable. Avec la poursuite de la recherche et de l'innovation, ces systèmes contribueront de manière significative à améliorer la qualité de vie des générations futures et soutiendront la transition vers un environnement plus durable.

Chapitre 2 : Générateur PV

2.1 Introduction

L'unité PV est composée de cellules cristallines fines en silicium, qui convertissent la lumière en énergie électrique. En raison de leur fragilité, elles doivent être protégées contre les chocs et la corrosion, et encapsulées pour assurer leur résistance aux agressions environnementales tout en permettant une transmission efficace de la lumière. Ces cellules sont généralement connectées en série.

Les systèmes PV présentent des caractéristiques électriques non linéaires qui affectent leur efficacité. Leur performance est donc améliorée grâce aux techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT). Ce travail vise à développer un algorithme MPPT basé sur deux algorithmes, perturbe et observe P&O et incrémentale conductance INC afin de maximiser l'énergie produite, quelles que soient les conditions météorologiques. Le système repose sur un convertisseur DC/DC de type Boost, reliant l'unité PV à la charge, ce qui améliore la gestion de l'énergie et accroît l'efficacité de la conversion électrique.

2.2 Modélisation de la chaîne de conversion PV

Dans cette étude, on examine un système générant une tension de sortie continue. Ce système de conversion PV repose sur des modules modélisables, comme illustré dans la figure (2.1) :

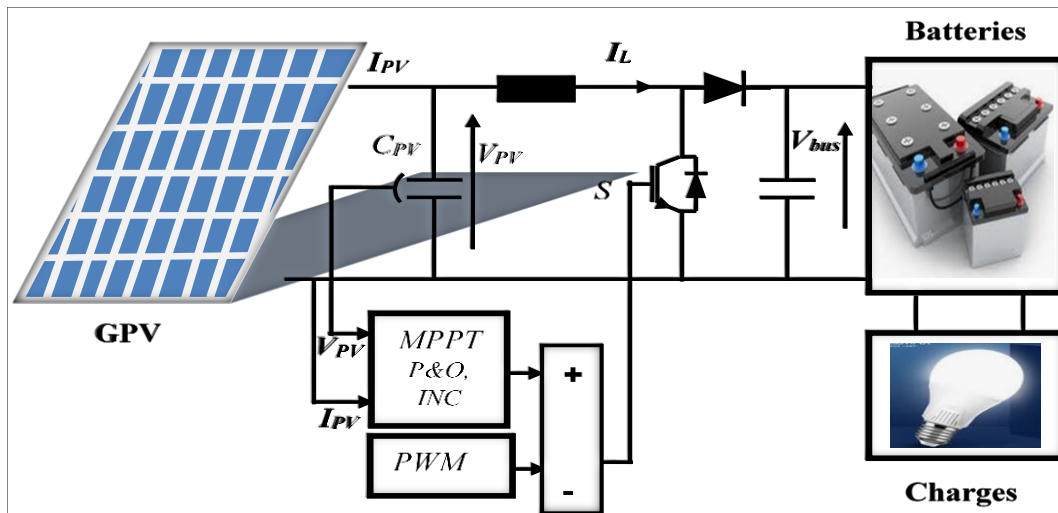


Figure 2.1 : Système de conversion PV étudié

2.2.1 Modèle électrique d'une cellule PV

Un GPV est composé d'un ensemble de cellules PV élémentaires connectées en série et/ou en parallèle, dans le but d'obtenir les caractéristiques électriques souhaitées, telles que la puissance, le courant de court-circuit ou la tension à circuit ouvert [23]. Une cellule PV peut être représentée par son schéma équivalent :

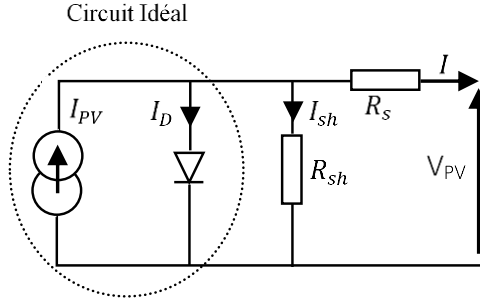


Figure 2.2 : Circuit équivalent de la cellule solaire

- A partir de la figure1 la loi des nœuds nous permet d'écrire la relation suivante :

$$I_{PV} = I + I_d + I_{sh} \quad (2.1)$$

- Le courant de jonction I_D est donné par :

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{q(V+R_s I)}{nkT}} - 1 \right) \quad (2.2)$$

- Le courant dans la résistance R_P est donné par :

$$I_{sh} = \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \quad (2.3)$$

- A partir de l'équation (2.1), on obtient l'expression de courant I :

$$I = I_{PV} - I_d - I_{sh} \quad (2.4)$$

- Remplaçons dans l'équation (2.4) les équations (2.2) et (2.3) l'équation du courant deviendra :

$$I = I_{PV} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V_{PV} + I.R_s)}{n.K.T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{PV} + R_s.I}{R_{sh}} \quad (2.5)$$

V : La tension de cellule.

R_s : La résistance série de la cellule [Ω].

T : La température de la cellule [$^{\circ}\text{K}$].

q : La charge d'électron $e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{C}$

I_0 : Le courant de saturation [A]

K : La constante de Boltzmann ($1.3854 \cdot 10^{-23} \text{J}^{\circ}\text{K}^{-1}$) .

n : Le facteur de qualité de diode .

2.2.2 Paramètres externes d'une cellule PV [24-25]

- **Courant de court-circuit I_{cc}** : C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (R_S nulle et R_P infinie), ce courant se confond avec le photo-courant I_{PV} dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (II.2), on obtient :

$$I_{cc} = I_{PV} - I_0 \left(e^{\frac{(R_S I_{cc})}{V_T}} - 1 \right) - \frac{R_S I_{cc}}{R_{sh}} \quad (2.6)$$

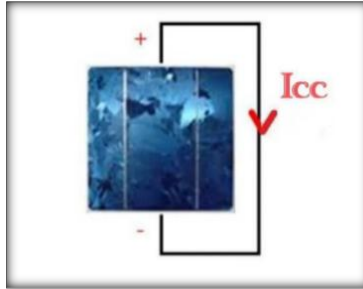


Figure 2.3 : Courant de court-circuit I_{cc}

- Pour la plupart des photopiles (dont la résistance série est faible), on peut négliger $I_0 \left(e^{\frac{(R_S I_{cc})}{V_T}} - 1 \right)$ devant le terme I_{PV} . L'expression approchée du courant de court-circuit est alors :

$$I_{cc} \approx \frac{I_{PV}}{\left(1 + \frac{R_S}{R_{sh}} \right)} \quad (2.7)$$

- **Tension de circuit ouvert V_{co}** : C'est la tension V_{CO} pour laquelle le courant débité par le GPV est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur PV).

$$0 = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V_{co}}{V_T}} - 1 \right) - \frac{V_{co}}{R_{sh}} \quad (2.8)$$

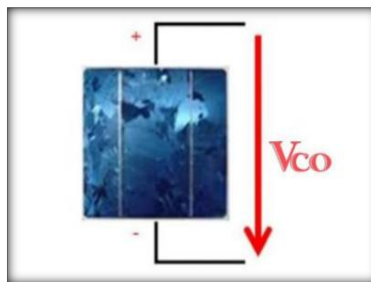


Figure 2.4 : Tension de circuit ouvert V_{co}

- Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à :

$$V_{co} = V_T \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right) \quad (2.9)$$

- **Facteur de forme** : On appelle facteur de forme FF, le rapport entre la valeur maximale de la puissance pouvant être extraite ($P_m = V_{PM} * I_{PM}$) de la photopile sous les conditions de mesures standardisées, et le produit $I_{CC} * V_{CO}$.

Où : I_{CC} intensité de court-circuit et V_{CO} tension de circuit ouvert.

$$FF = \left(\frac{V_M I_M}{V_{co} I_{cc}} \right) \quad (2.10)$$

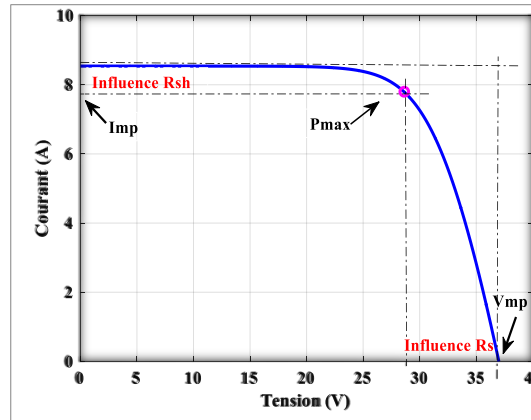


Figure 2.5 : Influence des résistances shunt et série sur la caractéristique I(V) d'une cellule PV

Ce facteur montre la déviation de la courbe IV par rapport à un rectangle (de longueur V_{CO} et largeur I_{CC}), qui correspond à la photopile idéale. La puissance des modules PV s'exprime en Watt-crête. Cette dernière représente la puissance que fournit un module lorsqu'il est fermé sur sa charge nominale (optimale), sous un éclairement de 1000 W/m^2 et à une température de 25°C .

- **Le rendement** : La puissance est nulle en court-circuit et en circuit ouvert. Elle passe par un maximum quand on parcourt la caractéristique I(V). Le rapport de la puissance électrique optimale à la puissance incidente.

$$n = P_M / P_0 \quad (2.11)$$

P_0 : est la puissance incidente. Elle est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles $P_0 = G * S$.

G : Flux global [W/m^2].

S : Surface de générateur [m^2].

2.3 Association des cellules solaires, module PV

La puissance disponible aux bornes d'une cellule est très faible (environ 3 W). Pour augmenter cette puissance, ces cellules sont assemblées soit en série (pour augmenter la tension), soit en parallèle (pour augmenter le courant). Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthylène-acétate de vinyle) et protégées sur la face avant par un verre trempé à haute transmission et sur la face arrière par une feuille de Tedlar (fluorure de polyvinyle). Les cellules sont assemblées pour former un élément GPV (module PV), généralement entouré d'un cadre rigide en aluminium anodisé comportant des trous de fixation. Les cellules typiques d'un module PV sont séparées en plusieurs segments, protégées par des diodes anti-parallèles. Si l'une de ces cellules venait à être ombragée, la diode se déclencherait afin de protéger les cellules de cette partie du module [26].

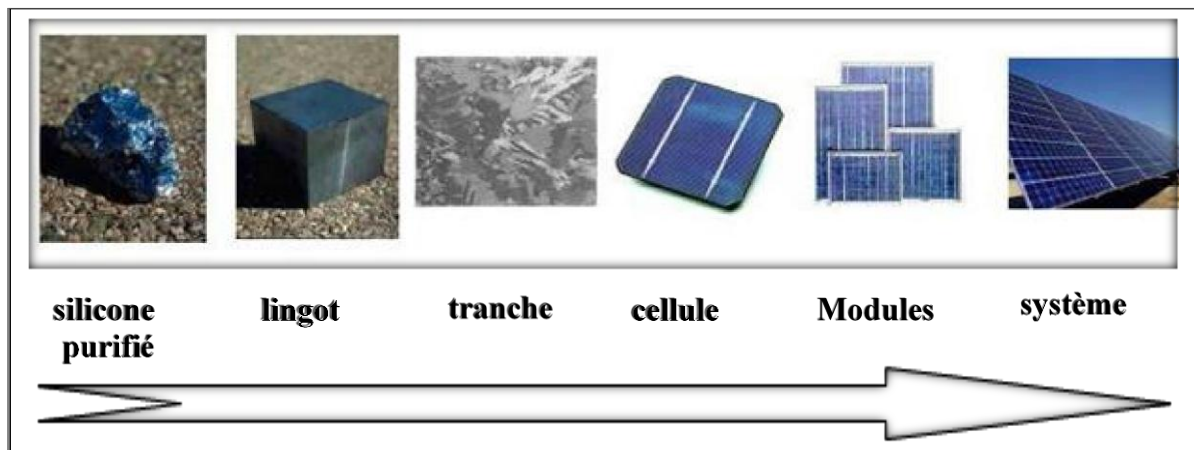


Figure 2.6 : Évolution des constructions des systèmes de production PV

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW à quelques MW, sous une tension appropriée, il est nécessaire de monter les modules en rangées série-parallèle pour former ce que l'on appelle un champ PV.

2.3.1 Association en série :

Lorsque N_s cellules PV sont associées en série, les tensions de ces cellules s'additionnent et le courant généré est le même dans toute la branche Figure (2.7) :

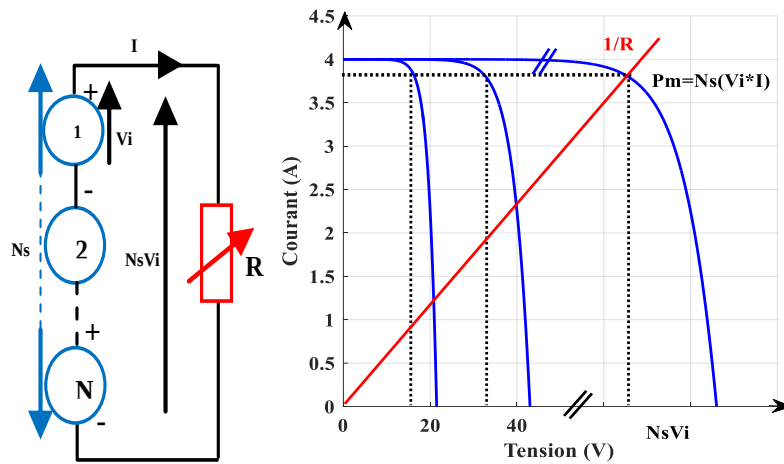


Figure 2.7 : Cellules en série

2.3.2 Association en parallèle :

Cette fois, c'est la tension de chaque cellule qui doit être identique, les courants s'additionnant

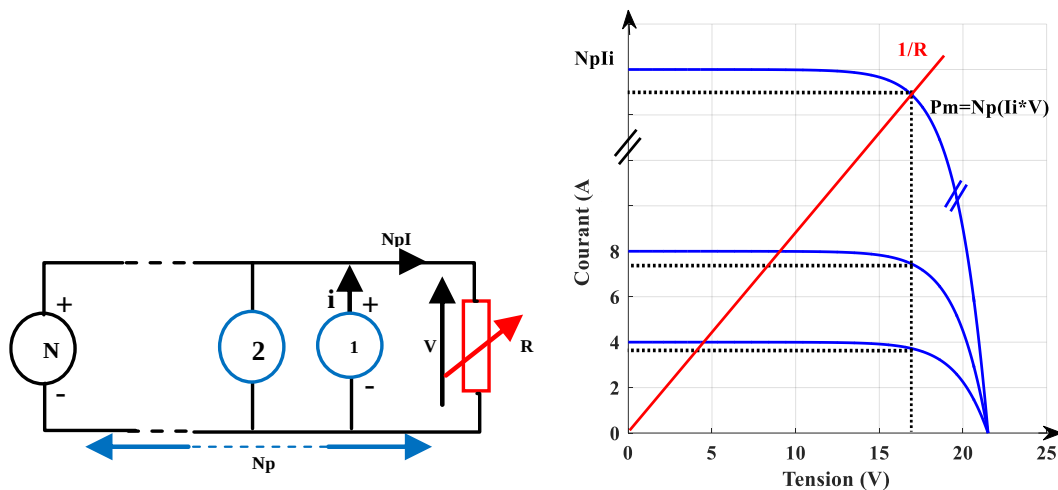


Figure 2.8 : cellule en parallèle

Pour appliquer les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'une seule cellule à un module PV, quelques hypothèses sont nécessaires :

- 1°) Tous les modules ont les mêmes caractéristiques électriques (même I_{cc} et même V_{co}) ;
- 2°) Absence de tout masquage partiel ;
- 3°) Aucune influence thermique.

2.3.3 Association série/parallèle :

Si vous souhaitez une tension et un courant précis, optez pour la connexion mixte. Il s'agit d'un type de connexion à la fois en série et en parallèle.

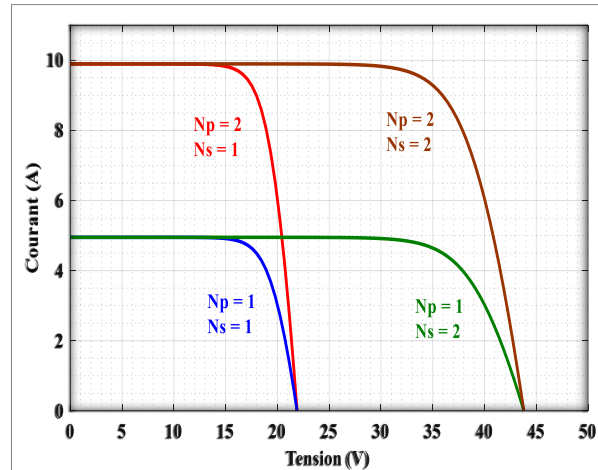


Figure 2.9 : Connexion en association série/parallèle

2.4 Caractéristiques I(V) et P(V) d'un module PV [27-28]

Les conditions de test standard définissent la manière dont les modules PV sont examinés en laboratoire afin d'identifier leurs propriétés électriques. Ce sont des conditions normalisées qui permettent de comparer les modules entre eux. Les conditions STC fournissent un certain nombre de paramètres de test, notamment :

- 1°) Niveau d'illumination du module : $G = 1000 \text{ W/m}^2$
- 2°) Température de la cellule : $25 \text{ }^\circ\text{C}$
- 3°) Coefficient de masse d'air = 1.5

La puissance de crête d'un module est définie comme la puissance maximale du module dans les conditions STC.

Prenons l'exemple d'un module composé de 54 cellules en série, qui présente les propriétés électriques suivantes (sous conditions STC) :

- Courant de court-circuit $I_{cc} = 8,21 \text{ A}$
- Tension en circuit ouvert $V_{co} = 0,61 \times 54 = 32,9 \text{ V}$
- Courant à puissance maximale $I_{mpp} = 7,57 \text{ A}$
- Tension à puissance maximale $V_{mpp} = 0,48 \times 54 = 26,4 \text{ V}$
- Puissance maximale $P_{mpp} = 7,57 \times 26,4 = 199,848 \text{ W}$

Les caractéristiques I(V) et P(V) de ce module sont présentées ci-dessous dans la figure (2.10) :

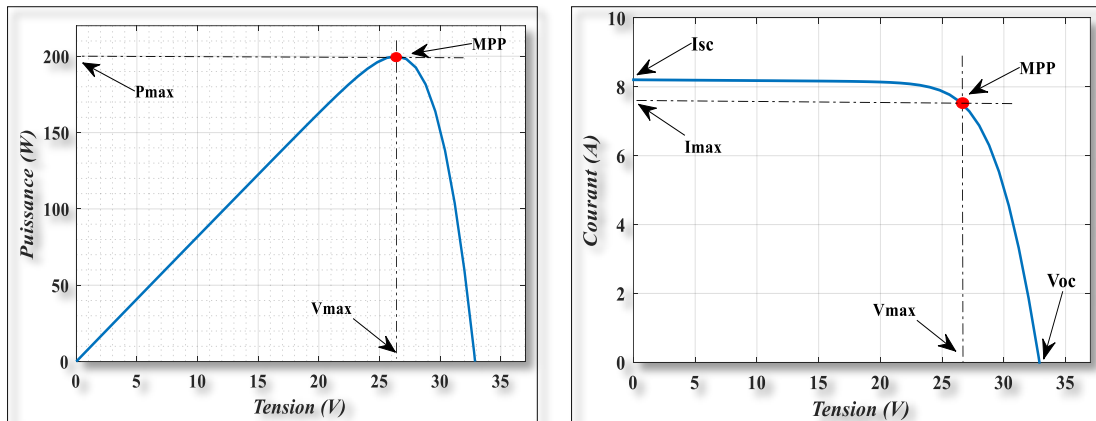


Figure 2.10 : Caractéristique IV et PV du module PV

2.5 Influence de l'éclairement sur la caractéristique IV et PV

Les caractéristiques IV et PV d'un générateur solaire varient en fonction des niveaux d'illumination. Le niveau d'illumination est défini comme l'observation de la densité de l'énergie solaire, exprimée en W/m^2 , sur la surface d'une zone et en fonction de l'orientation des modules PV.

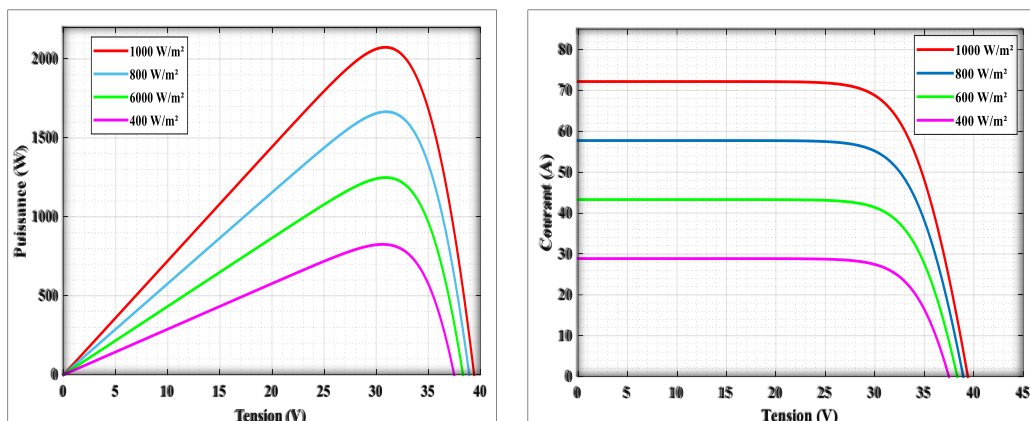


Figure 2.11 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique IV du GPV

La nuit, l'illumination est nulle (0 W/m^2). Pendant la journée, elle varie entre 0 et 1000 W/m^2 (valeur maximale), selon la saison. L'illumination a un effet notable sur la valeur de I_{cc} : lorsque l'illumination double, I_{cc} double également. En revanche, l'illumination a très peu d'effet sur la tension en circuit ouvert V_{co} . Le courant délivré par le module PV est pratiquement proportionnel à l'illumination G .

2.6 Influence de la température sur la caractéristique IV et PV

Le comportement des cellules solaires est fortement influencé par la température. Le courant augmente d'environ $3 \times 10^{-2} \text{ mA/}^\circ\text{C}$ par cm^2 de cellule avec l'élévation de la température,

tandis que la tension diminue de 2 mV par degré. la puissance maximale disponible diminue avec l'augmentation de la température, de l'ordre de 5×10^{-5} W/°C par cm² de cellule, soit une variation de 0,35 % par degré.

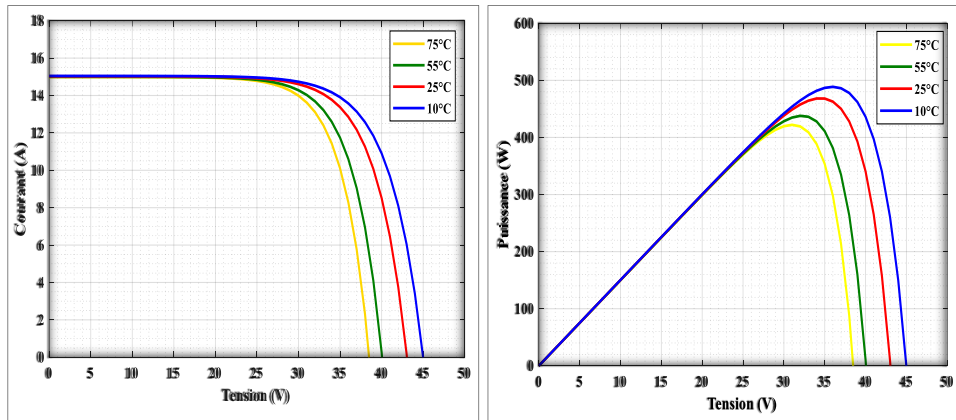


Figure 2.12 : Influence de la température sur la caractéristique IV, PV.

2.7 Influence de l'ombrage sur les caractéristiques d'un module PV

Sous une irradiation solaire uniforme, la puissance de sortie du module est égale à la puissance totale de sortie de toutes les cellules PV. Cependant, en présence d'une illumination non uniforme, comme une ombre (celle des arbres, d'une maison voisine ou d'un panneau PV sur un autre), comme illustré dans la Figure (2.13) certaines de ces cellules PV agiront comme des récepteurs, entraînant une augmentation de leur température et pouvant éventuellement endommager le module PV [29-30].

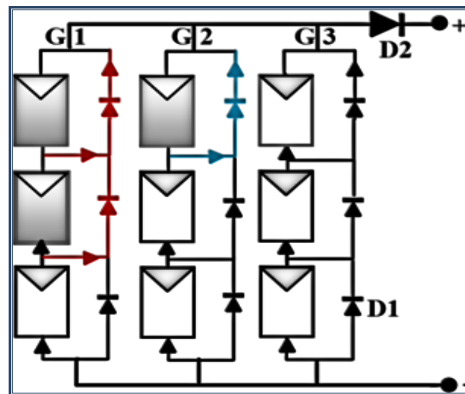


Figure 2.13 : Configuration d'un module PV sous ombrage partiel

Les courbes IV et PV en fonctionnement normal et sous ombrage sont illustrées dans la Figure (2.14) :

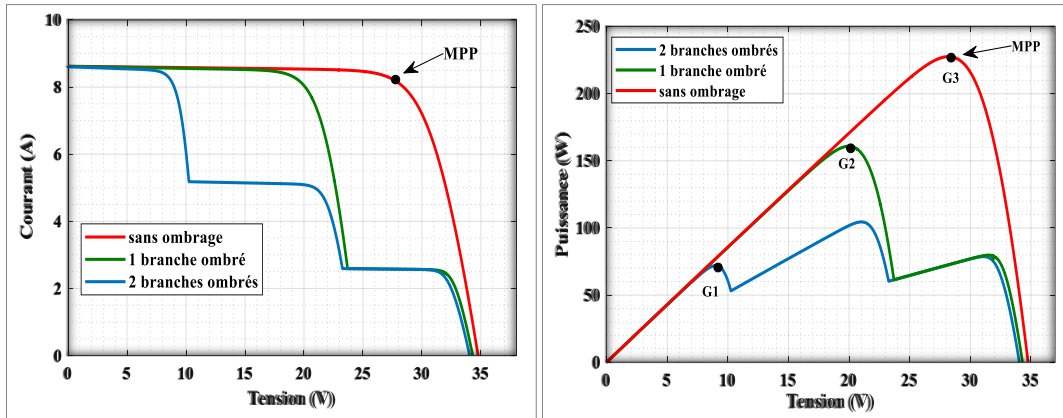


Figure 2.14 : Caractéristiques I(V) et P(V) en fonctionnement normal et sous ombrage

2.8 Système de protection des modules PV

Des protections électriques doivent être intégrées aux modules PV afin d'éviter les pannes dommageables liées à la connexion des cellules en série et des panneaux en parallèle, garantissant ainsi une longue durée de vie. Dans les installations actuelles, deux formes de protection conventionnelles sont employées à cet effet figure (2.15) [31-32].

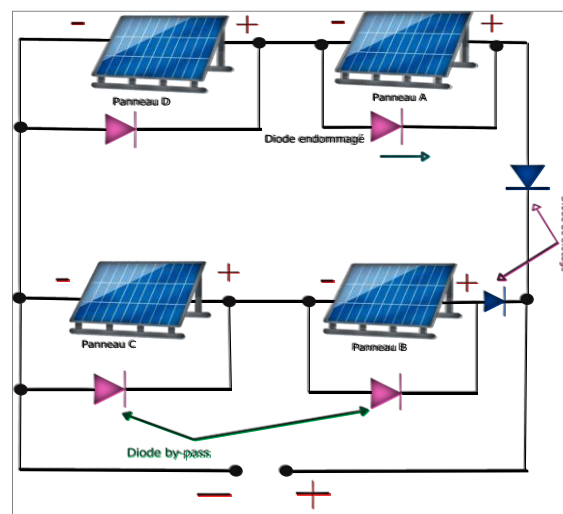


Figure 2.15 : Structure d'un GPV protégé par des diodes (by-pass et anti-retour)

- **Diode by-pass** : La diode de bypass est connectée en antiparallèle avec un groupe de cellules afin de protéger la plus faible d'entre elles contre la polarisation inverse Figure (2.16).

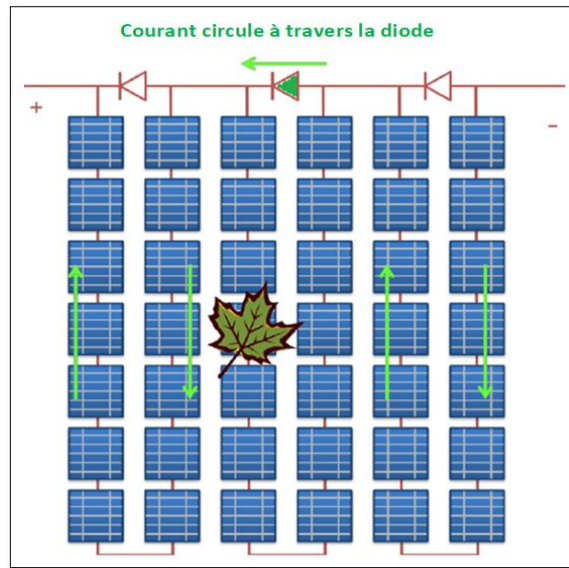


Figure 2.16 : Fonctionnement de la diode de bypass en présence d'ombrage [33]

La puissance maximale d'une cellule PV diminue lorsqu'elle est ombragée, et les caractéristiques PV présentent de nombreux points de puissance maximale locale (MPP), rendant le suivi du MPP global difficile Figure (2.14).

La plupart des modules PV sont constitués de sous-réseaux de cellules connectées en série avec une diode de bypass afin d'éviter ces problèmes Figures (2.15 et 2.16). En cas de panne partielle, le nombre de cellules par sous-réseau ainsi que le nombre de diodes de bypass représentent un compromis économique entre la protection et la perte d'une part importante du GPV, et sont généralement limités à 3 Figure (2.17).

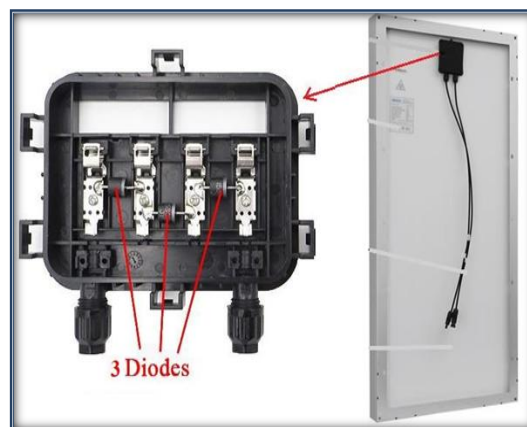


Figure 2.17 : Position de la diode de bypass

- **Diode anti-retour :** Les diodes de blocage (anti-retour) empêchent l'inversion du flux de courant entre les chaînes de modules connectés en parallèle Figure (2.17). Ce phénomène peut se produire lorsque de nombreux modules sont reliés en parallèle ou

lorsqu'une charge directement connectée, comme une batterie, peut passer du mode récepteur au mode générateur pendant la nuit [34].

2.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation et la simulation du fonctionnement électrique d'un système de captage PV, adapté par un système de contrôle numérique intelligent (contrôle MPPT flou), garantissant ainsi le suivi de la puissance maximale fournie par le générateur PV et permettant d'optimiser le rendement. Nous avons également abordé la modélisation mathématique d'une cellule PV, son modèle électrique, son principe de fonctionnement, ainsi que ses principaux paramètres électriques tels que le rendement, le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension en circuit ouvert. Les générateurs PV sont constitués de plusieurs cellules connectées en série et/ou en parallèle. L'influence des paramètres d'illumination et de température sur les caractéristiques IV et PV d'un module PV a été analysée, ainsi que l'impact de l'ombrage sur ces caractéristiques.

Le chapitre s'est conclu par une discussion sur les systèmes de protection intégrés aux générateurs PV. En outre, le système de contrôle MPPT flou contribue à une meilleure réponse dynamique, assurant ainsi le maintien du point de fonctionnement optimal où la puissance transférée à la charge est maximale.

Chapitre 3 : Maximisation de la puissance d'un GPV

3.1 Introduction

L'énergie PV gagne en popularité dans les applications de production d'électricité, car elle est considérée comme une source d'énergie quasi infinie et généralement disponible. Cependant, la puissance de sortie du GPV dépend de l'irradiation solaire et de la température des cellules PV. Par conséquent, pour maximiser l'efficacité du système PV, il est essentiel de suivre le point de puissance maximale du GPV.

Le GPV possède un unique point de fonctionnement capable de fournir à la charge la quantité maximale d'énergie, connu sous le nom de point de puissance maximale (MPP). L'emplacement de ce point varie de manière non linéaire en fonction de l'irradiation solaire et de la température des cellules, ce qui nécessite l'utilisation de techniques de suivi pour optimiser les performances.

3.2 Connexion directe entre le GPV et la charge

Le système le plus simple que l'on puisse concevoir se compose d'un GPV et d'une charge à courant continu (DC) qui utilise directement l'énergie fournie par le GPV. Cette puissance dépend fortement de l'ensoleillement, de la température et de la nature de la charge. La connexion directe entre le GPV et la charge est largement répandue en raison de sa simplicité de mise en œuvre et de son faible coût, principalement dû à l'absence de composants électroniques, à l'exception d'une diode anti-retour parfois nécessaire pour éviter un éventuel retour de courant Figure (3.1) :

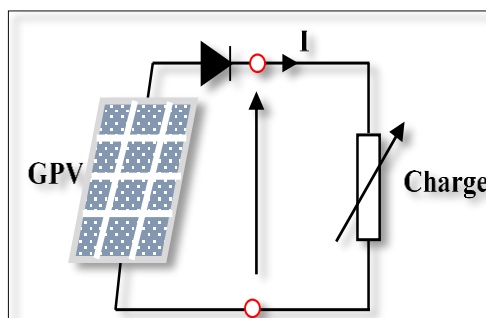


Figure 3.1 : Connexion directe entre le GPV et la charge via une diode anti-retour

Malheureusement, aucun paramètre de réglage n'est disponible dans cette configuration. La quantité d'électricité fournie par le GPV dépend du point d'intersection de sa caractéristique courant-tension (I - V) avec celle de la charge. Par conséquent, lorsque ces caractéristiques

varient, le transfert d'énergie ne sera plus optimal. Pour augmenter la production du GPV, une étape d'adaptation est introduite entre le panneau solaire et la charge. Cette adaptation a pour fonction de rechercher automatiquement le point de puissance maximale (PPM) du générateur, comme illustré ci-dessous [35].

Lorsqu'il est nécessaire d'augmenter la tension d'une source à courant continu, un hacheur parallèle de type BOOST, également appelé booster chopper, peut être utilisé, comme indiqué dans la figure (3.2) [36-37]:

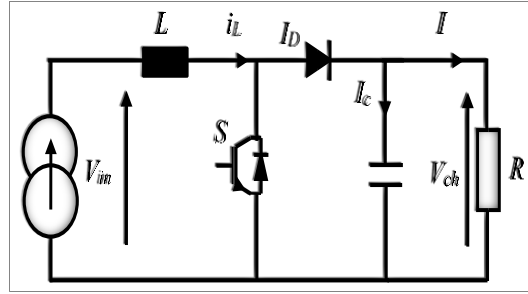


Figure 3.2 : Schéma électrique du hacheur Boost

Ce dispositif d'électronique de puissance, un convertisseur DC-DC, permet d'ajuster la tension aux bornes du GPV en fonction d'une stratégie de commande garantissant un fonctionnement à puissance maximale. Selon le schéma du hacheur boost :

$$\begin{cases} L \frac{di}{dt} = -(1 - D).V + E \\ C \frac{dv}{dt} = (1 - D).i - \frac{V}{R} \end{cases} \quad (3.1)$$

Où D représente le rapport cyclique, définissant la position de l'interrupteur.

L'objectif est de réguler la tension de sortie V_{dc} autour de la tension souhaitée.

3.3 Synthèse des techniques de suivi du point maximale de puissance (MPPT)

Depuis la publication de la première approche de commande dédiée aux systèmes PV en 1968, la recherche sur les techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) a connu une évolution constante [38]. De nombreuses stratégies et méthodes ont été développées afin d'améliorer l'efficacité des systèmes solaires. Étant donné le grand nombre d'études dans ce domaine, nous avons classé les techniques MPPT en fonction de leur principe fondamental, ainsi que selon d'autres critères tels que la précision des performances et la rapidité de réponse. Cette classification permet de mettre en évidence les différences essentielles entre les différentes approches et d'offrir une comparaison plus claire de leur efficacité et de leur applicabilité.

3.3.1 Principe de fonctionnement du MPPT

Le MPPT (Maximum Power Point Tracking), ou "suivi du point de puissance maximale", est une technique permettant de suivre le point de fonctionnement optimal d'un générateur électrique non linéaire. En raison de la nature variable de ce type de générateur, la puissance produite pour un même niveau d'ensoleillement peut varier en fonction de la charge connectée. Le contrôleur MPPT régule le convertisseur statique reliant la charge (comme une batterie) au panneau solaire, garantissant ainsi que la charge reçoit toujours la puissance maximale disponible. La figure (3.3) illustre la trajectoire du point de puissance maximale généré par le GPV [39].

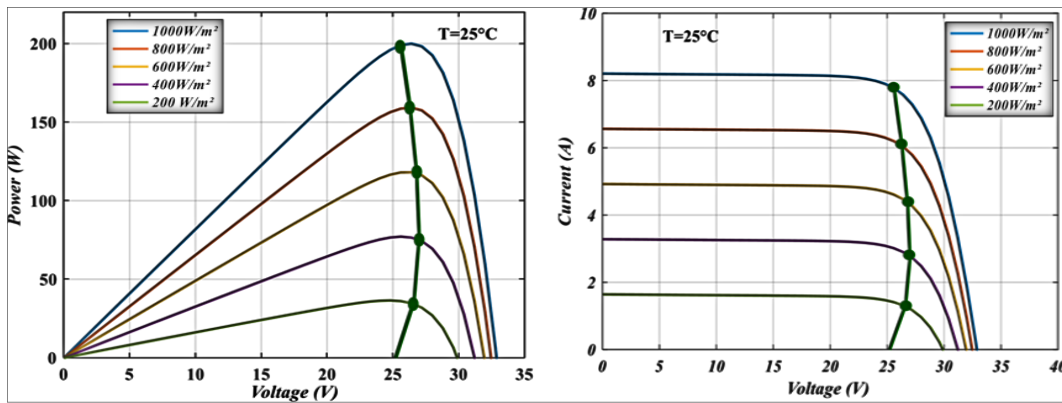


Figure 3.3 : Caractéristiques IV, PV et trajectoire PPM

Un étage d'adaptation DC-DC boost doit être intégré entre le GPV et la charge de sortie. Figures (3.4) :

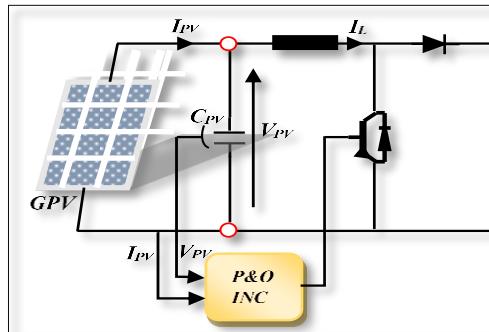


Figure 3.4 : Schéma synoptique du couplage PV/MPPT

3.3.2 Méthode de Perturbation et Observation (PPM)

Étant donné que la recherche du point de puissance maximale (PPM) est effectuée périodiquement, le système oscille inévitablement autour de ce point une fois qu'il est atteint. La méthode de Perturbation et Observation (P&O) est largement utilisée en raison de sa simplicité de mise en œuvre. Cependant, elle présente l'inconvénient de générer des oscillations

en régime permanent autour du PPM. Réduire l'amplitude de la perturbation permet de limiter ces oscillations, mais cela ralentit la vitesse de suivi. Il est donc essentiel de trouver un compromis entre précision et rapidité de réponse, rendant l'optimisation de cette approche de commande complexe [40-41].

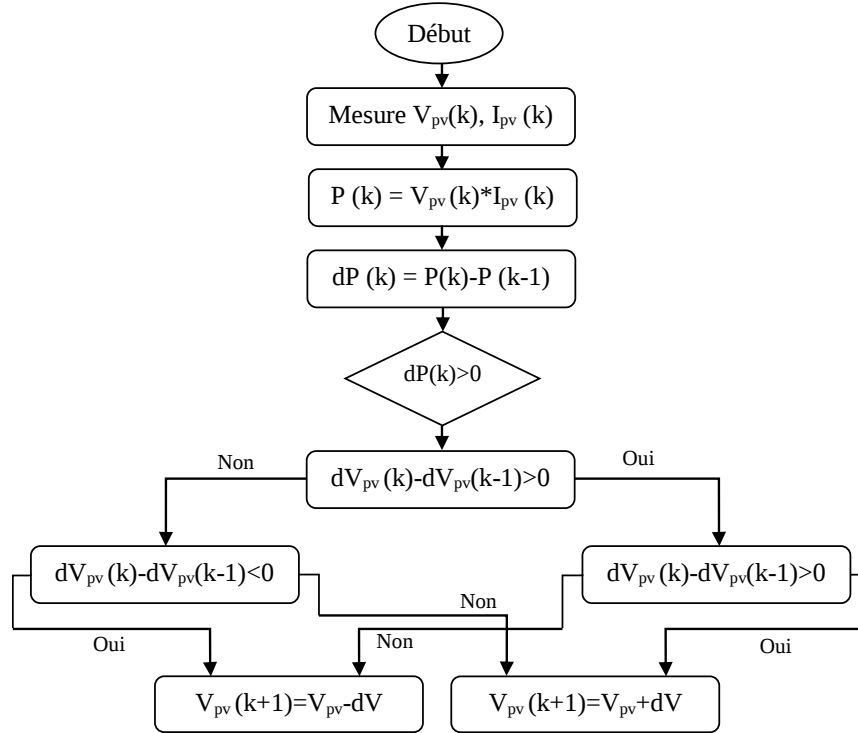


Figure 3.5 : Organigramme de l'algorithme P&O

L'algorithme "P&O" présente certaines limitations qui réduisent son efficacité. Lorsque l'intensité du rayonnement solaire diminue, la technique MPPT a du mal à identifier précisément le point de puissance maximale (MPP). De plus, cet algorithme ne peut pas confirmer s'il a réellement atteint le point de fonctionnement optimal, ce qui entraîne des oscillations autour du MPP, en inversant le signe de la perturbation (dV) après chaque mesure de variation de puissance (dP). En outre, des études ont montré que l'algorithme "P&O" peut adopter un comportement irrégulier en cas de variations soudaines du niveau d'ensoleillement, comme lors du passage d'un nuage mobile. Dans de telles situations, l'algorithme peut éloigner le point de fonctionnement du véritable MPP, entraînant ainsi une perte d'énergie. Cet ajustement Incorrect persiste jusqu'à ce que le niveau d'irradiation se stabilise ou que son changement ralentisse.

3.3.3 Méthode de la Conductance Incrémentale (INC)

L'algorithme de conductance incrémentale a été développé pour améliorer l'algorithme (P&O), en particulier le problème d'oscillation autour du MPP. Les tensions et courants du générateur sont mesurés afin que le contrôleur puisse calculer la conductance et la conductance Incrémentale et déterminer son comportement [42].

La dérivée de la puissance par rapport à la tension est :

$$\frac{dP}{dV} = I + V * \frac{dI}{dV} \quad (3.2)$$

Cela conduit aux équations suivantes :

$$\begin{cases} \frac{dI}{dV} = -\frac{1}{V'} & \frac{dP}{dV} = 0 \\ \frac{dI}{dV} > -\frac{1}{V'} & \frac{dP}{dV} > 0 \\ \frac{dI}{dV} < -\frac{1}{V'} & \frac{dP}{dV} < 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

La direction dans laquelle une perturbation doit se produire pour déplacer le point de fonctionnement vers le MPP est déterminée à l'aide des équations (3.2) et (3.3). Cette perturbation est répétée jusqu'à ce que l'équation (3.3.a) soit satisfaite. Lorsque le MPP est atteint, l'algorithme continue à utiliser cette valeur jusqu'à ce que la valeur du courant change. Ce changement est causé par une variation de la quantité de lumière solaire. Le MPP se déplace vers la droite de la tension de fonctionnement à mesure que l'ensoleillement augmente. Le MPPT doit alors augmenter la tension de fonctionnement pour compenser ce déplacement du MPP. Dans le cas contraire, comme indiqué dans l'image, lorsque l'ensoleillement diminue, le MPPT doit réduire cette tension comme illustré dans la figure (3.6) :

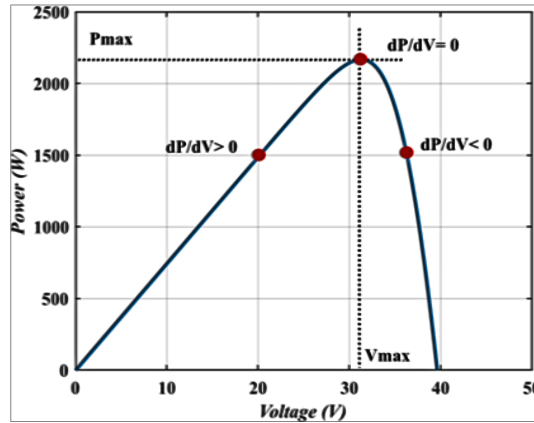


Figure 3.6 : Variation de dP/dV dans la caractéristique PV

La figure (3.7) illustre l'organigramme de l'algorithme (INC). Les valeurs dI et dV sont calculées après la mesure de I_{PV} et V_{PV} du GPV. Si $dV = 0$ et $dI = 0$, cela signifie que les conditions atmosphériques restent inchangées, donc nous sommes au point de puissance maximale (MPP).

Si $dV = 0$ et $dI > 0$, cela indique une augmentation de l'ensoleillement, nécessitant une augmentation de la tension de fonctionnement pour retrouver le MPP. En revanche, si $dI < 0$,

cela signifie une diminution de l'ensoleillement, ce qui impose une réduction de la tension de fonctionnement afin de maintenir des performances optimales. Lorsque la tension varie ($dV \neq 0$), les rapports des équations (3.3-b) et (3.3-c) permettent de déterminer la direction correcte du réglage de la tension pour atteindre le MPP.

Si $(dI/dV) > (-I/V)$, soit $(dP/dV) > 0$, alors le point de fonctionnement se situe à gauche du MPP. Par conséquent, il est nécessaire d'augmenter la tension de fonctionnement pour atteindre le MPP. Si $(dI/dV) < (-I/V)$, soit $(dP/dV) < 0$, alors le point de fonctionnement se trouve à droite du MPP, ce qui implique une réduction de la tension de fonctionnement pour atteindre le MPPT.

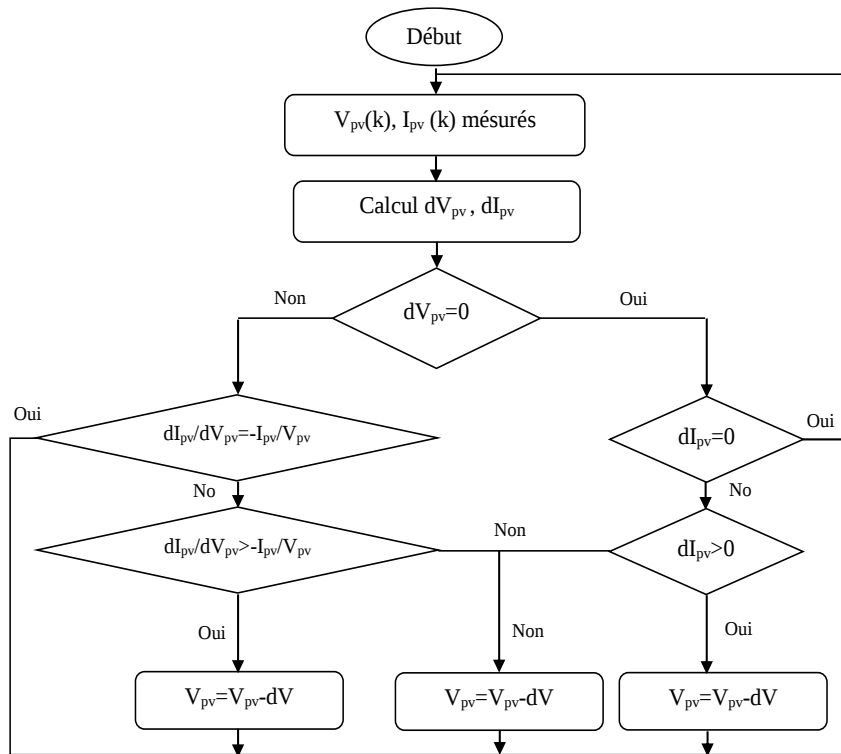


Figure 3.7 : Organigramme de l'algorithme INC

3.4 Simulation et interprétation des résultats

Cette section présente les différents résultats de l'optimisation du GPV à l'aide des deux algorithmes MPPT (P&O et INC) dans les conditions STC, avec des irradiances solaires variables et une température variable. Nous évaluons ces algorithmes selon trois aspects : la vitesse, la précision et l'ondulation. Nous avons pris $t=2.5s$ afin de Montrer clairement l'état transitoire.

Avant de commencer à visualiser les résultats de la simulation, nous devons définir les caractéristiques du système sur lequel notre étude sera basée :

Tableau 3.1 : Conception du système solaire PV

Paramètres	Valeurs
Tension d'entrée V_{in} (V)	29
Tension de sortie V_s (V)	65
Puissance nominale (W)	2080
Fréquence de commutation f_s (kHz)	5000
Ondulation de tension ΔV	1%
Ondulation de courant ΔI	5%

Tableau 3.2 : Caractéristiques du panneau PV sous STC

Paramètres	Panneau PV
P_{mp} (W)	213.15
V_{oc} (V)	36.3
I_{sc} (A)	7.84
V_{mp} (V)	29
I_{mp} (A)	7.35
Coefficient de température V_{oc}	-0.36099
Coefficient de température I_{cc}	0.102
Cellule par module	60
N_s	1
N_p	10
P_{PVG} (W)	2100
R_s	0.39381
R_{sh}	313.0553
n	0.98119

Tableau 3.3 : Conception du hacheur boost

Paramètres	Equation	Valeurs
Courant de sortie I_s	$\frac{P_{max}}{V_s}$	32
Ondulation de courant ΔI	$0.05 * I_s * \frac{V_s}{V_{in}}$	3.58
Ondulation de tension ΔV	$0.01 * V_s$	0.65

L'inductance L	$\frac{V_{in}(V_s - V_{in})}{\Delta I * f_s * V_s}$	8.97 e-4
La capacité C	$\frac{I_s(V_s - V_{in})}{f_s * V_s * \Delta V_s}$	0.0054

3.4.1 Caractéristiques sous les conditions STC (T=25 °C, G=1000 W/m²)

Cette section présente les différents résultats de l'optimisation du GPV à l'aide des deux algorithmes MPPT (P&O et INC) dans les conditions STC, avec des irradiances solaires variables et une température variable. Nous évaluons ces algorithmes selon trois aspects : la vitesse, la précision et l'ondulation. Nous avons pris $t=2.5s$ afin de montrer clairement l'état transitoire.

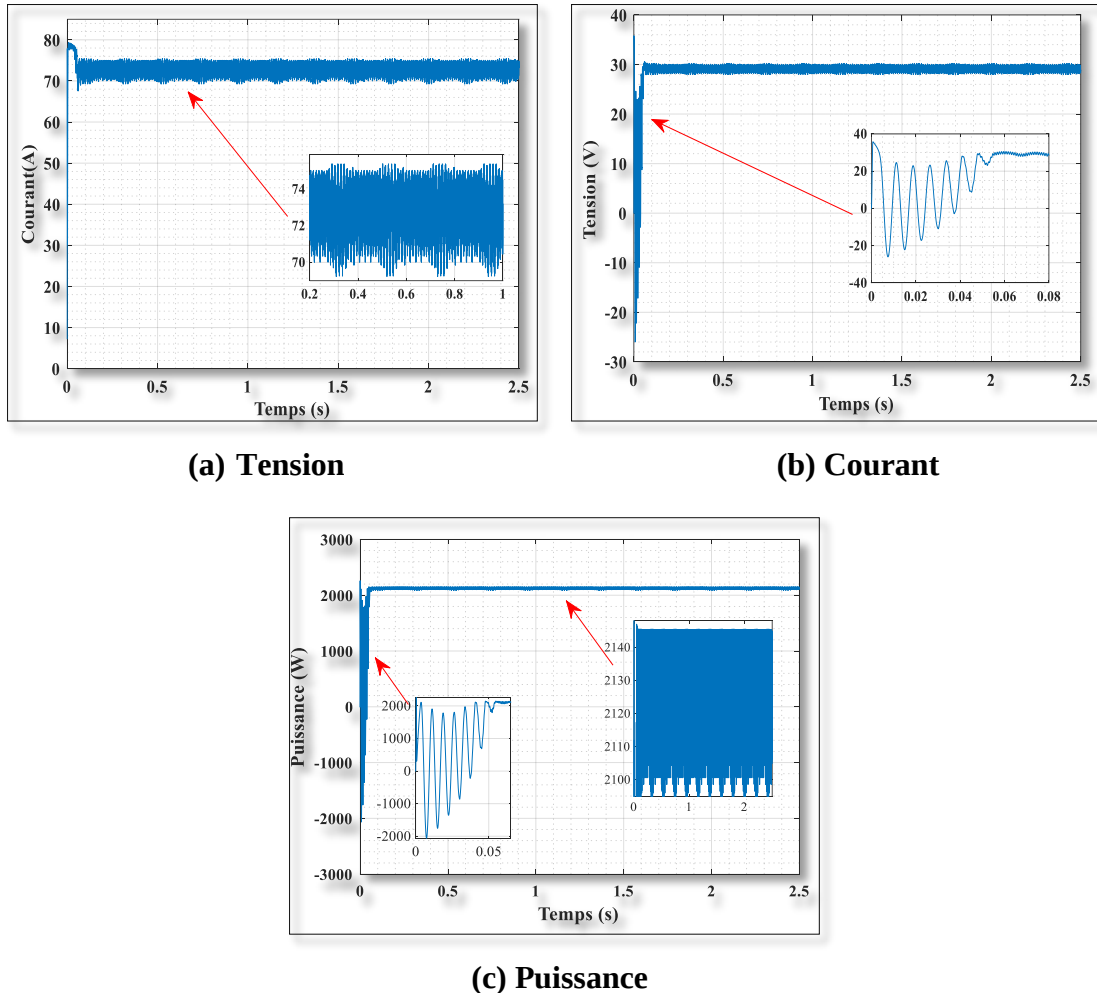


Figure 3.8 : Résultats de l'évolution de l'algorithme P&O dans des conditions STC

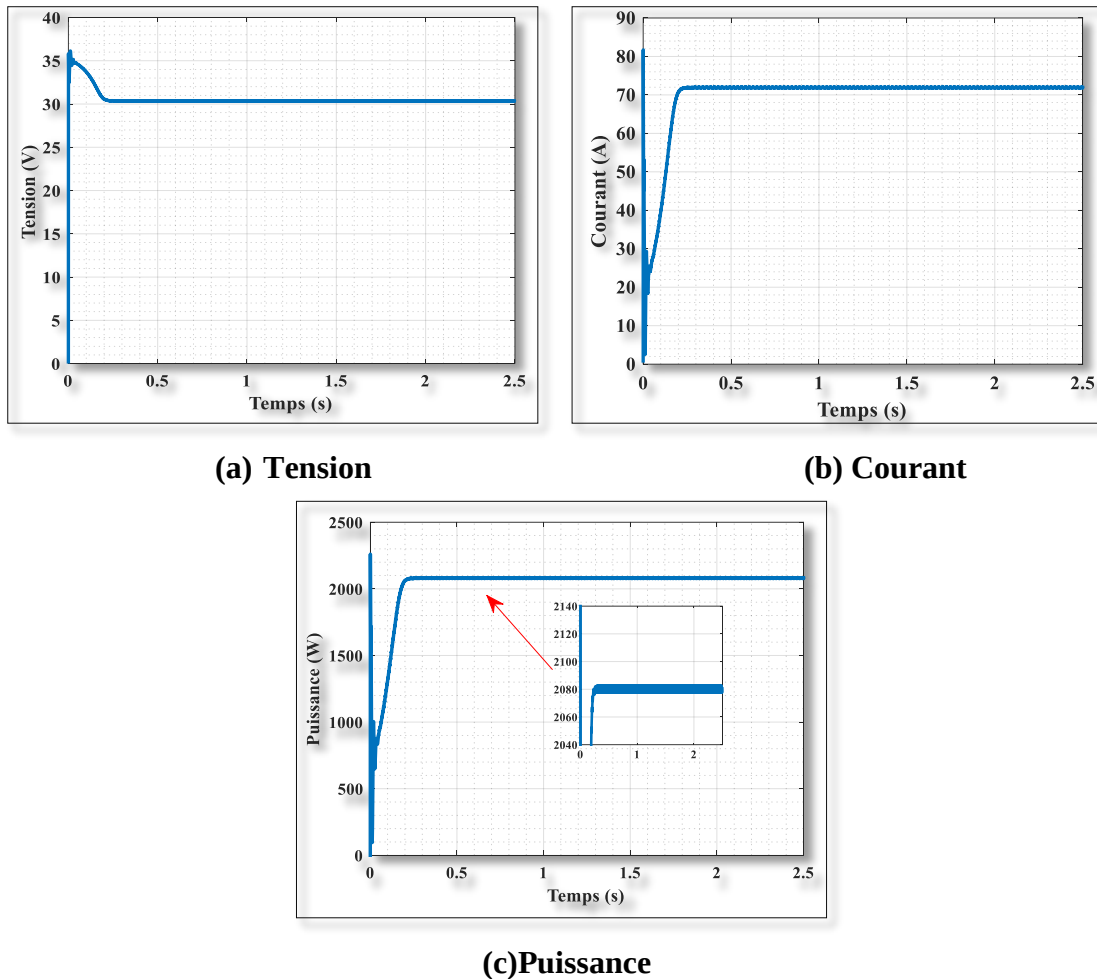


Figure 3.9 : Résultats de l'évolution de l'algorithme INC dans des conditions STC

Les figures (3.8 et 3.9) illustrent la forme d'onde de la tension, du courant et de la puissance du GPV dans des conditions STC (1000 W/m^2 et 25°C). Les inférences représentées prouvent la faisabilité des deux commandes proposées. Le GPV produit sa puissance maximale d'environ 2,1 kW, avec une tension maximale de 30 V et un courant maximal de 70 A.

3.4.2 Caractéristiques sous irradiation solaire variable

Des irradiances solaires variables ont été appliquées. Figure (3.10) réparties sur trois intervalles de temps comme suit :

- De 0 à 0,8 seconde, l'irradiation solaire est de 1000 W/m^2 ;
- De 0,8 à 1,8 seconde, l'irradiation solaire est de 300 W/m^2 ;
- De 1,8 à 2,5 secondes, l'irradiation solaire est de 500 W/m^2 .

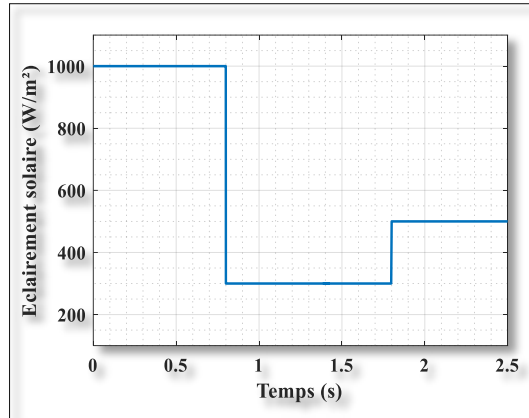


Figure 3.10 : Variation de l'irradiation solaire

3.4.2.1 Puissance transmise à la charge

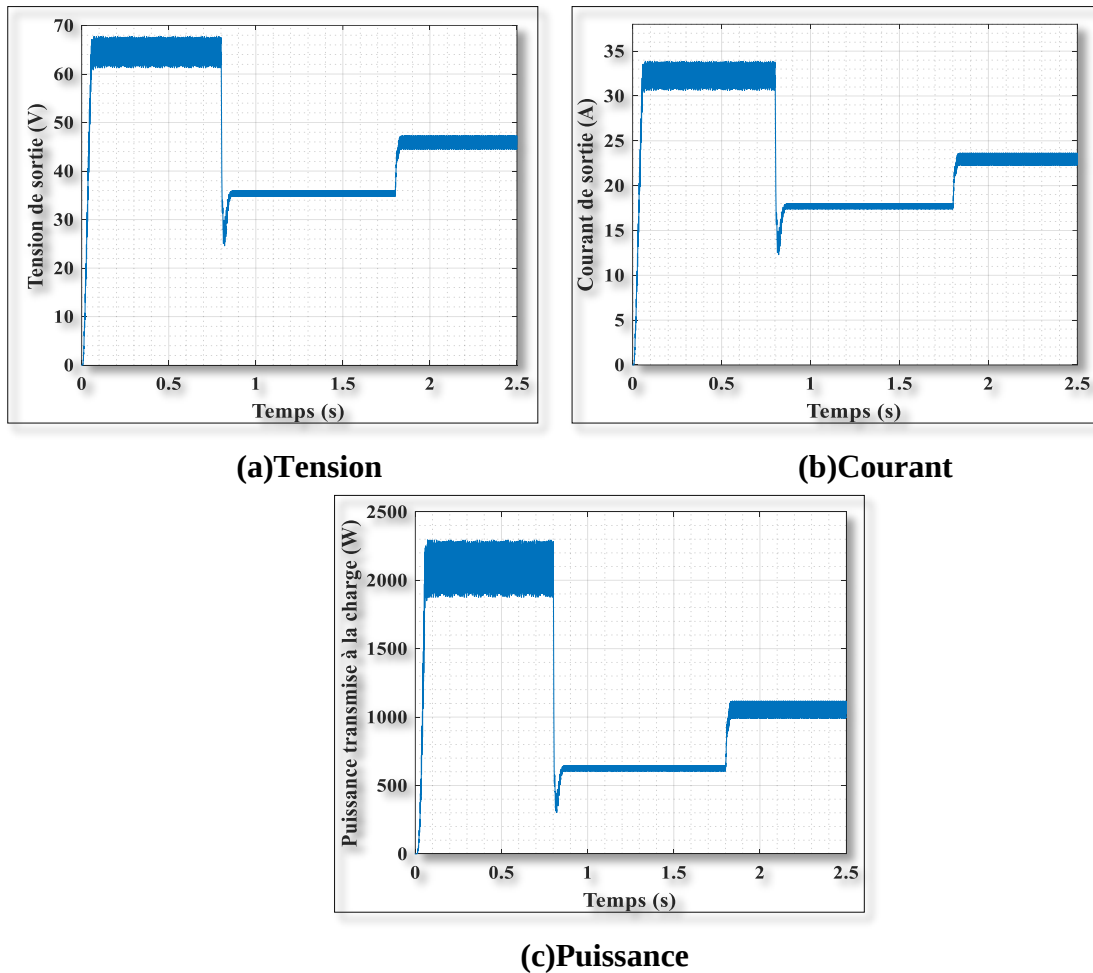


Figure 3.11 : Résultats de l'évolution de l'algorithme P&O des grandeurs de la charge

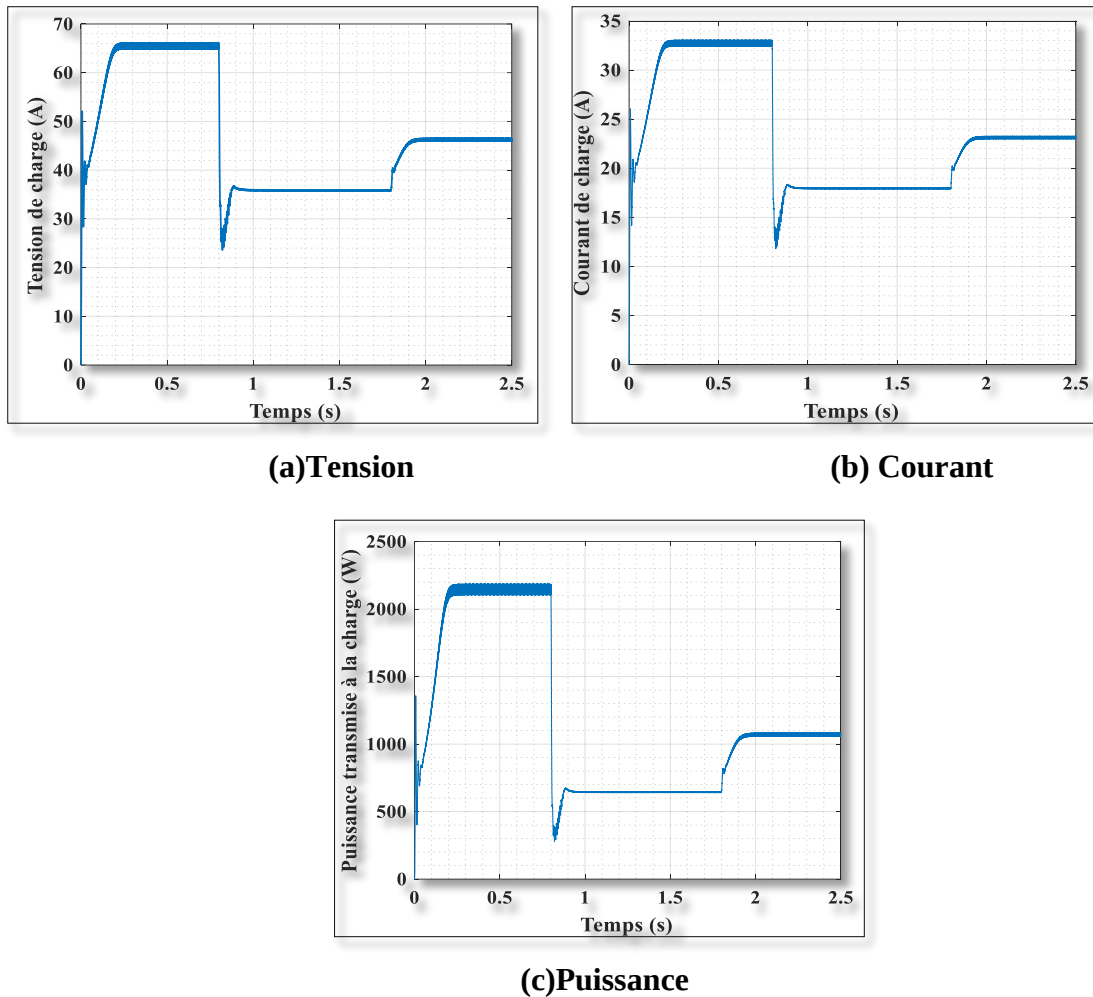
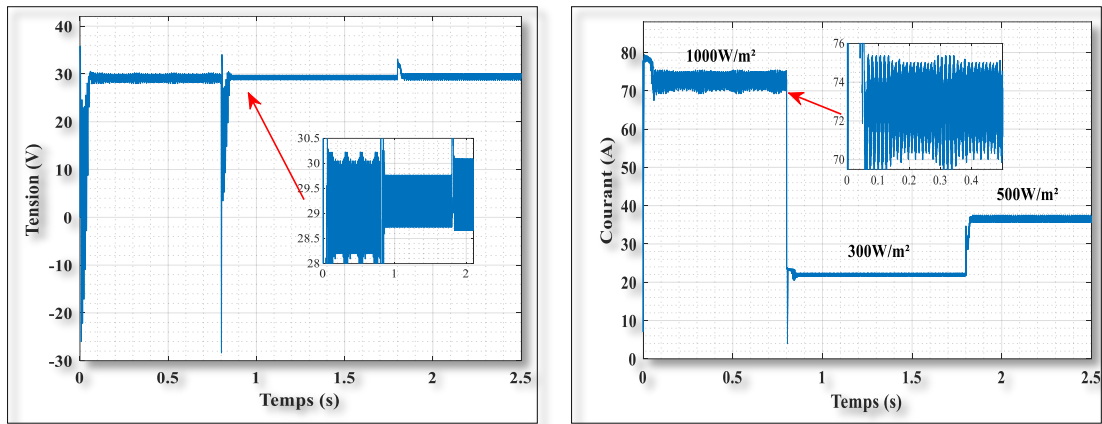


Figure 3.12 : Résultats de l'évolution de l'algorithme INC des grandeurs de la charge

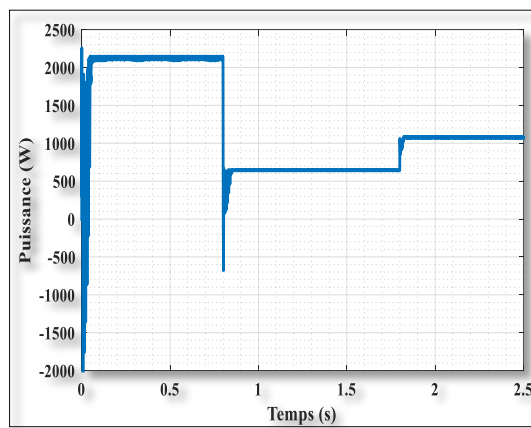
Les figures (3.11 et 3.12) montrent clairement que les deux algorithmes fonctionnent bien, en suivant le point de puissance maximale et que le convertisseur élévateur DC/DC fonctionne également bien, en augmentant la tension de 29 V à 65 V. Figure (3.11.a), tandis que le courant diminue avec l'augmentation de la tension. Figure (3.11.b) tout en maintenant la puissance transférée à la charge (2100 à 1000 W/m²).

3.4.2.2 Résultats de l'évolution de l'algorithme P&O



(a) Tension

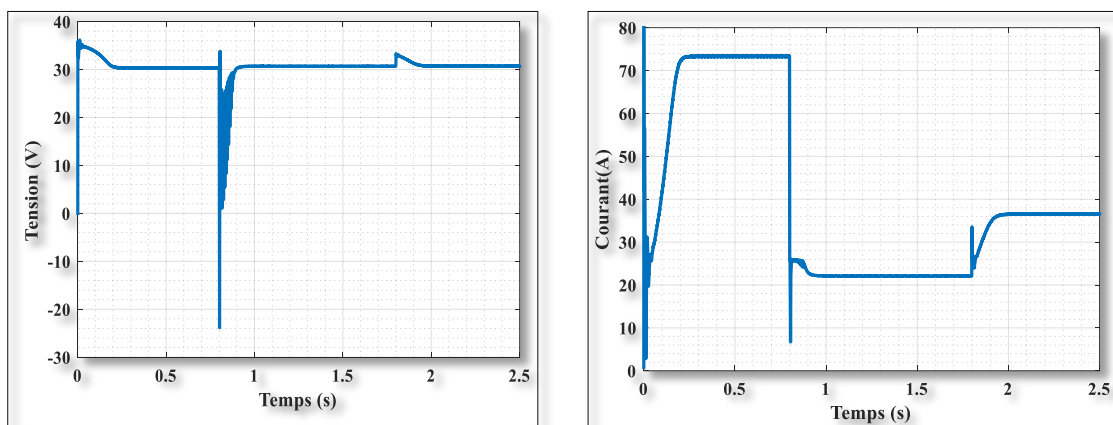
(b) Courant



(c) Puissance

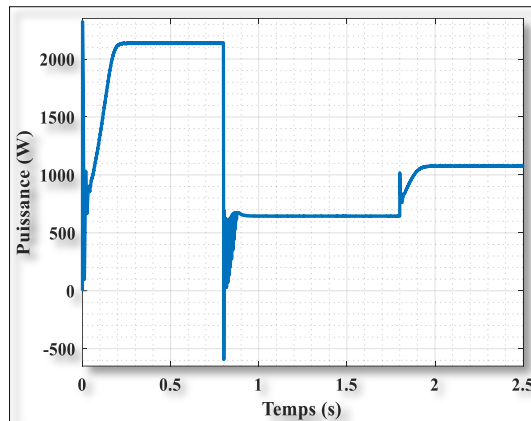
Figure 3.13 : Résultats de l'évolution de l'algorithme P&O sous irradiation variable

3.4.2.3 Résultats de l'évolution de l'algorithme INC



(a) Tension

(b) Courant



(c) puissance

Figure 3.14 : Résultats de l'évolution de l'algorithme INC sous irradiation solaire Variable.

Les figures (3.13 et 3.14) montrent que la puissance optimale est obtenue sous une illumination de 1000 W/m^2 , soit 2100 W , avec un court temps de transition de $0,05 \text{ s}$ pour l'algorithme P&O et de $0,2 \text{ s}$ pour l'algorithme INC. Après la baisse du niveau d'illumination à 300 W/m^2 , le GPV s'est ajustée à sa nouvelle valeur optimale de 660 W . Suite à une nouvelle augmentation de l'ensoleillement à 500 W/m^2 , un réajustement s'opère au point optimal de 1100 W . Il est observé que le comportement en régime permanent du système PV utilisant l'algorithme INC est plus stable que celui de la méthode P&O.

3.4.3 Caractéristiques sous température variable

Des températures variables ont été appliquées, réparties sur trois intervalles de temps comme suit :

- 0 à 0,8 seconde, la température est de 25°C ;
- De 0,8 à 1,8 seconde, la température est de 40°C ;
- De 1,8 à 2,5 secondes, la température est de 60°C .

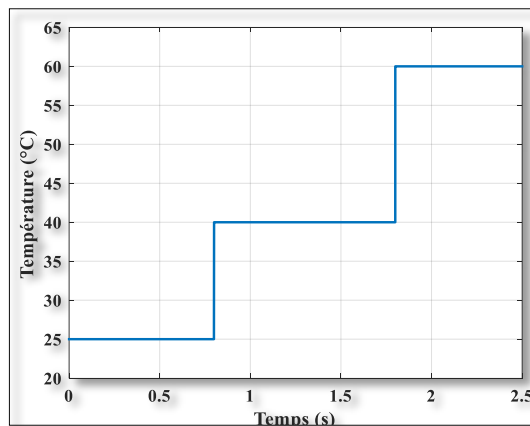


Figure 3.15 : Variation de la température

3.4.3.1 Résultats de l'évolution de l'algorithme P&O

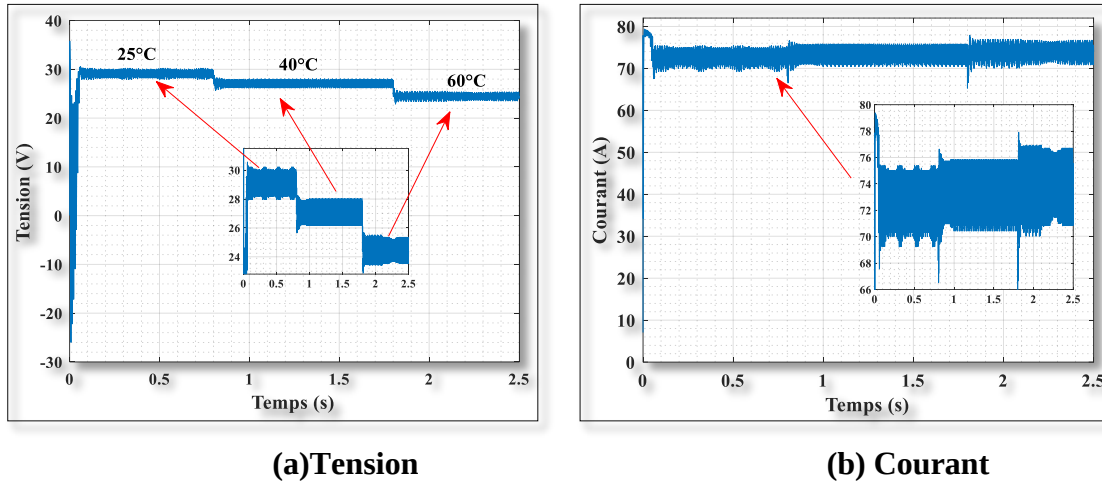


Figure 3.16 : Résultats de l'évolution de l'algorithme P&O sous température variable

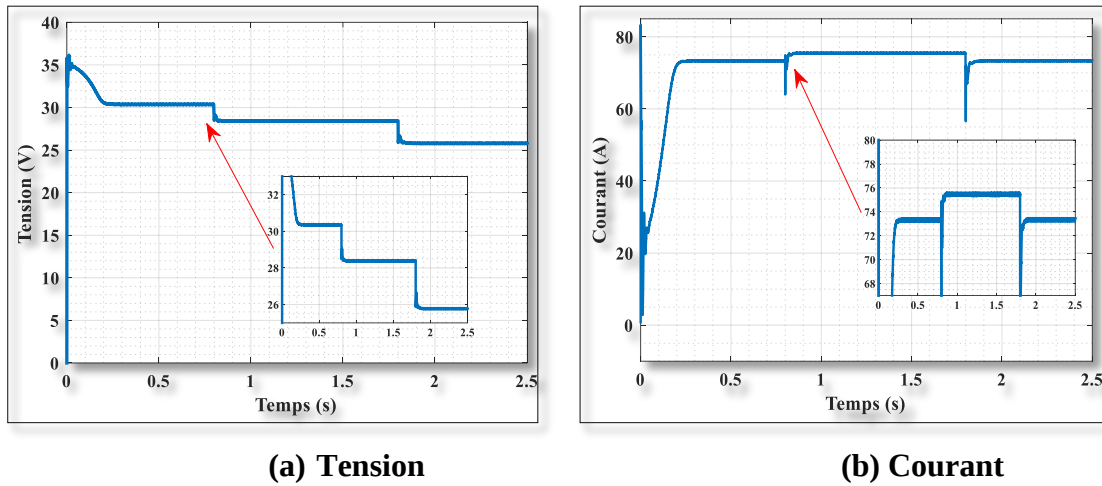


Figure 3.17 : Résultats de l'évolution de l'algorithme INC sous température variable

Les résultats montrent que la puissance de sortie du PVG varie avec les changements d'irradiation solaire et de température, et que les deux algorithmes produisent des courbes de sortie similaires. Les méthodes proposées donnent des résultats satisfaisants, montrant que, quelles que soient les conditions de fonctionnement, le système de contrôle transfère toujours toute l'énergie produite par le GPV à la charge. De plus, la simulation des méthodes proposées démontre l'efficacité et la robustesse de ces méthodes dans différentes conditions météorologiques.

Tableau 3.4 : Tableau comparatif entre les deux algorithmes MPPT

MPPT	η_{MPPT} %	Les avantages	Les inconvénients
------	-----------------	---------------	-------------------

P&O	81.5 - 96.5	- Une structure simple. - Mise en œuvre facile. - Peu de paramètres de mesure.	- Présente des oscillations autour du MPP. - Perte occasionnelle de recherches MPP lors de conditions météorologiques changeantes rapidement.
IncCond	89.9 - 98.2	- Il n'y a aucune perte par rapport au MPP. - Ne présente aucun risque de divergence par rapport au MPP.	- Le temps d'exécution de l'algorithme est plus long car il est plus complexe.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons appliqué deux méthodes classiques de recherche du point de puissance maximale (MPPT), la méthode perturbation et observation (P&O) et la méthode de conductance incrémentale (INC), pour la recherche du point de puissance maximale sous différentes variations des conditions météorologiques (luminosité et la température). Cette comparaison consiste à étudier les performances de ces contrôleurs MPPT (temps de réponse et ondulations) autour du point de puissance optimal. La méthode INC montre qu'elle a de meilleures performances par rapport à la méthode P&O, avec une erreur en régime permanent très faible, une absence d'ondulations autour du MPP et une grande robustesse face aux différentes variations des conditions atmosphériques.

Conclusion générale

La demande énergétique mondiale connaît une croissance rapide, tandis que les ressources naturelles comme l'uranium, le gaz et le pétrole s'amenuisent en raison de l'industrialisation intensive de ces dernières années. Pour faire face à cette situation, l'attention se tourne vers les énergies renouvelables, notamment l'énergie solaire PV, une source propre, silencieuse, gratuite et abondante. Son utilisation est en forte expansion à l'échelle mondiale.

Dans ce contexte, ce travail s'intéresse à la modélisation et à la simulation d'un générateur PV afin d'évaluer les performances de deux techniques classiques de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) : Perturb and Observe (P&O) et Incremental Conductance (INC). Ces algorithmes permettent d'optimiser l'extraction de l'énergie du système PV.

Le premier chapitre présente les principales sources d'énergie consommées dans le monde, la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables au niveau mondial et en Algérie, ainsi que les étapes clés du programme algérien de développement des énergies renouvelables. Il y est aussi question du principe de conversion PV, des différents types de cellules disponibles sur le marché, et des avantages et inconvénients des systèmes PV.

Le second chapitre traite de la modélisation mathématique des composants du système, en particulier du GPV, en analysant l'impact des conditions climatiques (ensoleillement, température, ombrage) sur les courbes caractéristiques I-V et P-V. Il inclut également une section sur les méthodes de protection des systèmes PV.

Le troisième chapitre aborde l'optimisation du rendement du système. L'objectif est d'ajuster le gain d'un convertisseur DC-DC placé entre le générateur et la charge afin de maximiser la puissance délivrée. Une étude comparative des deux algorithmes MPPT (P&O et INC) est réalisée en termes de simplicité, rapidité de convergence, stabilité et adaptabilité aux variations climatiques.

Les simulations révèlent que la performance du générateur décroît avec l'élévation de la température, la baisse de l'ensoleillement et les variations de charge. En conditions standards (STC), le convertisseur DC-DC et les commandes MPPT fonctionnent efficacement. Le convertisseur parvient à fournir une tension de sortie supérieure à celle du générateur seul, tandis que le MPPT permet un transfert optimal de la puissance vers la charge.

L'algorithme P&O, simple et facile à implémenter, présente toutefois des oscillations autour du point de puissance maximale (MPP) en régime permanent, ce qui entraîne une perte d'énergie.

L'algorithme INC, bien que plus complexe, réduit ces oscillations et assure un meilleur suivi du MPP, avec des performances supérieures et une réponse plus stable. Sa complexité augmente néanmoins le temps de calcul. Globalement, l'étude comparative montre une efficacité proche entre les deux méthodes, avec un léger avantage pour l'INC, notamment en cas de fort ensoleillement.

Dans la continuité de cette étude, une piste prometteuse serait l'exploration de techniques de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) basées sur des approches dites intelligentes. En effet, les algorithmes classiques comme P&O et INC, bien qu'efficaces, présentent certaines limites, notamment en conditions environnementales fortement variables.

Le recours à des méthodes avancées telles que les réseaux de neurones artificiels (ANN), les systèmes flous (fuzzy logic), les algorithmes génétiques (GA), ou encore les algorithmes inspirés des essaims de particules (PSO), offre des perspectives intéressantes pour améliorer la précision, la stabilité, et la vitesse de suivi du MPP, tout en réduisant les pertes d'énergie.

Ces approches permettent une adaptation dynamique aux conditions météorologiques changeantes (nuages, ombrage partiel, variation de température) et peuvent être intégrées à des systèmes de contrôle embarqués pour une gestion énergétique plus efficace des installations PV. Le développement de telles solutions intelligentes pourrait ainsi contribuer à optimiser le rendement global des systèmes PV, en rendant leur exploitation plus autonome, robuste et performante, en particulier dans des environnements complexes ou isolés.

Bibliographies

- [1] C. SYMON " Changement climatique : faits, tendances et implications pour le monde économique " Cinquième Rapport d'Évaluation du GIEC, Groupe de Travail n°1. Septembre 2013.
- [2] Ph. Amprosi, S. Hellegate " Changement climatiques et enjeux de sécurité " Centre international de recherche sur l'environnement et le développement, Septembre 2005.
- [3] M. Lakhdar LOUAZENE " Contribution à l'optimisation des systèmes photovoltaïques utilisés pour l'irrigation dans les zones sahariennes – Application zone de Ouargla " Doctorat en Sciences université el Hadj Lakhdar – Batna 10/2015
- [4] A. Bouchakour and M. Brahmi, "A comparative and analytical study of various MPPT techniques applied in PV systems for fast changing environmental conditions " 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference, Marrakech, Ouarzazate, Morocco, December 2015.
- [5] "Rapport Mondial 2012 Sur Les Energies Renouvelables ", Renewable Energy Policy Network for the 21st Century.
- [6] G. Masson, S. Orlandi, M. Rekingier "Global market outlook For Photovoltaics 2014-2018 " EPIA – the European Photovoltaic Industry Association 2014.
- [7] O. Schäfer, J. Watson " Global Market Outlook For Solar Power / 2015 - 2019 " EPIA – the European Photovoltaic Industry Association 2014.
- [8] Agence Internationale de l'Énergie (AIE) " Energy technology perspectives 2015, mobilising innovation to accelerate climate action " IEA PUBLICATIONS, 9 rue de la Fédération ", 75739 Paris Cedex 15.
- [9] Ministère de l'énergie et des Mines, " Programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique", 2020.
- [10] M. Boukli-Hacene omar, " Conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleure gestion énergétique ", mémoire de master, département de génie électrique, Université Abou-Bekr Belkaid de Tlemcen ,2011.
- [11] K. AMOKRANE " Dimensionnement et optimisation d'un système de pompage photovoltaïque destiné pour l'alimentation en eau potable ", thèse doctorat, université de Bejaia 2016.
- [12] Ministère des Affaires Etrangères du Danemark " Appui technique/prestations de services pour l'évaluation de l'impact économique, technologique et environnemental de la réglementation nationale et des incitations relatives aux énergies renouvelables et à l'efficacité énergétique " Algérie (Projet) Avril 2010.
- [13] AIE (Agence Internationale de l'Energie) 2010: Electricité/chaleur en Algérie en 2010, Paris.
- [14] Ministry of energy and mines designed " Renewable Energy and Energy Efficiency Program " Sonelgaz Group Company, March 2011.
- [15] Y. PANKOW " Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau Basse Tension. Application au générateur photovoltaïque " Thèse de doctorat, Electronique Electrotechnique et Automatique, 2004.

- [16] G. Abdelkader " Contribution à l'étude d'un système photovoltaïque hybride de production d'énergie électrique " Thèse de doctorat Intelligent Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbès, 2017
- [17] S. Mostefa kara, " étude et simulation de cellules photovoltaïques à couches minces à base de cis et cigs ", mémoire de magister, tlemcen, 2012
- [18] A. Bouchakour, M. Brahami and Abdelhalim Borni " Comparative Study on Photovoltaic Pumping Systems Driven by Different Motors Optimized with Sliding Mode Control " *International Journal of Engineering and Technology Innovation*, vol. 7, no. 3, 2017, pp. 201 – 216.
- [19] A. SARR "Simulation des systèmes hybrides photovoltaïques", Maîtrise en technologie des systèmes M. ING, Ecole de technologie supérieure. Université du Québec – Montréal, 12, 1998.
- [20] A. Bouchakour "Modélisation et Simulation d'un Système de Pompage Photovoltaïque" DOCTEUR EN SCIENCES, Electrotechnique, UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES 2018.
- [21] A. Borni "P&O-PI and fuzzy-PI MPPT Controllers and their time domain optimization using PSO and GA for grid-connected photovoltaic system: a comparative study" *Int. J. Power Electronics*, Vol. 8, No. 4, 2017.
- [22] H. Malek " Control of grid-connected photovoltaic systems using fractional order operators " Thesis doctoral UTAH STATE UNIVERSITY Logan, Utah 2014
- [23] M. Dhiaa Halboot,, T. Khatib, F. Nagi " A review of photovoltaic water pumping system designing methods, control strategies and field performance " *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,68 (2017), 70-86, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.129>.
- [24] S. AOUEFI " Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque " UNIVERSITE FERHAT ABBAS — SETIF-1 UFAS (ALGERIE), Mémoire de Magister, 2014
- [25] M. L. LOUAZENE " Contribution à l'optimisation des systèmes photovoltaïques utilisés pour l'irrigation dans les zones " sahariennes – Application zone de Ouargla " UNIVERSITE EL HADJ LAKHDAR - BATNA " Thèse de Doctorat en Sciences, 2015.
- [26] C. B. Nzoundja Fapi, A.Badji, H. Tchakounte " Assessment of two MPPT algorithms for a standalone photovoltaic system with variable weather condition " *International Journal of Engineering &Technology*, 7 (4) (2018) 6790-6796, DOI: 10.14419/ijet.v7i4.24460.
- [27] A. Bouchakour, A. Borni & M. Brahami " Comparative study of P&O-PI and fuzzy-PI MPPT controllers and their optimisation using GA and PSO for photovoltaic water pumping systems " *International Journal of Ambient Energy*, 2019, <https://doi.org/10.1080/01430750.2019.1614988>.
- [28] L. ZAROUR " ETUDE TECHNIQUE D'UN SYSTEME D'ENERGIE HYBRIDE PHOTOVOLTAÏQUE-EOLIEN HORS RESEAU " UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE, Thèse de Doctorat en Sciences, 2010.
- [29] H. BABAOUAMER " étude des défauts dans un générateur photovoltaïque " master, Electrotechnique, Univ, Ghardaïa 2017.
- [30] A. Meshari; Hurley, W. Gerard (2022): A Comparative Study between Four Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Array System under Partial Shading Conditions. *TechRxiv*. <https://doi.org/10.36227/techrxiv.20682382.v1>
- [31] L. Fialhoa, R. Melicio " Effect of Shading on Series Solar Modules: Simulation and Experimental Results " *Science direct, Procedia Technology* 17 (2014) 295 – 302.

- [32] L. Chafie " *Détection et Localisation de Défauts dans un Système Photovoltaïque* " Master en Électrotechnique, UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU 2013.
- [33] A.M. Makbul Ramli, S. Twaha " *A review on maximum power point tracking for photovoltaic systems with and without shading conditions*" *Renewable and Sustainable Energy Reviews* " *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67 (2017) 144–159.
- [34] P. K Pathak, A. K Yadav " *Advanced Solar MPPT Techniques Under Uniform and Non-Uniform Irradiance: A Comprehensive Review* " *Journal of Solar Energy Engineering* · January 2020.
- [35] B. Ghita, K.Mohammed, A. Lagrioui " *Application and Comparison Between the Conventional Methods and PSO Method for Maximum Power Point Extraction in Photovoltaic Systems Under Partial Shading Conditions* " *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)*, Vol. 9, No. 2, June 2018, pp. 631~640. ISSN: 2088-8694, DOI: 10.11591/ijpeds.v9.i2.pp631-640.
- [36] N. Hashim, Z. Salam, DJohari " *DC-DC Boost Converter Design for Fast and Accurate MPPT Algorithms in Stand-Alone Photovoltaic System* " *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)*, Vol. 9, No. 3, September 2018, pp. 1038~1050, ISSN: 2088-8694, DOI: 10.11591/ijpeds.v9.i3.pp1038-1050.
- [37] A. M. Eltamaly, Hassan M.H. Farh, M. F. Othman " *A novel evaluation index for the photovoltaic maximum power point tracker techniques*" *Solar Energy* 174 (2018), 940-956
- [38] M. Kermadi, El M. Berkouk " *Artificial intelligence-based maximum power point tracking controllers for Photovoltaic systems: Comparative study* " *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 69 (2017), 369-386
- [39] S. Alsadi, B. Alsayid " *Maximum Power Point Tracking Simulation for Photovoltaic Systems Using Perturb and Observe Algorithm* " *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, Volume 2, Issue 6, December 2012.
- [40] N. Aouchiche, M.S. Aït Cheikh et A. Malek " *Poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque par les méthodes de l'incrémentation de conductance et la perturbation & observation* " *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 16 N°3 (2013) 485 – 498.
- [41] R. J. Mukti " *Designing an Efficient Photovoltaic System with Maximum Power Point Tracking Technique by Comparing Different Converter Topologies* " 2014 17th International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT).
- [42] B. Subudhi and R. Pradhan " *A Comparative Study on Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Power Systems* " *IEEE TRANSACTIONS ON SUSTAINABLE ENERGY*, VOL. 4, NO. 1, JANUARY 2013.

ANNEX

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Université de
Ghardaïa
Faculté des Sciences et de la Technologie



جامعة غرداية

كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم : قسم العلوم والتكنولوجيا

غرداية في : 31/05/2025

شعبة : ليسانس مهنية في الطاقات المتجددة
تخصص : طاقات متجددة و البيئة

شهادة ترخيص بالتصحيح والاياداع:

انا الأستاذ :بوشقور عبدالحق

بصفتي المشرف المسؤول عن تصحيح مذكرة تخرج (ليسانس/ماستر/دكتورا) المعنونة بـ:

Étude et Optimisation des Performances d'un Générateur Photovoltaïque

من انجاز الطالب (الطالبة):

لعمش منال

فاطمة الزهراء بن عروس

شيماء السنوسي

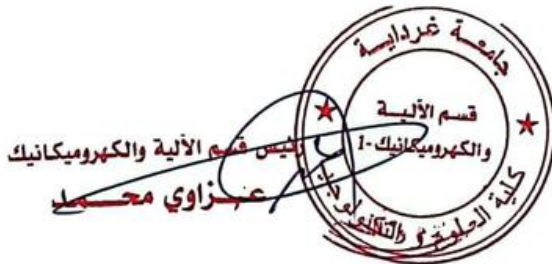
التي نوقشت/قومت بتاريخ: 2025/05/20

اشهد ان الطالب/الطالبة قد قام /قاموا بالتعديلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة المناقشة وقد تم

التحقق من ذلك من طرفنا

وقد استوفت جميع الشروط المطلوبة .

مصادقة رئيس القسم



امضاء المسؤول عن التصحيح

محسن بشوات
مصباح شرف الدين