

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Technologie
Département : Electrotechnique
Domaine : Electrotechnique
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Commande Electrique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

**Etude Comparative des Algorithmes de Commande MPPT
pour Un Système Photovoltaïque**

Présenté par : *Berghiche Sami et Chelali Boubakeur*

Encadrant: *Benabda AminaGrade : MABUniversité : Badji Mokhtar Annaba*

Jury de Soutenance :

Chine Abdelghani	MAA	Badji-Mokhtar Annaba	Président
Ourici Amal	Prof	Badji-Mokhtar Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2023/2024

المخلص

يعد التحكم MPPT ضروريًا لزيادة توليد الطاقة إلى الحد الأقصى وتحسين كفاءة الطاقة وتقليل تكاليف التشغيل وضمان أداء موثوق للأنظمة الكهروضوئية.

تدرس الأطروحة التحكم في MPPT (الحد الأقصى لتتبع نقطة الطاقة) من خلال مقارنة خوارزميتين شائعتين: P&O (الاضطراب والمراقبة) و INC (الموصلية التزايدية).

تقوم الأطروحة بتحليل أداء هاتين الخوارزميتين من حيث الكفاءة القصوى لتتبع نقطة الطاقة وزمن التقارب والمتانة للتغيرات في الظروف البيئية. يتم الحصول على نتائج المحاكاة باستخدام أداة Matlab/Simulink.

الكلمات الدالة :

الأنظمة الكهروضوئية، محول التعزيز، MPPT، P&O، INC

Abstract

MPPT control is essential for maximising energy production, optimising energy efficiency, reducing operating costs and ensuring reliable performance of photovoltaic systems.

This paper investigates Maximum Power Point Tracking (MPPT) control by comparing two popular algorithms: P&O (Perturb and Observe) and INC (Incremental Conductance).

The thesis analyses the performance of these two algorithms in terms of maximum power point tracking efficiency, convergence time and robustness to varying environmental conditions. Simulated results are obtained using the Matlab/Simulink tool.

Key words:

PV systems, boost converter, MPPT, P&O, INC

Résumé

La commande MPPT est essentielle pour maximiser la production d'énergie, optimiser le rendement énergétique, réduire les coûts d'exploitation et assurer une performance fiable des systèmes photovoltaïques.

Le mémoire étudie la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) en comparant deux algorithmes populaires : P&O (Perturb and Observe) et INC (Incremental Conductance).

Le mémoire analyse les performances de ces deux algorithmes en termes d'efficacité de suivi du point de puissance maximale, de temps de convergence et de robustesse face aux variations des conditions d'environnement. Les résultats simulés sont obtenus à l'aide de l'outil Matlab/Simulink.

Mots clés :

Systemes PV, convertisseur survolteur, MPPT, P&O, INC

Remerciment

Tout d'abord Nous tenons à remercier Madame Amina BENABDA MAB à l'université de Badji-Mokhtar d'Annaba pour l'encadrement qu'elle Nous a assurée et ses précieux et judicieux conseils qu'elle n'a cessé de Nous prodiguer tout au long de ce projet, sa confiance témoignée, sans oublier sa qualité humaine. Elle trouve ici Notre gratitude et Notre reconnaissance profonde.

Nous remercions Sincèrement Monsieur CHINE et Madame Ourici

D'accepter de faire partie du Jury.

Dédicaces

Ce modeste travail est dédié à :

Notre très chers parents, pour leur sacrifices, et qui n'ont jamais cessé de Nous encourager que Dieu les garde.

Nos Chers amis

La Liste Des Figures

Chapitre I : Généralité Sur Les énergies renouvelables

Fig.1 : centrale hydraulique.....	4
Fig.2 : Schéma d'une installation géothermique.....	4
Fig.3 : Installation de l'énergie de la biomasse.....	5
Fig.4 : centrale hydrolienne.....	6
Fig.5 : Une Eolienne.....	7
Fig.6 : une installation solaire.....	10
Fig.7 : La carte d'éclairement solaire de l'Algérie.....	12

Chapitre II : Modélisation de la Cellule Photovoltaïque

Fig.8 : Cellule au silicium monocristallin.....	15
Fig.9 : Cellule au silicium poly-cristallin.....	16
Fig.10 : Cellule au silicium amorphe.....	16
Fig.11 : Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles, 2M7P.....	17
Fig.12 : Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles, 2M6P.....	18
Fig.13 : Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles, 2M5P.....	19
Fig.14 : Caractéristique I(V) et P(V) d'une cellule photovoltaïque 2M5P.....	19

Chapitre III : Etage D'adaptation

Fig.15 : Schéma équivalent du modèle à une exponentielle ,L5P	
Fig.16 : Schéma électrique d'un hacheur Buck.....	23
Fig.17 : Schéma électrique d'un hacheur boost.....	23
Fig.18 :Principe de la commande MPPT.....	24
Fig.19 : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale a) suite à une variation d'éclairement, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de température.....	25

Fig.20: Principe classique d'une MPPT pouvant être implantée en numérique.....	26
Fig.21: Principe de fonctionnement d'une commande MPPT.....	27
Fig.22: Changement d'éclairement et conséquence sur les courbes de puissance d'un générateur PV ainsi que sur l'adaptation source-charge.....	28
Fig.23 : Principe de la méthode à contre réaction de tension avec tension de référence.....	29
Fig.24: Principe de la méthode MPPT à courant de référence en fonction de I_{sc}	29
Fig.25 : Algorithme de perturbation et d'observation (P&O).....	30
Fig.26: Algorithme incrémentation de la conductance.....	32
 <u>Chapitre IV : Partie Simulation</u>	
Fig.27 : schéma bloc équivalent du courant photovoltaïque.....	34
Fig.28 : schéma bloc équivalent du courant Photovoltaïque.....	35
Fig .29 : schéma bloc équivalent du courant de Photonique.....	35
Fig .30 : schéma bloc équivalent du courant de saturation	36
Fig .31 : schéma bloc équivalent du courant de saturation inverse de la diode	36
Fig .32 : schéma bloc équivalent du courant shunt.....	37
Fig .33 : Caractéristique I-V	37
Fig .34 : Caractéristique P-V.....	38
Fig .35 : l'effet d'éclairement sur I-V.....	38
Fig .36 : effet d'éclairement sur P-V.....	39
Fig .37 : effet de Température sur I-V.....	40
Fig .38 : effet de Température sur P-V.....	40
Fig .39 : schéma bloc du modèle étudié	42
Fig .40 : Tension Photovoltaïque avec P&O.....	43
Fig .41 : Tension de sortie V_{out} avec P&O.....	43

Fig .42 :	Puissance Photovoltaïque avec P&O.....	44
Fig .43 :	Rapport Cyclique avec P&O.....	44
Fig .44 :	Tension Photovoltaïque avec INC.....	45
Fig .45 :	Tension de sortie Vout avec INC.....	45
Fig .46 :	Puissance Photovoltaïque avec INC.....	45
Fig .47 :	Rapport Cyclique avec INC.....	46
Fig .48 :	Tension Photovoltaïque avec P&O et INC.....	46
Fig .49 :	Tension de Sortie avec P&O et INC.....	46
Fig .50 :	Puissance Photovoltaïque avec P&O et INC.....	47
Fig .51 :	Rapport cyclique avec P&O et INC.....	47
Fig .52 :	Tension de Sortie avec P&O et INC.....	47
Fig .53 :	Tension Photovoltaïque avec P&O et INC.....	48
Fig .54 :	Puissance Photovoltaïque avec P&O et INC.....	48
Fig .55 :	Rapport cyclique avec P&O et INC.....	48
Fig .56 :	Tension Photovoltaïque avec P&O et INC.....	49
Fig .57 :	Tension de sortie avec P&O et INC.....	49
Fig .58 :	Puissance Photovoltaïque avec P&O et INC.....	49
Fig .59 :	Rapport Cyclique avec P&O et INC.....	49

TABLE DE MATIERES

Chapitre I : Généralité sur les énergies renouvelables

Introduction Général.....	1
I.1 Introduction.....	3
I.2 Les sources des énergies renouvelables.....	3
I.2.1 L'énergie hydraulique.....	3
I.2.1.1 Principe de fonctionnement.....	3
I.2.2 L'énergie géothermique.....	4
I.2.2.1 Principe de fonctionnement	4
I.2.3 L'énergie de la biomasse.....	5
I.2.3.1 Principe de fonctionnement.....	5
I.2.4 L'énergie de la marine.....	6
I.2.4.1 Principe de fonctionnement.....	6
I.2.5 L'énergie éoliennes.....	6
I.2.5.1 Principe de fonctionnement	7
I.2.6 L'énergie solaire.....	7
I.2.6.1 Principe de fonctionnement	8
I.3. Production d'énergie solaire photovoltaïque.....	8
I.4. Production d'énergie solaire thermique.....	8
I.5. Les différentes installations d'énergie solaire.....	8
I.6. Pour les particuliers.....	9
I.7. Pour les entreprises et industriels.....	9
I.8. Le gisement solaire en Algérie.....	10

Conclusion	11
<u>Chapitre II : Modélisation de la Cellule Photovoltaïque</u>	
II-1 Introduction.....	13
II-2 Principe de fonctionnement de la cellule.....	13
II-2-1 Les différents types de cellules photovoltaïques.....	14
A- Cellule au silicium monocristallin	14
B- Cellule au silicium poly-Cristallin.....	15
C- Cellule au silicium amorphe	15
II-3 Modélisation des cellules photovoltaïques	15
II-4 Modèle à deux diodes.....	16
II-4-1 Modèle à sept paramètres (2M7P)	16
II-4-2 Modèle à six paramètres (2M6P)	17
II-4-3 Modèle à cinq paramètres (2M5P).....	17
II-5Modèle à un seul paramètre	18
II-5-1 Modèle à cinq paramètres (L5P)	18
Conclusion	19
<u>Chapitre III : La commande MPPT</u>	
III- Etude de convertisseur DC/DC	21
III-1 Introduction.....	21
III-2 Les hacheurs.....	21
III-3 Type de hacheurs.....	21
III-3-1 Hacheur Buck.....	21
III-3-2 Hacheur boost.....	22
III-4 La commande MPPT	22

III-5 Suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque.....	23
III-6 Principe du MPPT.....	23
III-7 Classification des techniques MPPT	25
III-8 Les premiers types de technique MPPT	25
III-8 Les premiers types de technique MPPT	26
III-10 Les méthodes de poursuite de MPP.....	27
III-10-1 Méthodes à contre réaction de tension.....	27
III-10-2 Méthodes à contre réaction de courant.....	28
III-10-3 Méthodes à contre réaction de puissance.....	28
III-10-4 Algorithme perturbation et observation.....	28
III-110-5 Algorithme incrémentation de la conductance.....	29

Chapitre IV : *Partie Simulation*

IV-1 Modèle étudié.....	33
IV-2 Effet de l'éclairement	37
IV-2-1 Interprétation.....	38
IV-3 Effet de température.....	38
IV-3-1 Interprétation.....	39
IV-4 Dimensionnement Hacheur.....	40
IV-5 Résultats de simulation de l'algorithme P&O.....	41
<u>IV-6</u> Résultats de simulation de la méthode d'Incrémenta de la Conductance.....	43
IV-7 Comparaison entre les deux technique MPPT P&O et INC	45
Conclusion.....	49
Conclusion.....	51

Introduction

générale

Introduction générale

L'énergie solaire est devenue une source d'énergie renouvelable de plus en plus importante dans le monde entier en raison de sa disponibilité abondante et de son impact environnemental réduit par rapport aux sources d'énergie traditionnelles. L'un des défis majeurs dans l'utilisation de l'énergie solaire est de maximiser l'efficacité de conversion de la lumière du soleil en électricité. Pour ce faire, des techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) sont essentielles dans les systèmes photovoltaïques (PV).

Parmi les différentes méthodes de suivi MPPT, deux algorithmes populaires sont largement utilisés et étudiés : Perturbation et Observation (P&O) et l'Incrémentation de la Conductance (INC). Ces deux techniques visent à ajuster continuellement les paramètres du système PV pour maintenir la sortie de puissance maximale, même dans des conditions de changement rapide telles que les variations de l'intensité lumineuse et de la température.

L'objectif de ce mémoire de fin d'études est de réaliser une étude comparative approfondie entre les algorithmes P&O et l'INC pour le suivi MPPT dans les systèmes PV. Cette étude vise à évaluer les performances, les avantages et les inconvénients de chaque algorithme dans différentes conditions de fonctionnement.

Ce travail se concentre sur l'étude et l'optimisation des systèmes d'énergies renouvelables, en mettant particulièrement l'accent sur la modélisation et la commande de cellules photovoltaïques, ainsi que sur les résultats de simulation associés. Cette introduction est articulée autour de quatre chapitres clés :

Différents Types d'Énergies Renouvelables, modélisation de la cellule photovoltaïque, la commande MPPT et les résultats de simulation.

Cette recherche fournira des informations précieuses pour les concepteurs et les ingénieurs travaillant dans le domaine des systèmes photovoltaïques, en les aidant à choisir la meilleure technique de suivi MPPT adaptée à leurs applications spécifiques. En outre, elle contribuera à l'avancement des connaissances dans le domaine de l'optimisation de la conversion de l'énergie solaire en électricité.

Chapitre I
Généralité sur
les Energies
Renouvelables

I.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous explorons les différentes sources d'énergies renouvelables disponibles, notamment l'énergie solaire, éolienne, hydraulique et biomasse. Nous examinons leurs principes de fonctionnement, leur disponibilité, ainsi que leurs avantages et inconvénients respectifs. Comprendre la diversité des sources d'énergie renouvelable est crucial pour développer des systèmes énergétiques durables et adaptés à divers contextes.

I.2. Les sources des énergies renouvelables

Les ressources des énergies renouvelables sont variées. On se restreint de façon générale.

à 5 ressources essentielles [1] :

I.2.1 L'énergie hydraulique

L'énergie hydraulique est une source d'énergie renouvelable qui émet très peu de gaz à effet de serre. Les mouvements de l'eau entraînés par le Soleil et la gravité à travers le cycle de l'eau, les marées et les courants marins sont utilisés par cette source d'énergie verte. La plupart du temps, les centrales hydrauliques génèrent de l'électricité en utilisant des chutes d'eau naturelles (cascades) ou artificielles (barrages hydroélectriques), le débit des cours d'eau ou les courants marins (marée, circulation thermohaline, etc.) [2]

I.2.1.1 principe de fonctionnement

L'énergie mécanique (cinétique et potentielle) de l'eau est utilisée pour produire de l'électricité hydraulique. Le procédé employé pour générer de l'électricité en utilisant la puissance de l'eau. Il est identique aux moulins à eau de l'Antiquité. Plutôt qu'une roue, l'eau entraîne une turbine qui déclenche un alternateur et génère de l'électricité.

On désigne ces structures sous le nom de centrales hydrauliques ou hydroélectriques. Ce sont ces imposantes constructions qui traversent certains fleuves ou rivières, ainsi que ces incroyables barrages que l'on peut observer aux confins des lacs, ainsi que des petites centrales sur de petits cours d'eau. [3]

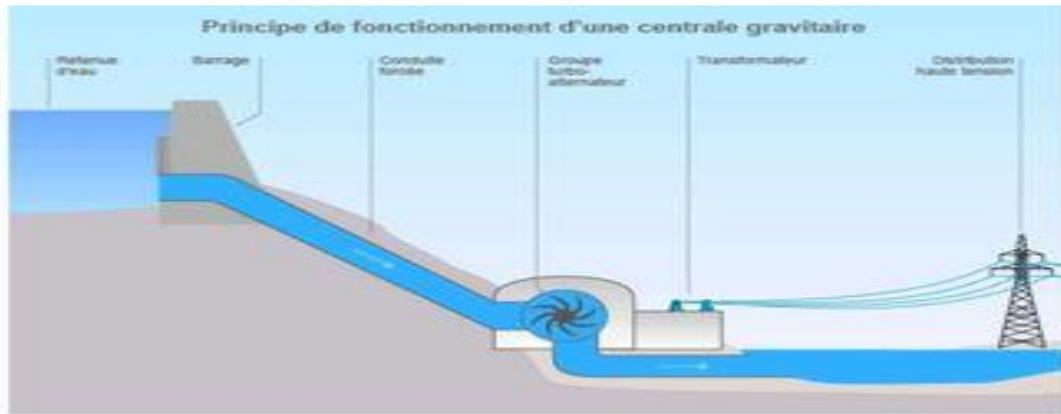


Fig.1 : centrale hydraulique.

I.2.2 L'énergie géothermique

La géothermie est un terme qui fait référence à la fois à la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre et à la technologie qui cherche à les exploiter. Par extension, la géothermie fait également référence à l'énergie géothermique provenant de la Terre qui est transformée en chaleur.

Afin de recueillir l'énergie géothermique, un fluide est entraîné dans les profondeurs de la Terre. Il est possible que ce fluide soit celui d'une nappe d'eau chaude captive naturelle, ou de l'eau injectée sous pression afin de briser une roche chaude et imperméable. Dans les deux situations, le liquide se réchauffe et retrouve une énergie thermique (calories). On utilise directement ou partiellement ces calories pour produire de l'électricité. [4]

I.2.2.1 principe de fonctionnement

Afin d'exploiter cette énergie souterraine, de l'eau froide est envoyée sous la Terre. Cette eau froide prend de la chaleur. On la pompe ensuite et on la ramène à la surface où elle est utilisée, soit dans le but de générer de l'électricité dans une centrale, soit en tant qu'eau chaude dans les logements (pour la douche, les radiateurs...).

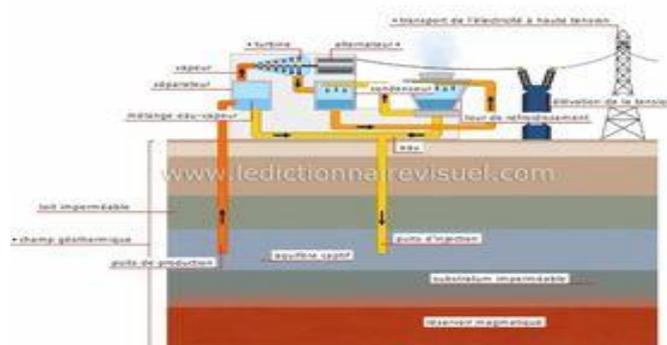


Fig.2 : Schéma d'une installation géothermique.

I.2.3 L'énergie de la biomasse

En énergie, et plus spécifiquement dans le domaine des bioénergies, le concept de biomasse fait référence à toutes les matières organiques provenant de plantes (algues incluses), d'animaux ou de fongiques qui peuvent être utilisées comme source d'énergie par combustion (comme le bois énergie), par méthanisation (comme le biogaz) ou par de nouvelles transformations chimiques (comme l'agro carburant). L'énergie de la biomasse est perçue comme une énergie renouvelable et durable tant qu'elle ne met pas en péril la fertilité du sol, qu'elle ne compétitionne pas trop pour l'utilisation des ressources (terres arables, eau, etc.), qu'elle n'a pas d'impacts excessifs sur la biodiversité, etc. En outre, même si elle offre de nombreux bénéfices écologiques et favorisant le développement local, elle peut être polluante (CO, CO₂, fumées, goudrons) si elle est mal utilisée ou si la biomasse utilisée est contaminée par des métaux lourds, des radionucléides, etc. (étant donné que les ressources fossiles sont naturellement contaminées par des métaux, souvent plus que le bois).[5]

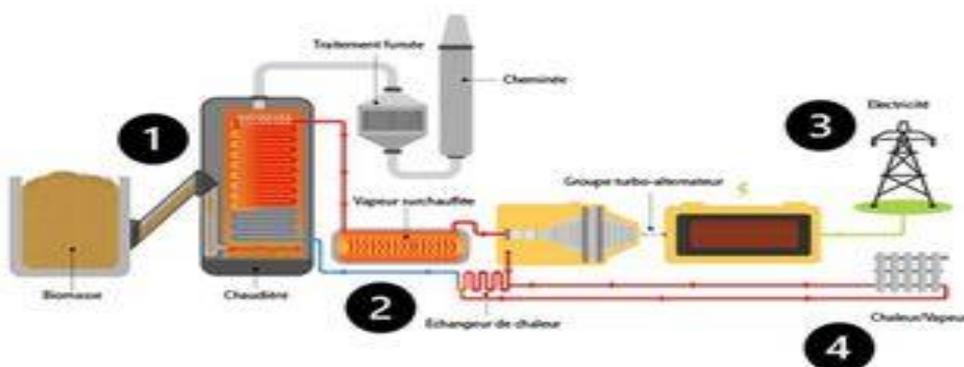


Fig.3 : Installation de l'énergie de la biomasse

I.2.3.1 Principe de fonctionnement

Le fonctionnement d'une centrale à biomasse est extrêmement simple, il ressemble même à celui d'une chaudière ou d'une chaudière à cogénération. Certaines situations. De manière générale, la chaleur générée par la combustion va chauffer un réservoir d'eau, ce qui va générer de la vapeur, similaire à une cocotte minute. Ainsi, cette vapeur d'eau sera libérée à une pression élevée, ce qui permettra de faire fonctionner une turbine connectée à un alternateur. Cet alternateur joue un rôle essentiel dans la centrale à biomasse, car il est responsable de la production d'électricité. La particularité des centrales à biomasse réside dans leur capacité à générer de l'électricité à partir des éléments dont nous n'avons plus besoin.

I.2.4 L énergie de la marine

L'énergie provenant des eaux de la mer et des océans est une forme d'énergie renouvelable qui repose sur les ressources naturelles. Elle est utilisée pour produire de l'électricité, principalement grâce aux flux de ces eaux. La plupart de notre planète est couverte d'eau, principalement par les mers et les océans. Elle représente donc une importante source d'énergie, aujourd'hui encore peu exploitée. Aucun gaz à effet de serre n'est émis par les énergies marines et leur matière première est disponible dans de nombreux pays du monde [6].

I.2.4.1 Principe de fonctionnement

La turbine hydraulique, appelée hydrolienne, exploite l'énergie des courants marins.

Étant donné que l'éolienne exploite l'énergie du vent. La turbine de l'hydrolienne offre la possibilité de

L'énergie hydraulique peut être convertie en énergie mécanique, ce qui permet de la convertir en électricité grâce à un alternateur [4].

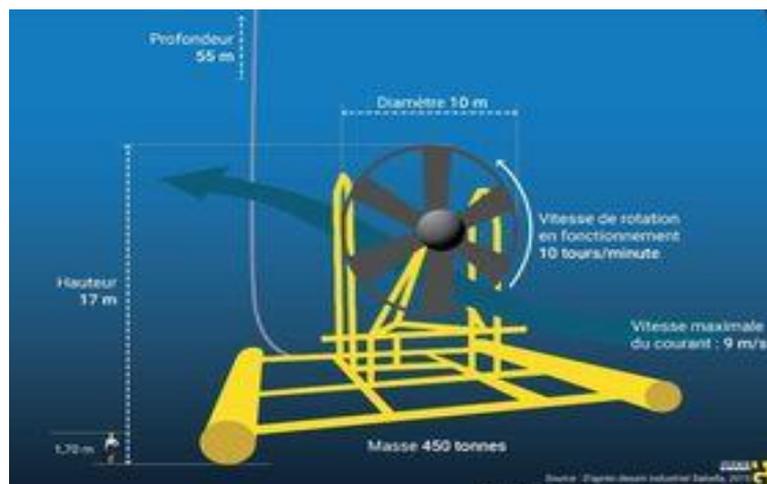


Fig.4 : centrale hydrolienne.

I.2.5 L'énergie éolienne

La production d'énergie éolienne repose sur l'utilisation du vent. La Terre est chauffée de manière inégale par le soleil, ce qui entraîne des variations de température et de pression atmosphérique à travers le monde. Les variations de pression engendrent des mouvements d'air, connus sous le nom de vent. La force du vent permet de générer de l'électricité dans des éoliennes, également connues sous le nom d'aérogénérateurs [6].

I.2.5.1 Principe de fonctionnement

La machine est constituée de 3 pales (le plus souvent) entraînées par un rotor et placées au sommet d'un mât vertical. Ce groupe est accroché à une nacelle qui contient un générateur. Un moteur électrique oriente la partie supérieure de manière à ce qu'elle soit constamment exposée au vent.

Les pales sont utilisées pour convertir l'énergie cinétique (l'énergie qu'un corps a en raison de son mouvement) du vent en énergie mécanique. Le vent déplace les pales entre 10 à 25 tours par minute environ. La vitesse à laquelle les pales tournent dépend de leur taille.

À mesure que les pales seront plus grandes, leur vitesse de rotation diminuera.

L'énergie mécanique est convertie en énergie électrique grâce au générateur. La majorité des générateurs nécessitent un taux de rotation élevé (de 1 000 à 2 000 tours par minute) afin de générer de l'électricité. Le multiplicateur joue donc un rôle dans l'accélération du mouvement lent des pales.

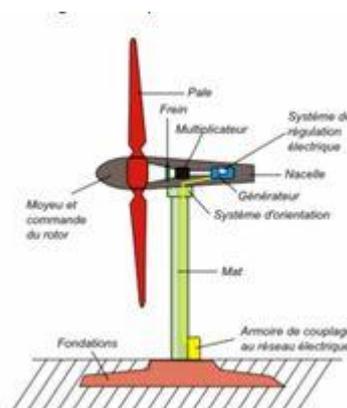


Fig.5 : Une Eolienne

I.2.6 L'énergie solaire

Le rayonnement solaire est la source d'énergie la plus répandue et la plus abondante sur notre planète. Pendant une heure, la quantité d'énergie libérée par le soleil et absorbée par la planète Terre pourrait être suffisante pour répondre aux besoins énergétiques mondiaux pendant un an. La terre capte une petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace, car le soleil décharge constamment une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire. L'espace. La constante solaire, égale à 1367 Watts/m², est atteinte à chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre pour une distance moyenne entre le sol et la Terre de 150 millions de km. L'énergie absorbée à la surface de la Terre varie en fonction de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Elle se distingue par la quantité de masse d'air (AM). Dans un ciel clair, le

rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi est de 1000 W/m² et est connu sous le nom de rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1). Quand le soleil descend dans le ciel, la lumière traverse une couche d'air plus épaisse et perd plus d'énergie. Comme le soleil n'est à son apogée que pendant

I.2.6.1 Principe de fonctionnement

Comme son nom l'indique, la production d'énergie solaire est basée sur les rayonnements solaires. Trois types de sources d'énergie peuvent être utilisés pour produire de l'énergie : le photovoltaïque, le thermique et le thermodynamique.

I.3. Production d'énergie solaire photovoltaïque

Le photovoltaïque est probablement la méthode la plus répandue pour générer de l'énergie solaire. Chacun a déjà observé des panneaux solaires posés sur des toits de maisons. Les panneaux solaires photovoltaïques ont un fonctionnement

Plutôt basique : ils convertissent presque directement le rayonnement solaire en énergie électrique. En réalité, ces panneaux sont dotés de cellules qui produisent des électrons lorsqu'ils sont exposés aux photons présents dans la lumière solaire. Ces électrons se déplacent et génèrent un courant électrique qui peut alors être intégré aux réseaux électriques traditionnels.

I.4. Production d'énergie solaire thermique

On distingue l'énergie solaire thermique de l'énergie photovoltaïque. Plutôt que d'utiliser directement les rayonnements solaires pour générer de l'électricité, cette technique vise à capter sa chaleur afin de la réutiliser, soit directement, soit indirectement. L'utilisation directe d'un panneau d'énergie solaire est également relativement simple : le soleil chauffe un panneau contenant des fluides appelés "caloporteurs", c'est-à-dire capables de transporter la chaleur à l'endroit souhaité. Cependant, ces panneaux et installations peuvent également présenter des défis plus complexes, en particulier lorsqu'ils exploitent la chaleur de manière indirecte pour générer de la vapeur d'eau. Ensuite, cette vapeur pourra être utilisée pour générer de l'énergie. De cette manière, on collecte de la chaleur afin de générer de l'énergie électrique qui pourra être utilisée dans de nombreux domaines, y compris les plus paradoxaux, tels que la production de froid. Le solaire thermique est généralement utilisé en direct, principalement chez les particuliers, pour alimenter les réseaux d'eau chaude, tels qu'un chauffe-eau ou le chauffage d'une maison.

I.5. Les différentes installations d'énergie solaire

Il n'y a pas une seule forme d'installation pour générer son propre énergie solaire. Les plus célèbres et les plus prometteuses sont celles-ci.

I.6. Pour les particuliers

Les individus peuvent utiliser l'énergie solaire de différentes manières, que ce soit pour générer de l'électricité, pour générer de la chaleur ou les deux. Les panneaux solaires photovoltaïques sont les plus populaires et offrent la possibilité de transformer directement l'énergie solaire en électricité. Les panneaux solaires thermiques offrent la possibilité de récupérer la chaleur du soleil afin de la transformer en chauffage, en eau chaude, voire en électricité. D'autres articles utilisent aussi l'énergie solaire et peuvent être employés à domicile ou en voyage pour remplacer certains appareils électriques

I.7. Pour les entreprises et industriels

Les entreprises et les industriels ont la possibilité d'utiliser l'énergie solaire de la même manière que les particuliers, mais à une échelle plus étendue : panneaux solaires, capteurs de chaleur pour le chauffage ou l'eau chaude, ainsi que des produits fonctionnant à l'énergie solaire. Cependant, les sites industriels les plus importants ou les collectivités peuvent également mettre en place des centrales thermodynamiques à concentration, qui permettent de stocker de l'électricité pendant les périodes sans soleil, ou des parcs photovoltaïques lorsque la surface disponible est élevée.

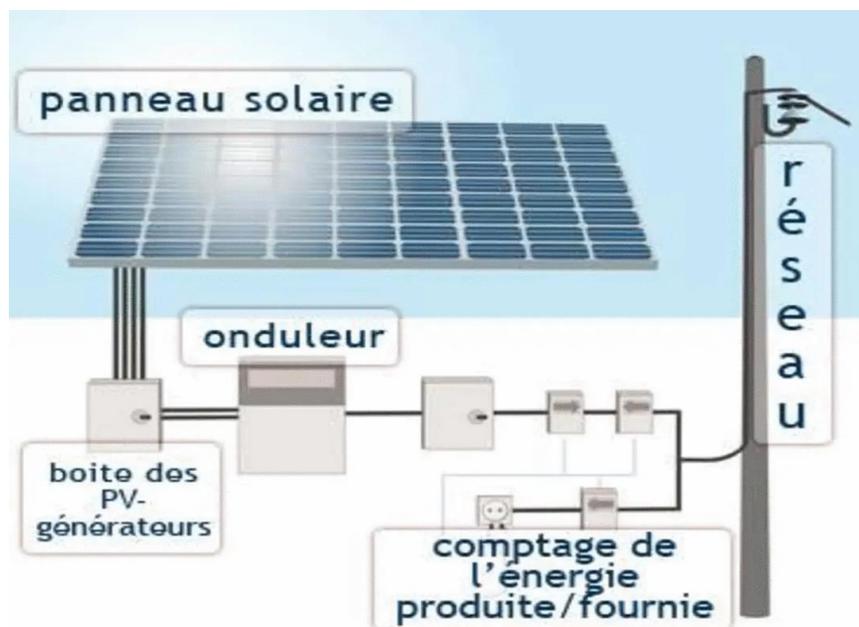


Fig.6: une installation solaire.

Les énergies	Les avantages	Les inconvénients
L'énergie solaire	<p>Une énergie non polluante</p> <p>Une bonne source d'énergie renouvelable</p>	<p>La fabrication des panneaux solaires nécessite des matériaux spécifiques et peut avoir un impact environnemental</p>
L'énergie hydraulique	<p>Peut de soutien et dure longtemps.</p> <p>Une énergie naturelle non polluante</p> <p>Lumière ne coûte rien</p> <p>Retenues d'eau possible dans différents endroits</p>	<ul style="list-style-type: none"> - L'emplacement peut influencer l'utilisation de l'énergie dans les panneaux. - Les panneaux sont fragiles. - Une altération de l'équilibre de l'environnement. - De grands barrages à prix élevé.
L'énergie Géothermique	<ul style="list-style-type: none"> - Pollution sans danger. - Un excès d'énergie pour un espace restreint. 	<ul style="list-style-type: none"> - Répartitions des sources. - Installation coûteuse.
L'énergie éolienne	<ul style="list-style-type: none"> - Le vent est toujours présent dans un même lieu, donc jour et nuit. Le mécanisme complet se trouve dans l'éolienne, donc il n'y a pas de grandes usines. - Une source d'énergie renouvelable, donc écologique. 	<ul style="list-style-type: none"> - Un effet visuel. - Le coût élevé. - Le voyage des oiseaux.

I.8. Le gisement solaire en Algérie

Afin de comprendre l'importance des énergies renouvelables en Algérie et les enjeux importants et inépuisables qui découlent de ces énergies non encore exploitées, notamment le gisement solaire exceptionnel qui couvre une superficie de 2381745 km². [8]

L'Algérie est l'un des pays qui possède une variété de sites en raison de son secteur étendu, où la luminosité de la région près de la mer est influencée par les différentes saisons. Les régions du nord de l'Algérie sont

davantage abritées que celles du Sud. Les régions du Sahel reçoivent une quantité d'énergie plus importante, mais elles se distinguent par une température de l'air plus élevée.

Cette variété climatique entraîne une variation de l'ensoleillement moyen global au plan horizontal, allant de 4,5 à 7,5 kWh/m². En prenant en considération cette diversité, l'Algérie a la capacité d'être Elle est divisée en 8 zones climatiques avec un ensoleillement approximativement homogène, comme illustré dans la figure I.7. Donc, Grâce à sa position privilégiée, l'Algérie possède le plus grand éventail de gisements solaires du Méditerranéen. Le territoire algérien a une durée moyenne d'ensoleillement supérieure à 2000 heures par an, pouvant atteindre près de 3500 heures d'ensoleillement dans le désert du Sahara.

On estime à 169 400 TWh/an la quantité totale d'énergie reçue, ce qui représente 5000 fois la consommation d'électricité annuelle du pays. [8]. L'emplacement géographique de l'Algérie encourage le progrès et l'épanouissement.

La mise en œuvre de l'énergie solaire. Effectivement, étant donné l'importance de l'intensité du rayonnement reçu, la durée de l'ensoleillement dépassant les dix heures par jour pendant plusieurs mois, notre pays satisfait certains de ses besoins en énergie solaire. C'est pourquoi nous nous concentrerons sur la production basée sur l'énergie photovoltaïque qui utilise son énergie provenant du rayonnement solaire.

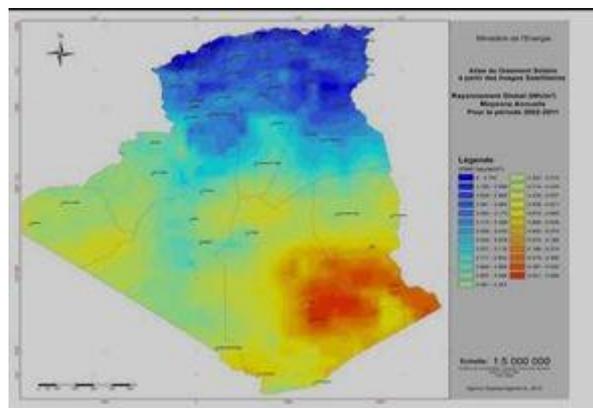


Fig.7. La carte d'éclairement solaire de l'Algérie

Conclusion

Ce chapitre nous a offert un aperçu captivant des diverses sources d'énergies renouvelables qui façonnent le paysage énergétique mondial. Parmi ces sources d'énergie, l'énergie photovoltaïque a retenu particulièrement notre attention. En exploitant la puissance du soleil, les cellules photovoltaïques se présentent comme une solution polyvalente et largement accessible pour la production d'électricité propre.

Chapitre II
Modélisation de
la Cellule
Photovoltaïque

II-1 Introduction

Ce chapitre se penche sur la modélisation mathématique des cellules photovoltaïques, qui convertissent la lumière solaire en électricité. Nous explorons les différentes approches de modélisation. Une compréhension approfondie de la modélisation des cellules solaires est essentielle pour concevoir des systèmes photovoltaïques efficaces et optimiser leur performance.

II-2 Principe de fonctionnement de la cellule

Une cellule photovoltaïque fonctionne sur le principe de l'effet photovoltaïque, qui est la conversion de la lumière en électricité :

1. **Matériau semi-conducteur****: La cellule photovoltaïque est composée généralement de couches de semi-conducteurs, comme le silicium. Le silicium est choisi pour ses propriétés qui lui permettent de libérer des électrons lorsqu'il est exposé à la lumière.
2. **Absorption de la lumière**: Lorsque la lumière du soleil (composée de photons) frappe la surface de la cellule, elle pénètre dans le matériau semi-conducteur.
3. **Génération de paires électron-trou**: L'énergie des photons absorbés par le semi-conducteur est suffisante pour libérer des électrons de leurs atomes. Ces électrons libérés créent des paires électron-trou, où les électrons sont excités vers des niveaux d'énergie plus élevés et laissent derrière eux des "trous" (ou défauts d'électrons) dans la structure cristalline.
4. **Création d'un potentiel électrique**: En raison de la structure de la cellule, les électrons libérés sont poussés dans une direction spécifique, créant ainsi un flux de courant électrique.
5. **Circulation du courant**: Les électrons libérés circulent à travers un circuit externe où ils peuvent être utilisés pour alimenter des appareils électriques ou être stockés dans des batteries pour une utilisation ultérieure.
6. **Cycle complet**: Après avoir parcouru le circuit externe, les électrons reviennent à la cellule photovoltaïque, où ils sont recombines avec les trous. Ce processus permet à la cellule de continuer à générer de l'électricité aussi longtemps qu'elle est exposée à la lumière du soleil.

En résumé, une cellule photovoltaïque convertit l'énergie lumineuse en électricité en exploitant les propriétés des semi-conducteurs pour générer un courant électrique.

II-2-1 Les différents types de cellules photovoltaïques

Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques disponibles à un niveau industriel. D'autres matériaux sont utilisés : tellure de cadmium, arséniure de gallium, di-séléniure de cuivre et d'indium (CIS). Ces technologies sont encore très coûteuses mais elles laissent espérer des rendements bien supérieurs au silicium et une durée de vie plus grande. La production des cellules photovoltaïques nécessite de l'énergie, et on estime qu'une cellule photovoltaïque doit fonctionner pendant plus de dix ans pour produire l'énergie qui a été nécessaire à sa fabrication. Les techniques de fabrication et les caractéristiques des principaux types de cellules sont les suivantes :

A-Cellule au silicium monocristallin

Le silicium pur est obtenu à partir de la silice de quartz ou de sable par transformation chimique métallurgique. Le silicium a un rendement électrique et une durée de vie de l'ordre de deux fois celle du silicium amorphe, mais il est nettement plus cher.[11]



Fig.8 : Cellule au silicium monocristallin.

B- Cellule au silicium poly-Cristallin

Le silicium poly-cristallin est un matériau composé de cristaux juxtaposés obtenus par moulage. Ce matériau est moins coûteux (que le monocristallin). Les cellules carrées ou rectangulaires sont faciles à utiliser.



Fig.9 : Cellule au silicium poly-cristallin.

C- Cellule au silicium amorphe

Le silicium absorbe le rayonnement solaire jusqu'à 100 fois mieux qu'en état cristallin ; les cellules sont constituées par des couches très minces.



Fig.10 : Cellule au silicium amorphe

II-3 Modélisation des cellules photovoltaïques :

Il est essentiel d'adopter des circuits électriques équivalents pour modéliser les cellules photovoltaïques. Afin de créer un circuit précis et équivalent pour une cellule photovoltaïque, il est essentiel de comprendre la structure physique des éléments de la cellule ainsi que les caractéristiques électriques de chaque élément, en prenant en compte plus ou moins de détails. D'après cette philosophie, de nombreux modèles mathématiques ont été créés afin de représenter un comportement fortement non linéaire, qui découle des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations.

II-4 Modèle à deux diodes

II-4-1 Modèle à sept paramètres (2M7P) :

Il est connu aussi par le nom 2M7P (Lumped, 2 Mechanism model with 7 Parameters), Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé en considérant le schéma électrique équivalent ci-dessous figure (11). Il consiste en la description mathématique d'un Circuit réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes ayant les courants de saturation I_{s1} et I_{s2} , les facteurs de diode $n1$ et $n2$, une source de courant produisant un photo-courant I_{ph} , qui dépend de l'éclairement solaire [12]. La résistance série R_s rend compte de la résistivité du matériau, de celle des électrodes et du contact semi-conducteur-Métal. Sa valeur est déterminée par l'inverse de la pente de la Caractéristique $I(V)$ pour une tension V égale à V_{co} . Ce terme doit idéalement être le plus Faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule. Ceci peut être réalisé en Optimisant le contact métal/semi-conducteur, et en diminuant la résistivité du matériau utilisé. Cependant, un dopage trop élevé entraîne une augmentation de la recombinaison des porteurs. La résistance parallèle (shunt) ou de court-circuit R_{sh} traduit quant à elle, la présence d'un Courant de fuite à travers l'émetteur, causé par un défaut. Ceci est le cas lorsque la diffusion Des contacts métalliques à haute température perce l'émetteur. Elle peut aussi être due à un Court-circuit sur les bords de la cellule. Cette valeur devra être la plus élevée possible [13]. Le modèle à deux-diodes est représenté par une équation implicite du courant qui ne peut Être résolue qu'à l'aide de méthodes itératives.

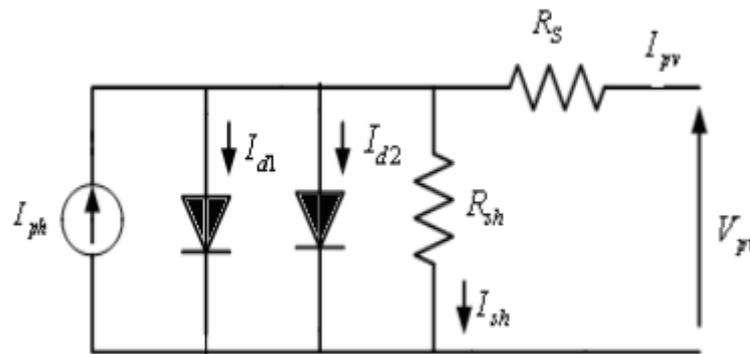


Fig.11 : Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles, 2M7P.

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{sh} \quad (\text{II-8})$$

Avec :

I_{ph} = courant photonique

I_{d1} = courant de diode 1

I_{d2} = courant de diode 2

I_{sh} = courant Shunt

II-4-2 Modèle à six paramètres (2M6P) :

Si la résistance shunt est considérée infinie (R_{sh}), le nombre de paramètres à déterminer devient 6 et le nom du modèle dans ce cas est 2m6p (Lumped ,2 Mécanisme model avec 6 Paramètres) [14].

Cette simplification est justifiée par le fait que la résistance shunt est d’habitude beaucoup plus grande que les autres résistances, donc le courant qui la traverse est négligeable. Il consiste en la description mathématique d’un circuit réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes ayant les courants de saturation I_{s1} et I_{s2} , les facteurs de diodes $n1$ et $n2$, une source de courant produisant un photo-courant I_{ph} qui dépend de l’éclairement solaire et de la résistance série R_{ser} .

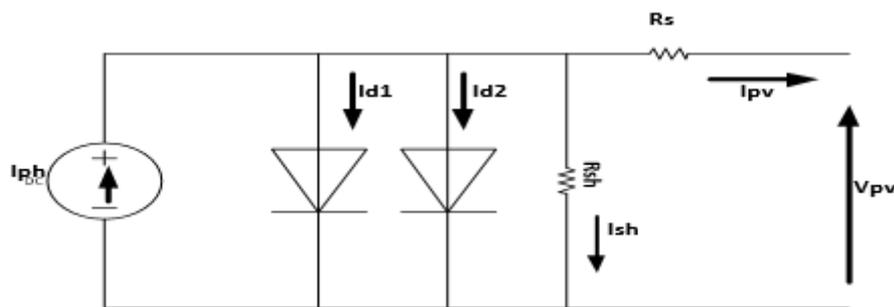


Fig.12: Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles, 2M6P.

L’équation caractéristique est déduite d’une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2}$$

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

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{s1} - \left(\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv} * R_{ser}}{V_t * n1}\right) - 1 \right) - I_{s2} \left(\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv} * R_{ser}}{V_t * n2}\right) - 1 \right)$$

II-4-3 Modèle à cinq paramètres (2M5P)

Le circuit équivalent de ce modèle est obtenu en utilisant une simplification au circuit du modèle à six paramètres représenté sur la figure (III-5) et le nom du modèle dans ce cas est 2M5P (Lumped, 2 Mechanism model with 5 Parameters) [15-16]. Cette simplification se traduit par supposer que la résistance shunt est infinie, et la résistance série est nulle. Le circuit équivalent sera représenté comme suit, figure

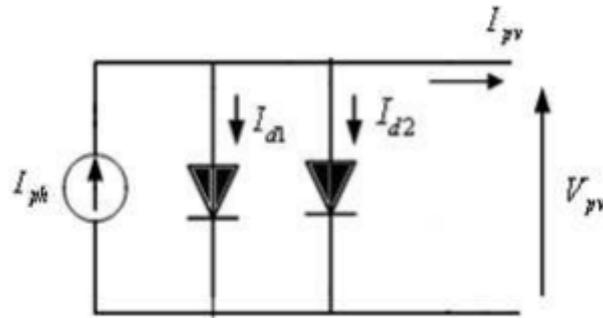


Fig.13 : Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles, 2M5P

Il consiste en la description mathématique d'un circuit réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes ayant les courants de saturation I_{s1} et I_{s2} les facteurs de diode η_1 et η_2 une source de courant produisant un photo courant I_{ph} qui dépend de l'éclairement solaire et de la température L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2}$$

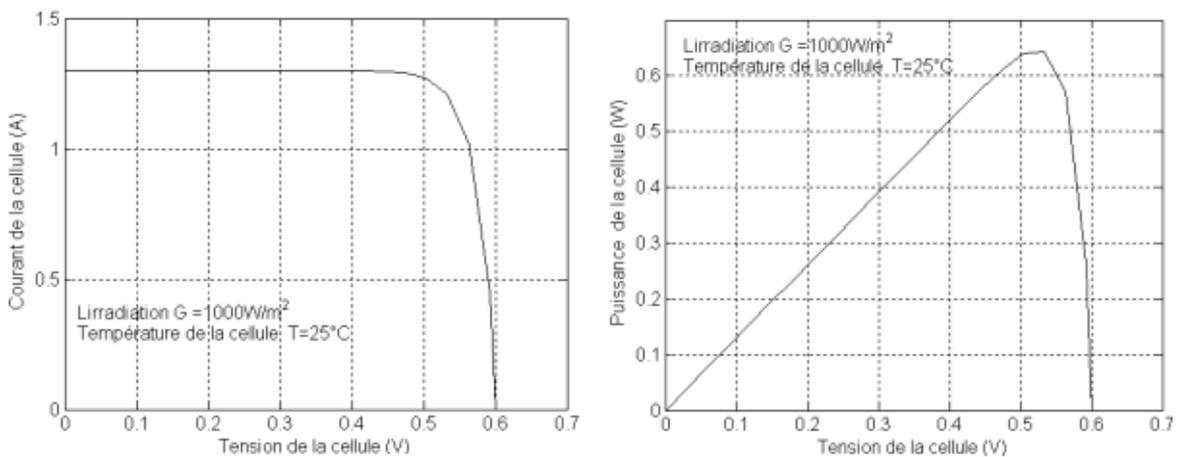


Fig.14 : Caractéristique I(V) et P(V) d'une cellule photovoltaïque 2M5P

II-5Modèle à un seul paramètre

II-5-1 Modèle à cinq paramètres (L5P) :

Le circuit électrique de la cellule photovoltaïque est illustré dans la figure II.7, qui comprend une source de courant qui représente le flux lumineux. [17] Deux résistances, une résistance shunt et une résistance série, sont utilisées pour représenter les pertes .Les cinq paramètres inconnus suivants sont donc pris en compte par le modèle : n, I_{ph}, R_s, R_{sh} et I_s. On le nomme L5P (Lumped, 1 Mécanisme, Paramètres).

On déduit directement l'équation caractéristique à partir de la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[e^{\left(\frac{q(V_{pv} + IR_s)}{nKn_s T} \right)} - 1 \right] - I_{sh}$$

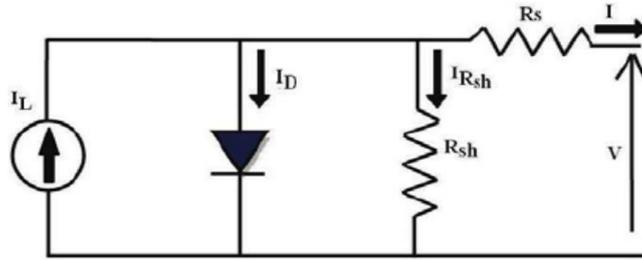


Fig.15 : Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, L5P

Conclusion

Modélisation de cellule photovoltaïque permet de prédire ses performances dans diverse conditions. Dans ce chapitre on a présenté les différents modèles existants de la cellule

Chapitre III
La commande
MPPT

III- Etude de convertisseur DC/DC

III-1 Introduction

Dans les systèmes photovoltaïques, les hacheurs sont des dispositifs de contrôle qui doivent faire fonctionner les panneaux à leurs puissances maximales.

Dans ce chapitre on va voir les différents types du hacheur et son principe de fonctionnement.

Quelques méthodes MPPT basées sur réaction de puissance, comme l'algorithme d'incrémental de l'inductance et méthode de perturbation et observation.

III-2 Les hacheurs

Le hacheur est un convertisseur continu/continu permettant de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries ou pour alimenter une charge continue.

Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour la quelle on a de bons rendements dans les hacheurs. Les hacheurs sont des convertisseurs continus qui procèdent par découpage d'une grandeur d'entrée continue, tension ou courant et dont la grandeur de sortie est également continue ou à faible ondulation

III-3 Type de hacheurs

Nous traitons dans cette partie des convertisseurs unidirectionnels en courant et en tension. Cela implique que la fluence d'énergie ne peut se faire, au sein du convertisseur, que dans un seul sens. Cela revient également à considérer : des sources de tension non réversibles, unidirectionnelles en courant et de sources de courant non réversibles, unidirectionnelles en tension. Cela conduit à l'étude des convertisseurs DC-DC les plus simples qui puissent être. Dans ce cadre, on distingue deux familles de convertisseurs statiques (ou hacheurs). -hacheur abaisseur (ou buck). -hacheur élévateur (ou boost).

III-3-1 Hacheur Buck

C'est un convertisseur direct DC-DC. Le convertisseur Buck dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur dévolteur ou hacheur série. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant. L'interrupteur K peut être remplacé

par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage).

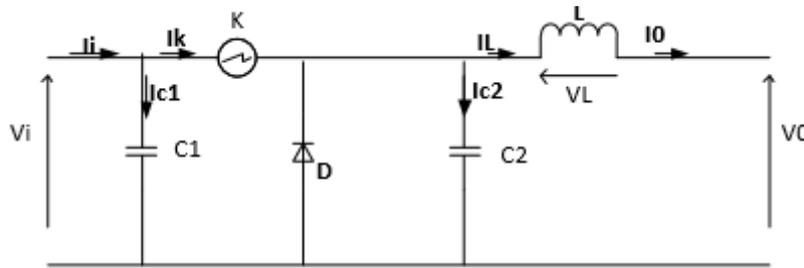


Fig.16: Schéma électrique d'un hacheur Buck

III-3-2 Hacheur boost

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) Connue aussi sous le nom de « boost » ou hacheur parallèle. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure [18]

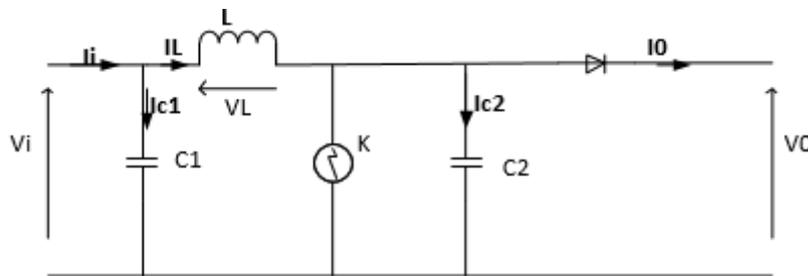


Fig.17: Schéma électrique d'un hacheur boost

III-4 La commande MPPT

Un MPPT, (Maximum Power Point Tracker) est une méthode permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs photovoltaïques ou encore avec les générateurs éoliens. [18]

III-5 Suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque

La poursuite du point maximum de la puissance (MPPT) est une partie essentielle dans les systèmes photovoltaïques. Plusieurs techniques sont développées depuis 1968 date de publication de la première loi de commande de ce type adaptée à une source d'énergie renouvelable de type PV. Ces techniques diffèrent entre elles par leur complexité, le nombre de capteurs requis, la vitesse de convergence, le coût, le rendement et le domaine d'application [19]

III-6 Principe du MPPT

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quels que soient les conditions météorologiques (température et l'éclairement), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (V_{mpp} , I_{mpp}) [k]. L'adaptation d'impédance est souvent sous forme d'un convertisseur DC – DC comme représenté sur la figure

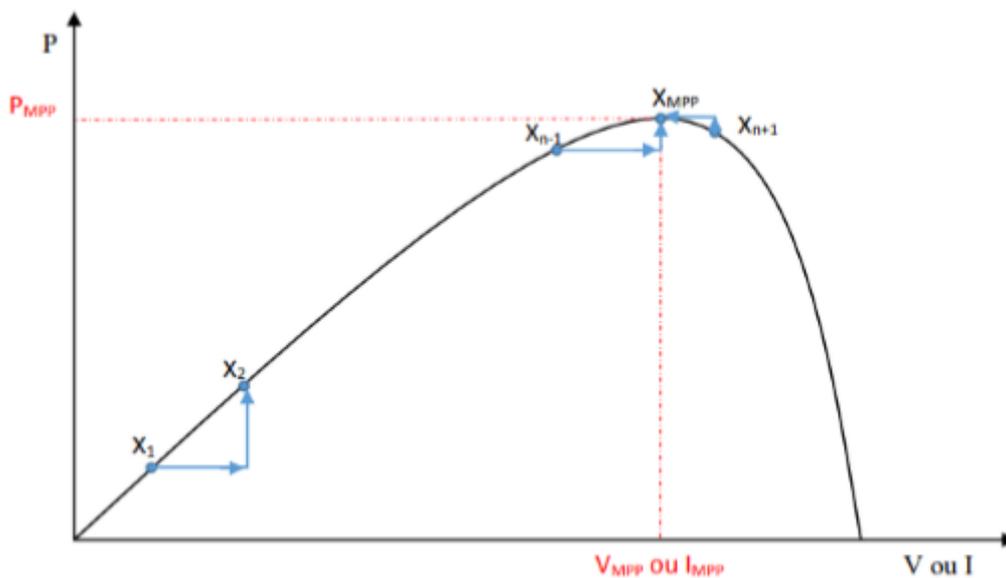


Fig.18 : Principe de la commande MPPT

La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement qu'elles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir. La figure 11 illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum. -Pour une variation d'ensoleillement (cas a), il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2. -Variations de température de

fonctionnement du GPV (cas c). Bien qu'il faille également agir au niveau de la commande. -Pour une variation de charge (cas b). On peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande.

En résumé, le suivi du PPM réalisé au moyen d'une commande spécifique nommée MPPT agit essentiellement sur le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) pour rechercher et atteindre le PPM du GPV. Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV [18]

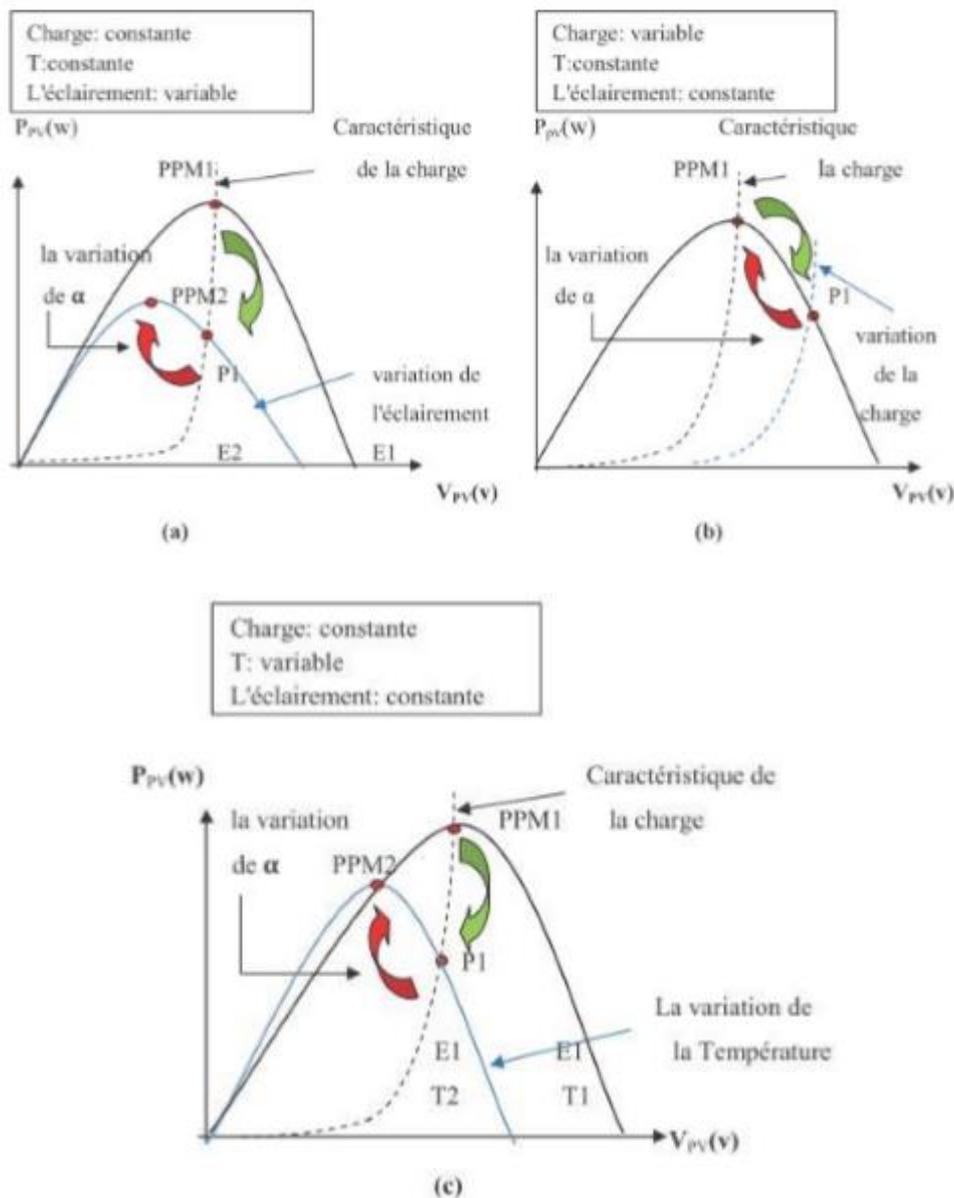


Fig.19: Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale a) suite à une variation d'éclairement, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de température

III-7 Classification des techniques MPPT

Diverses publications sur les commandes assurant un fonctionnement de type commande MPPT apparaissent régulièrement dans la littérature depuis 1968, date de publication de la première loi de commande de ce genre, adaptée à une source d'énergie renouvelable de type photovoltaïque. Etant donné le grand nombre de publications dans ce domaine, nous avons fait une classification des différentes méthodes MPPT existantes en les regroupant selon leur principe de base. La classification, en plus du principe, s'est effectuée selon des critères comme la précision de la recherche ou sa rapidité pour en faire une évaluation comparative [18]

III-8 Les premiers types de technique MPPT

L'algorithme mis en œuvre dans les premières commandes MPPT était relativement simple. En effet, les capacités des microcontrôleurs disponibles à l'époque étaient faibles et les applications surtout destinées au spatial avaient beaucoup moins de contraintes en variation de température et d'éclairement que les applications terrestres appliquées initialement. Concernant le photovoltaïque, son principe a d'abord été décrit par A.F. Bohringer. Cette commande est basée sur un algorithme de contrôle adaptatif, permettant de maintenir le système à son point de puissance maximum (PPM)[18]. Ce dernier est décrit dans la figure et peut être implanté entièrement en numérique.

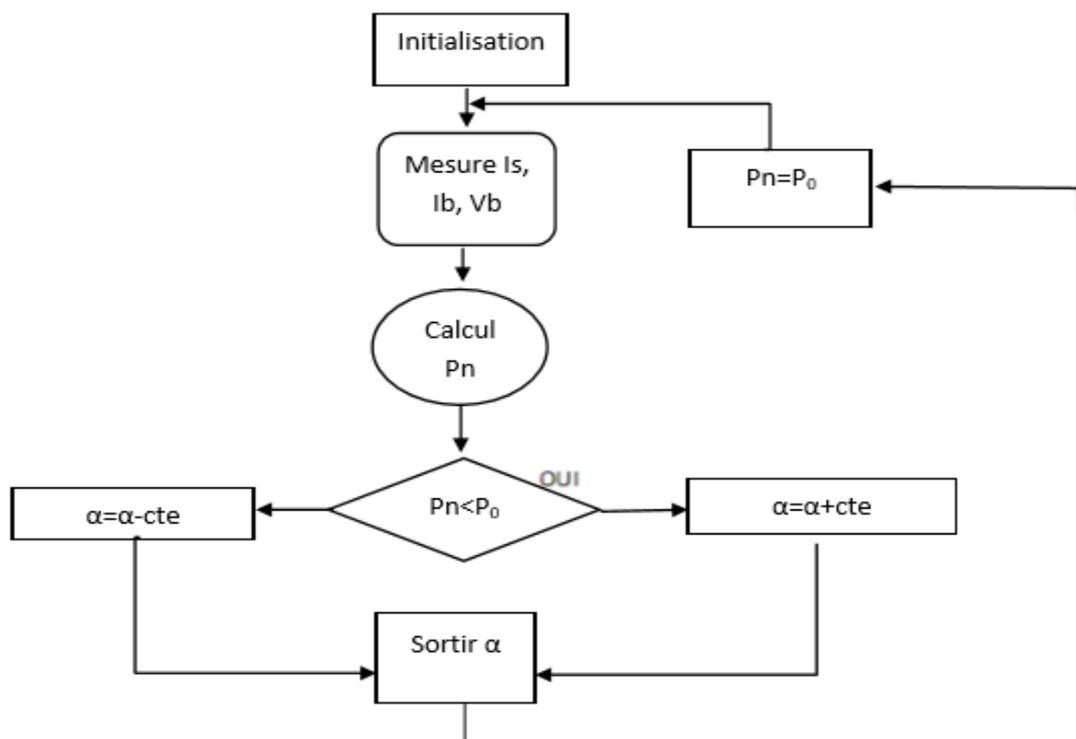


Fig.20: Principe classique d'une MPPT pouvant être implantée en numérique.

Le système démarre d'un rapport cyclique initial et d'une puissance initiale P_0 après avoir effectué la mesure du courant I_b et de la tension V_b aux bornes de la batterie et du courant de charge I_S , le produit $(I_b + I_S) \times V_b$ est calculé. Ce dernier est l'image de la puissance instantanée P_n délivrée par le générateur PV à l'instant où la mesure a été effectuée. Cette image est alors comparée à la puissance P_0 , si P_n est inférieure à P_0 , alors est incrémenté, sinon est réduit. Une fois modifié, P_0 prend la valeur P_n et on effectue une nouvelle mesure d' I_b , V_b et I_S pour calculer la nouvelle puissance eP_n . Ainsi, par un algorithme numérique de recherche, on peut régler la précision de cette commande de façon à obtenir un rendement MPPT proche de 100% en fonction de l'algorithme implanté. De plus, le temps de calcul de la MPPT est directement fonction de l'algorithme implanté ainsi que des performances du microprocesseur [18].

III-9 Evolution du point d'opération du générateur PV

Nous devons chercher le point de puissance maximale, pour cela, nous comparons un point de puissance (P_2) mesuré à l'instant (t) avec un point de puissance (P_1) mesuré à l'instant ($t-I$) (fig III.13).
 - Si $P_1 < P_2$, la dérivée est positive, cela signifie que nous nous rapprochons du point de puissance maximale.
 - Si la dérivée de puissance est négative, cela veut dire que nous avons dépassé le point de puissance maximale. Les commandes MPPT présentent finalement un bon compromis de rendement en statique et dynamique mais aussi de robustesse sont basées sur une continuelle évaluation de la puissance et une comparaison avec l'état à l'instant précédent [18]

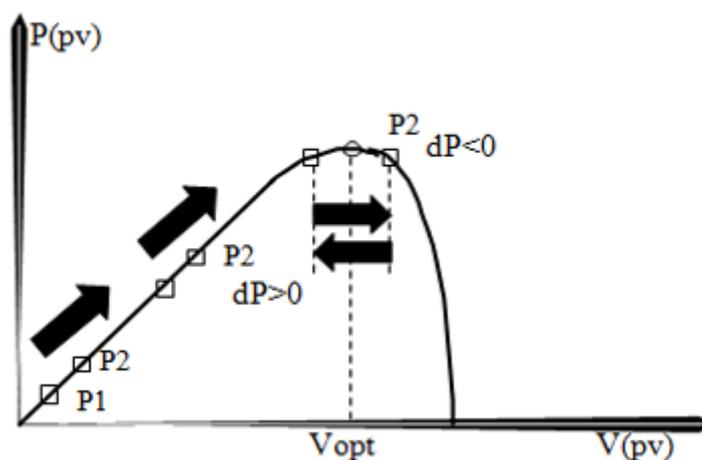


Fig.21: Principe de fonctionnement d'une commande MPPT

Cependant, pour la plupart des commandes MPPT, pour arriver à converger dans de bonnes conditions, quel que soit l'algorithme, il faut que les courbes de puissance délivrées par le générateur soient constantes ou lentement variables. Si cette hypothèse n'est pas respectée (changements brutaux des conditions de

fonctionnement) le système peut diverger. Nous avons répertorié les différents problèmes qui peuvent survenir [18] :

-la puissance délivrée par le générateur peut présenter plusieurs maximums. Cela peut se produire, en particulier, lorsque les diodes de protections (diodes by-pass) des cellules PV associées en série et ou en parallèle se ferment.

-des changements brutaux d'éclairement et de charge peuvent survenir à tout moment sans que la fréquence de ces changements soit prévisible. Ainsi, le générateur peut à tout instant avoir sa courbe de puissance modifiée et donc son PPM comme l'illustre la figure(21).Le point de fonctionnement (P1) se trouve sur la partie montante de la courbe de puissance avant le changement d'éclairement. Suite à la variation d'éclairement, le point de fonctionnement passe de P1 à P2 qui se trouve sur la courbe de puissance 2. En comparant la puissance P2 et P1, on en déduit une dérivée négative, donc on inverse le sens de poursuite pensant avoir dépassé le point de puissance maximum, ici la commande MPPT perd momentanément le PPM. De plus, le changement du sens de la poursuite fait éloigner encore plus le point d'opération du PPM.

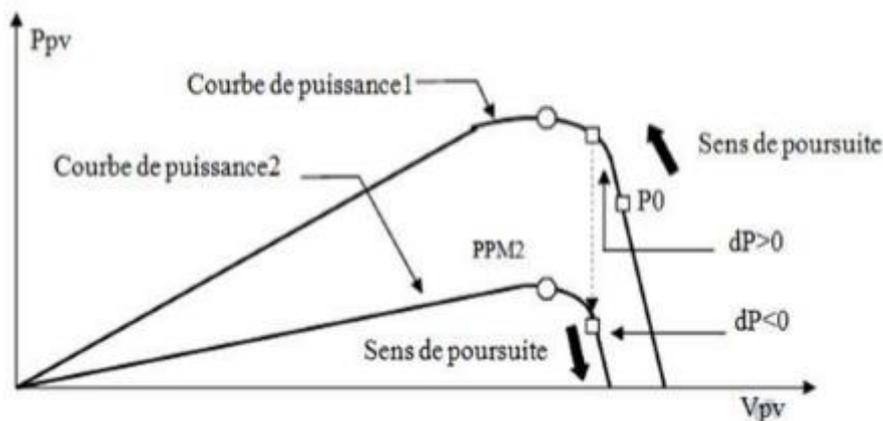


Fig.22: Changement d'éclairement et conséquence sur les courbes de puissance d'un générateur PV ainsi que sur l'adaptation source-charge.

III-10 Les méthodes de poursuite de MPP

Il existe de nombreux algorithmes utilisés pour trouver le point de puissance maximale. Idéalement, le suivi de la puissance se fait automatiquement pour s'adapter aux conditions météorologiques variables.

III-10-1 Méthodes à contre réaction de tension

Dans ce cas on se repose sur la commande de la tension de fonctionnement des panneaux, par la comparaison de cette tension avec une tension de référence. Cela génère une tension d'erreur qui fait varier le rapport cyclique de la commande PWM afin d'annuler cette erreur [18]

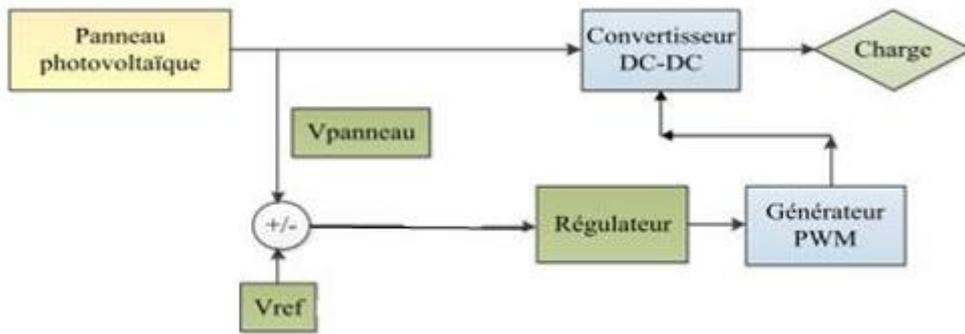


Fig.23 : Principe de la méthode à contre réaction de tension avec tension de référence.

On a trois types de cette méthode selon la nature de la tension de référence (fixe ou variable, interne ou externe).

III-10-2 Méthodes à contre réaction de courant

Par analogie avec les méthodes à contre réaction de tension on a le schéma décrit par la figure(23) [18]

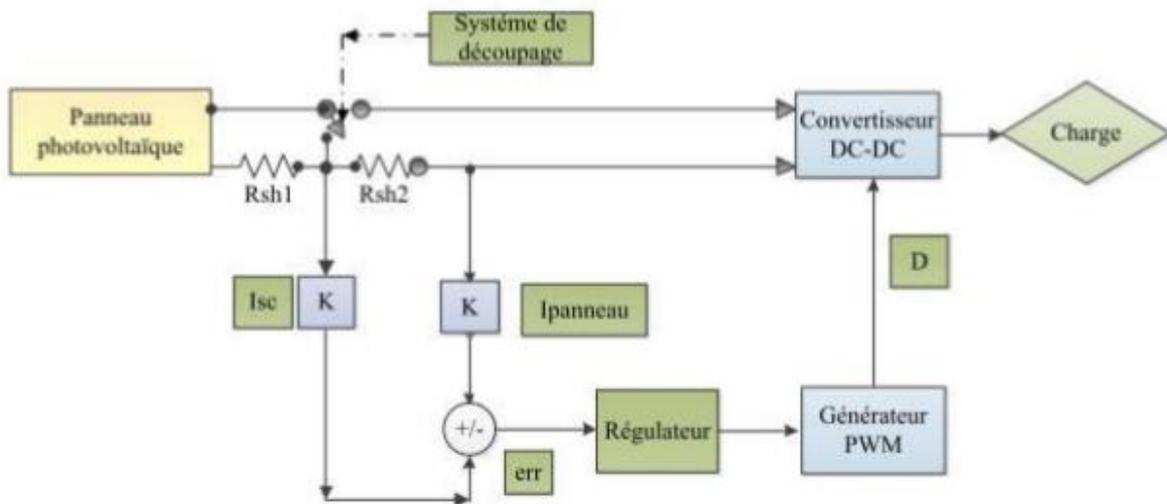


Fig.24: Principe de la méthode MPPT à courant de référence en fonction de I_{sc}

III-10-3 Méthodes à contre réaction de puissance

Les méthodes à contre réaction de puissance se basent sur des algorithmes de recherche itérative pour trouver le point de fonctionnement du panneau afin que la puissance générée soit maximale sans interruption de fonctionnement du système. La puissance extraite du panneau est calculée à partir des mesures de courant I et de tension V du panneau et la multiplication de ces deux grandeurs $P = V \times I$ [18].

III-10-4 Algorithme perturbation et observation

C'est l'algorithme de poursuite du point de puissance maximale (PPM) le plus utilisé, et comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de la tension de référence, ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur (DC-DC), puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie en vue d'une éventuelle correction de ce rapport cyclique (D). Si la valeur de la puissance actuelle du générateur est supérieure à la valeur précédente alors on garde la même direction de perturbation précédente sinon on inverse la perturbation du cycle précédent. L'organigramme de l'algorithme de perturbation et de l'observation (P&O) est donné par la Figure (24) où D est le rapport cyclique.

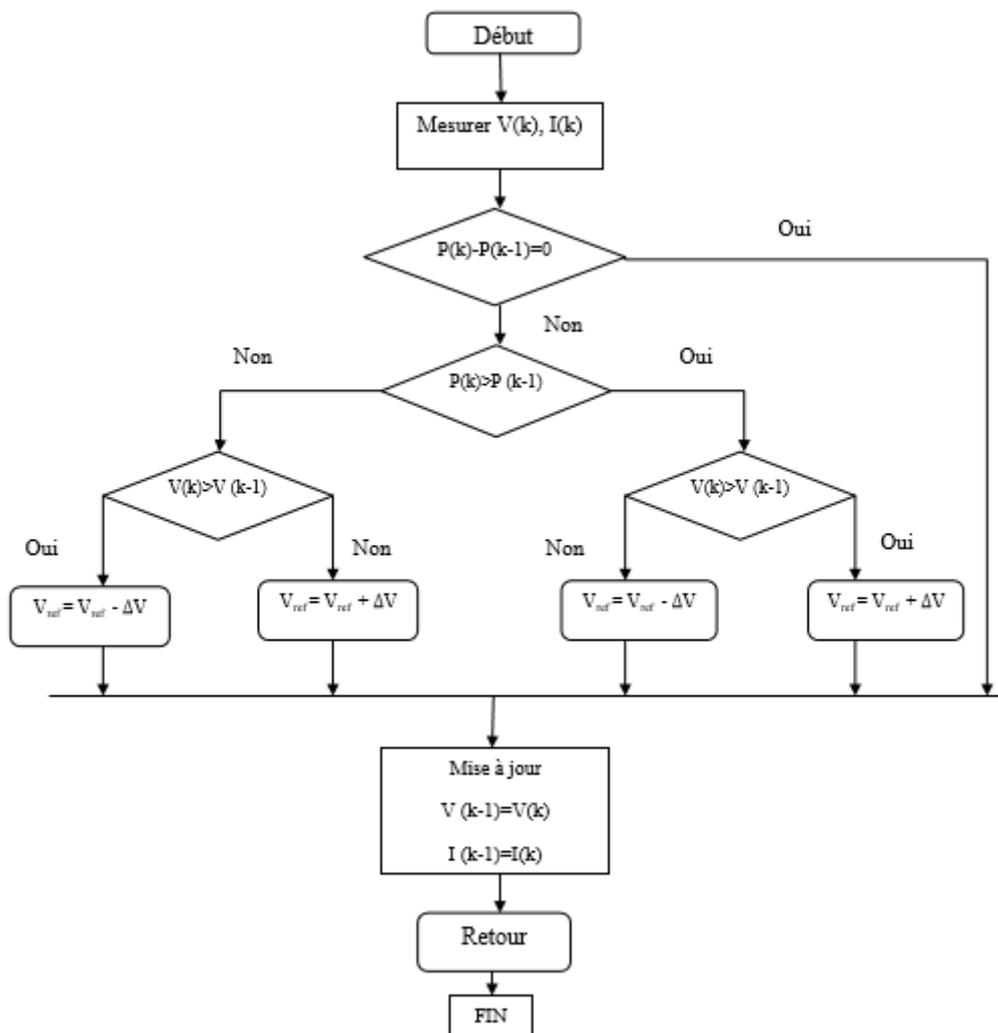


Fig.25 : Algorithme de perturbation et d'observation (P&O).

III-10-5 Algorithme incrémentation de la conductance

L'algorithme par incrémentation de conductance se résulte en dérivant la puissance du panneau photovoltaïque par rapport à la tension et en mettant le résultat égal à zéro. Ceci peut être décrit par les équations suivantes

$$\frac{dp}{dV} = 1 + V \frac{dI}{dV}$$

$$\frac{1}{V} \frac{dP}{dV} = \frac{1}{V}$$

On définit la conductance de la source et l'incrémentation de la conductance puisque la tension V du panneau est toujours positive. Le point de puissance maximale MPP est atteint si la conductance de la source égale à l'incrémentation de la conductance de la source avec un signe moins, et qu'elle est à gauche de ce point lorsque la conductance est supérieure. Il incrémentale la conductance et vice-versa, comme suit :

$$\text{si } \frac{dP}{dV} > 0 \Rightarrow \frac{1}{V} > -\frac{dI}{dV}$$

$$\text{si } \frac{dP}{dV} = 0 \Rightarrow \frac{1}{V} = -\frac{dI}{dV}$$

$$\text{si } \frac{dP}{dV} < 0 \Rightarrow \frac{1}{V} < -\frac{dI}{dV}$$

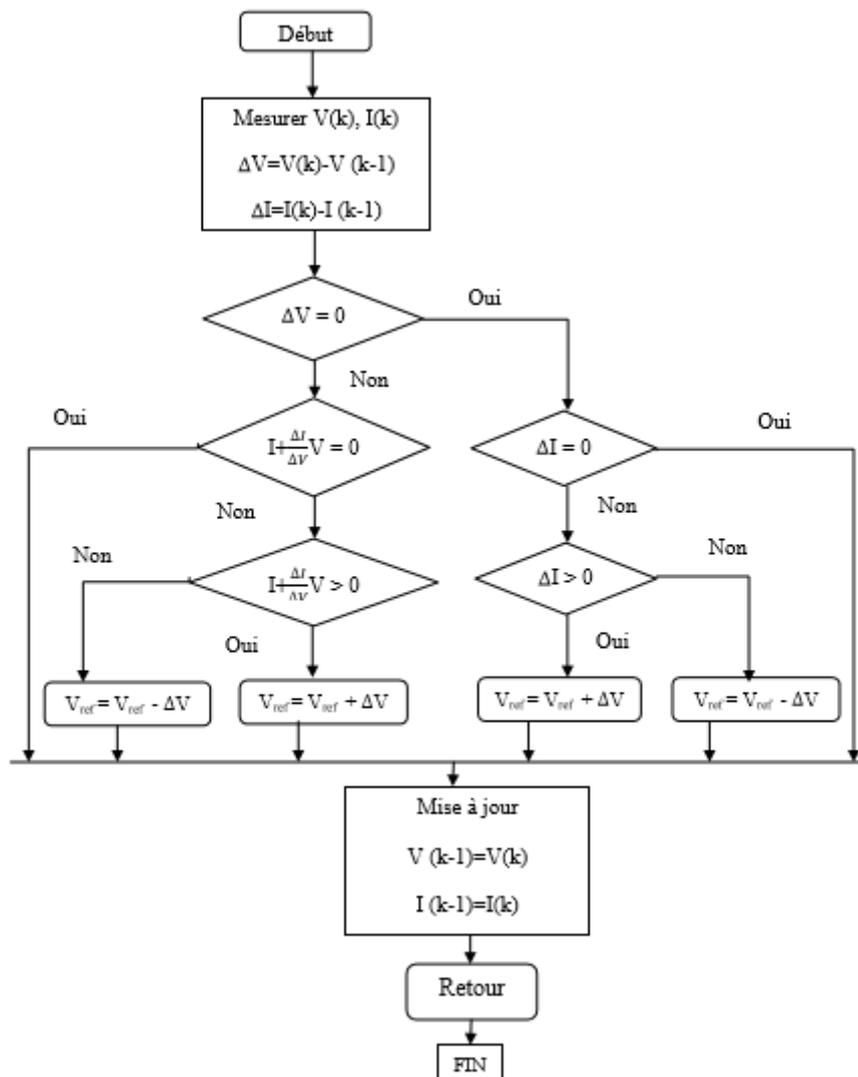


Fig.26: Algorithme incrémentation de la conductance.

Conclusion

En conclusion de ce chapitre, nous avons exploré en détail l'étude du convertisseur DC/DC, en mettant particulièrement l'accent sur les hacheurs et la commande MPPT dans les systèmes photovoltaïques (PV).

Chapitre IV

Partie

Simulation

IV-1 Modèle étudié

Pour notre mémoire, on a choisi le modèle à 5 paramètres pour étudier les résultats de simulation inclut les caractéristiques électriques dans le tableau suivant :

Paramètres	Valeurs
Ns	36
Voc	21,1
Icc	3,5
Vmp	17,5
Imp	3,34

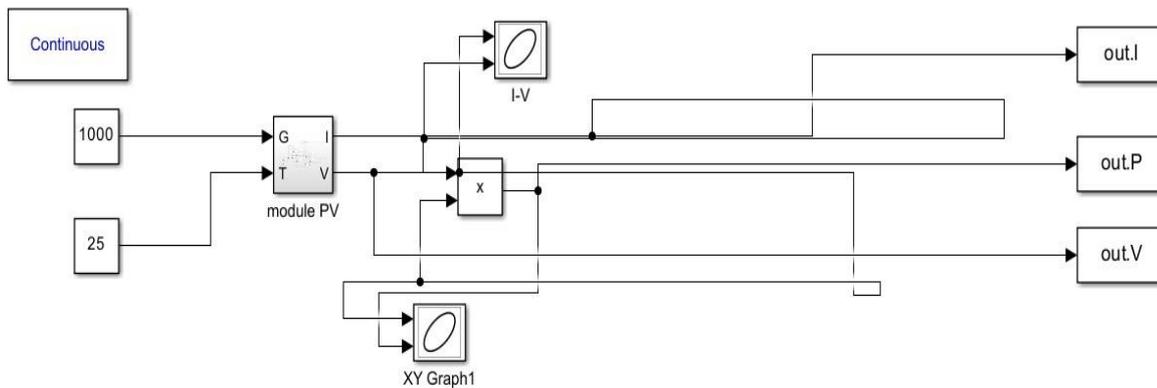


Fig.27 : schéma bloc equivalent du courant photovoltaïque

Equation Ipv :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[e^{\left(\frac{q(V_{pv} + IR_s)}{nKn_s T} \right)} - 1 \right] - I_{sh}$$

Avec :

T_{ref} : Température de référence

q : $1,6.10^{-19} C$ Charge électrique

Voc : Tension à circuit ouvert

n : Facteur de non idéalité de la fonction ($n=1$)

n_s : Nombre de cellule connecté en série

I_{cc} : Le courant de court-circuit

K_i : Coefficient d' I_{cc}

R_s : Résistance Série

R_{sh} : Résistance Shunt (Parallèle)

K : Constante de Boltzmann($K = 1,3805.10^{-13} j$)

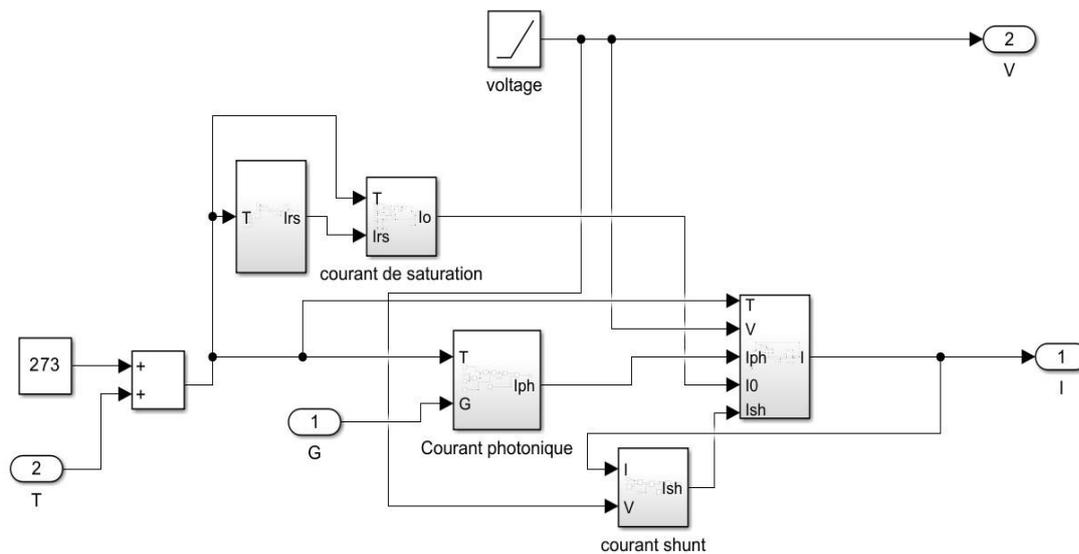


Fig .28 : : schéma bloc équivalent du courant Photovoltaïque

Equation Iph :
$$I_{ph} = [I_{cc} + K_i(T - 298)] \frac{g}{1000}$$

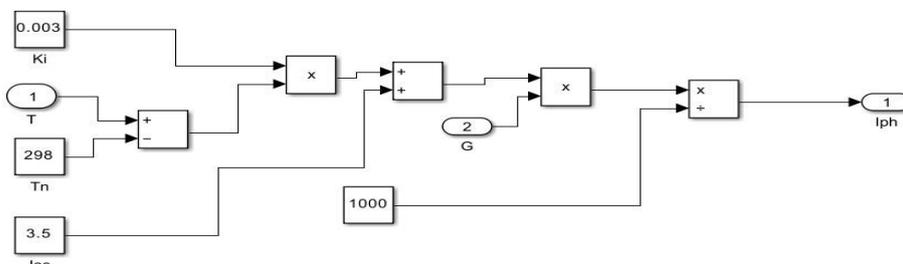


Fig .29 : : schéma bloc équivalent du photonique

Equation I0:

$$I_0 = I_{rs} \left[\frac{T}{T_{ref}} \right]^3 \exp \left[- \frac{qEg \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right)}{nK} \right]$$

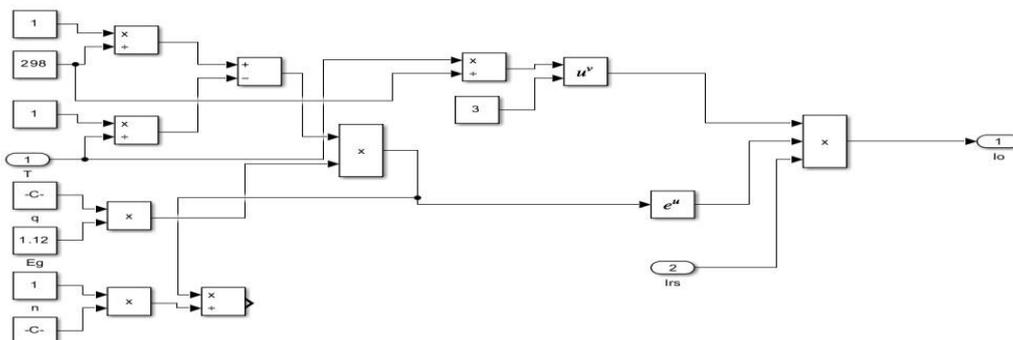


Fig .30 : : schéma bloc équivalent du courant de saturation

Equation Irs :

$$I_{rs} = \frac{I_{cc}}{\exp \left(\frac{qVoc}{n.n_s.KT} \right) - 1}$$

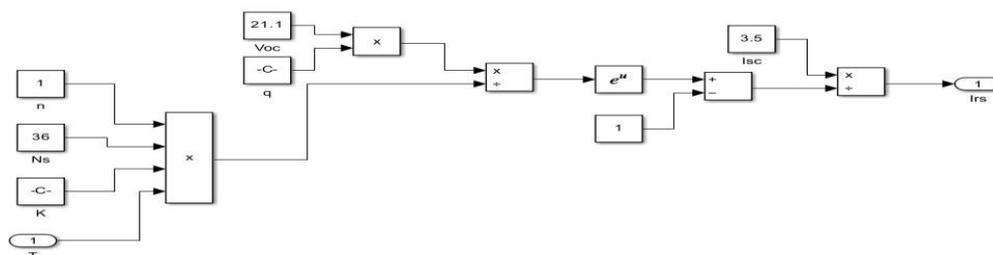


Fig .31 : : schéma bloc équivalent du courant de saturation inverse de la diode

Equation Ish :

$$I_{sh} = \frac{V + I_{rs}}{R_{sh}}$$

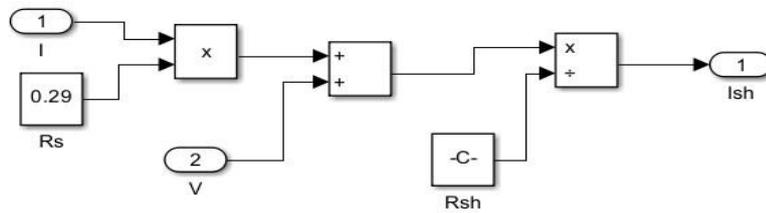


Fig .32 : : schéma bloc équivalent du courant shunt

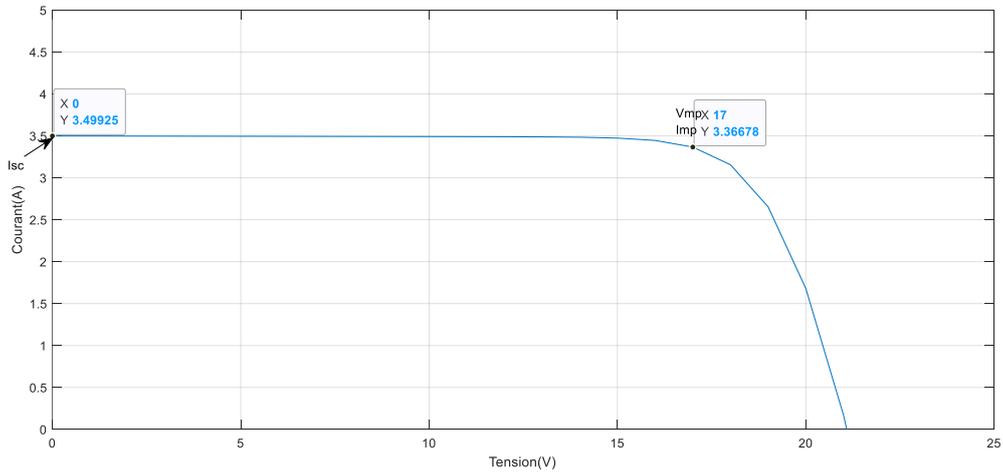


Fig .33 : Caractéristique I-V

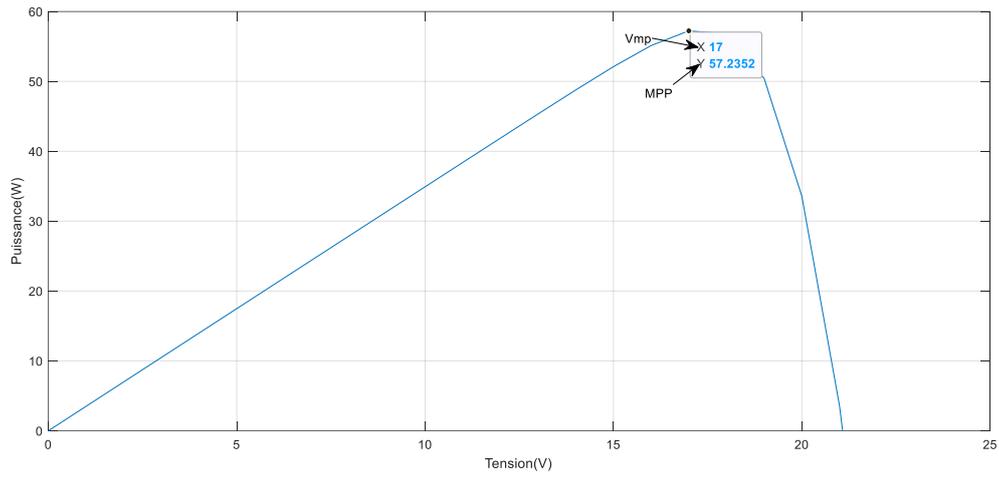


Fig .34 : Caractéristique P-V

IV-2 Effet de l'éclairement

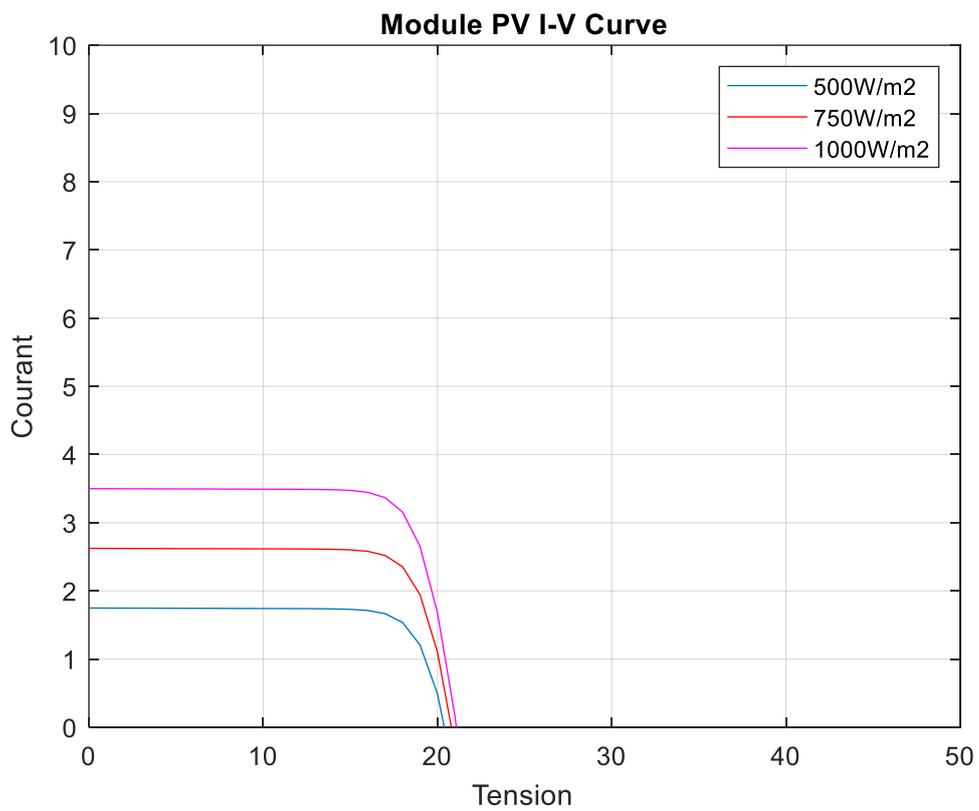


Fig .35 : l'effet d'éclairement sur I-V

IV-2-1 Interprétation

On remarque que le courant de court-circuit (I_{cc}) augmente avec l'éclairement alors que la tension à vide (V_{co}) varie peu.

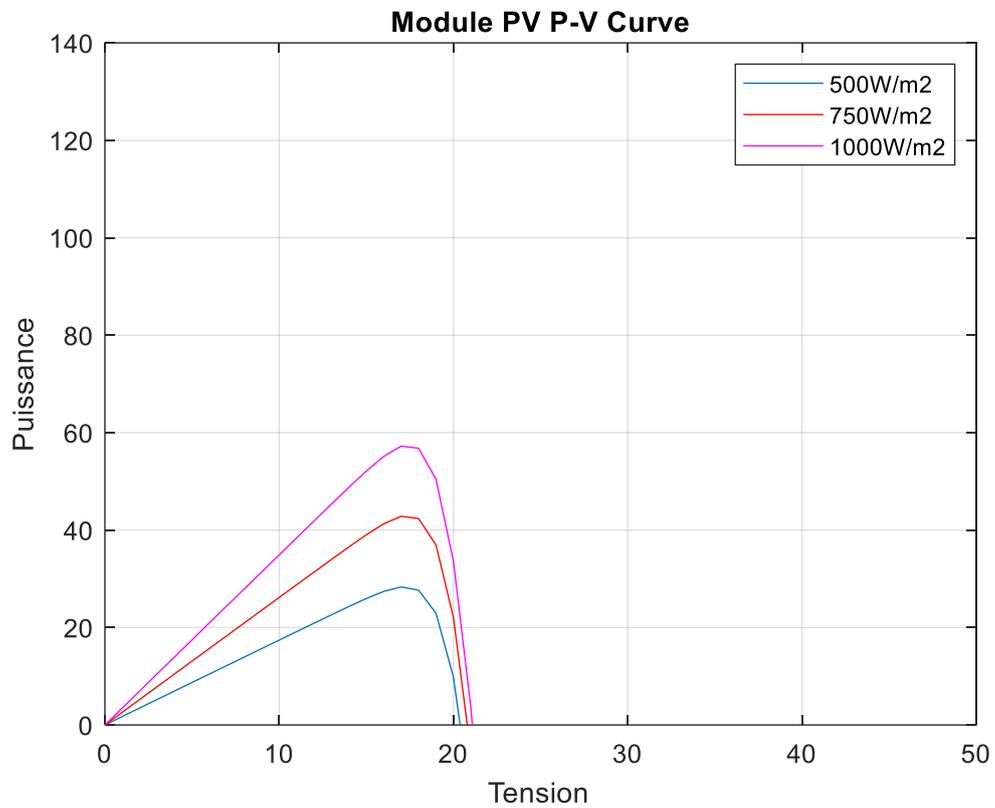


Fig .36 : effet d'éclairement sur P-V

On remarque que la puissance maximum délivrée par la cellule augmente avec l'éclairement

IV-3 Effet de température

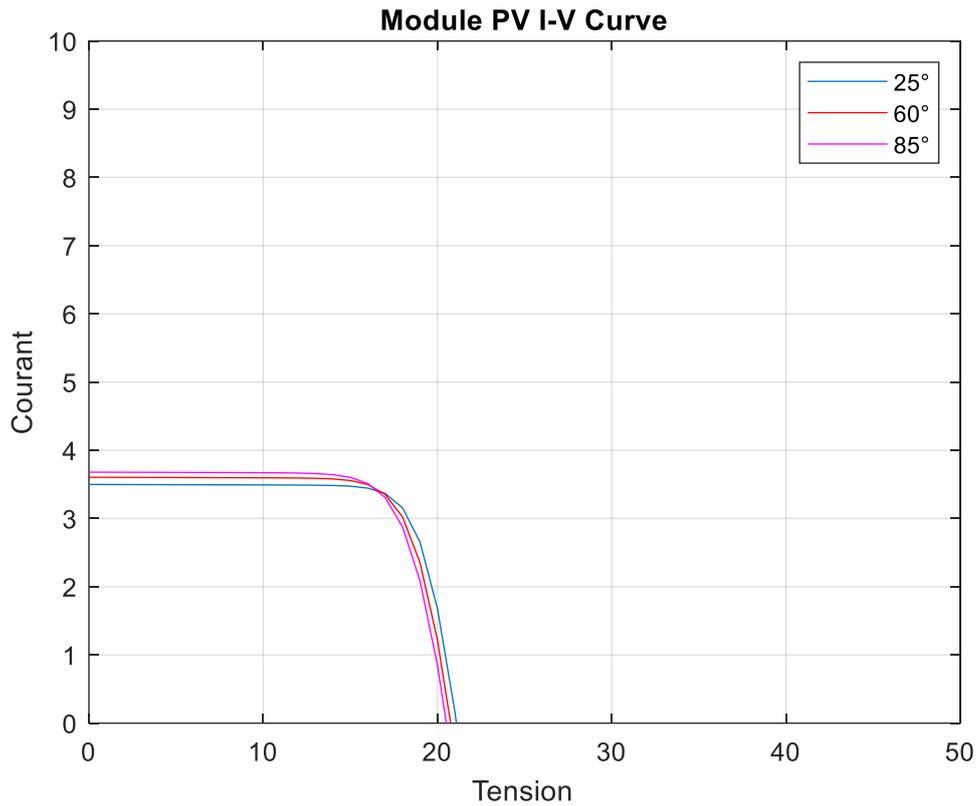


Fig .37 : effet de Température sur I-V

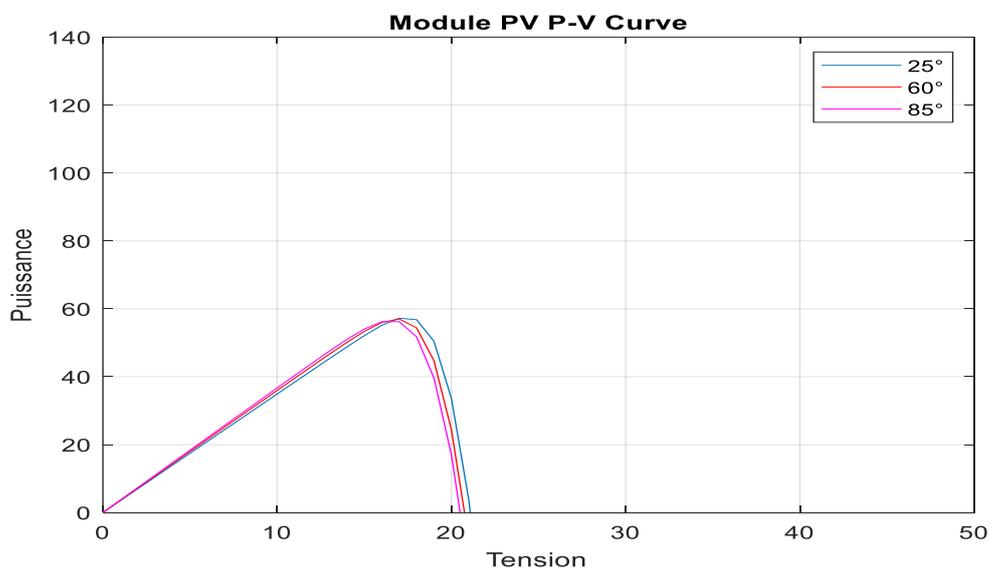


Fig .38 : effet de Température sur P-V

IV-3-1 Interprétation

On remarque que la tension à vide d'une cellule PV et la puissance maximale délivrée diminuent avec l'augmentation de la température

IV-4 DimensionnementHacheur

$$f_s = 20000Hz$$

$$R_{ch} = 40\Omega$$

$$L = \frac{V_{in} \cdot D}{f_s \cdot \Delta I_c} = 500 \cdot 10^{-6} H$$

$$D = \frac{V_{out} - V_{in}}{V_{out}}$$

$$D = \frac{48 - 17.5}{48} = 0.6$$

$$V_{in} = V_{mp} = 17.5V$$

On propose:

$$V_{out} = 48V$$

$$\Delta I_L = 30\% I_{cc}$$

$$\Delta I_L = 0.3 * 3.5 = 1.05$$

$$\Delta V_{out} : 5\% V_{out}$$

$$\Delta V_{out} = 0.05 * 48 = 2.4$$

$$C_1 = \frac{I_{out} \cdot D}{f_s \cdot \Delta V_{out}}$$

$$C_1 = C_2 = 43,75 \cdot 10^{-6} F$$

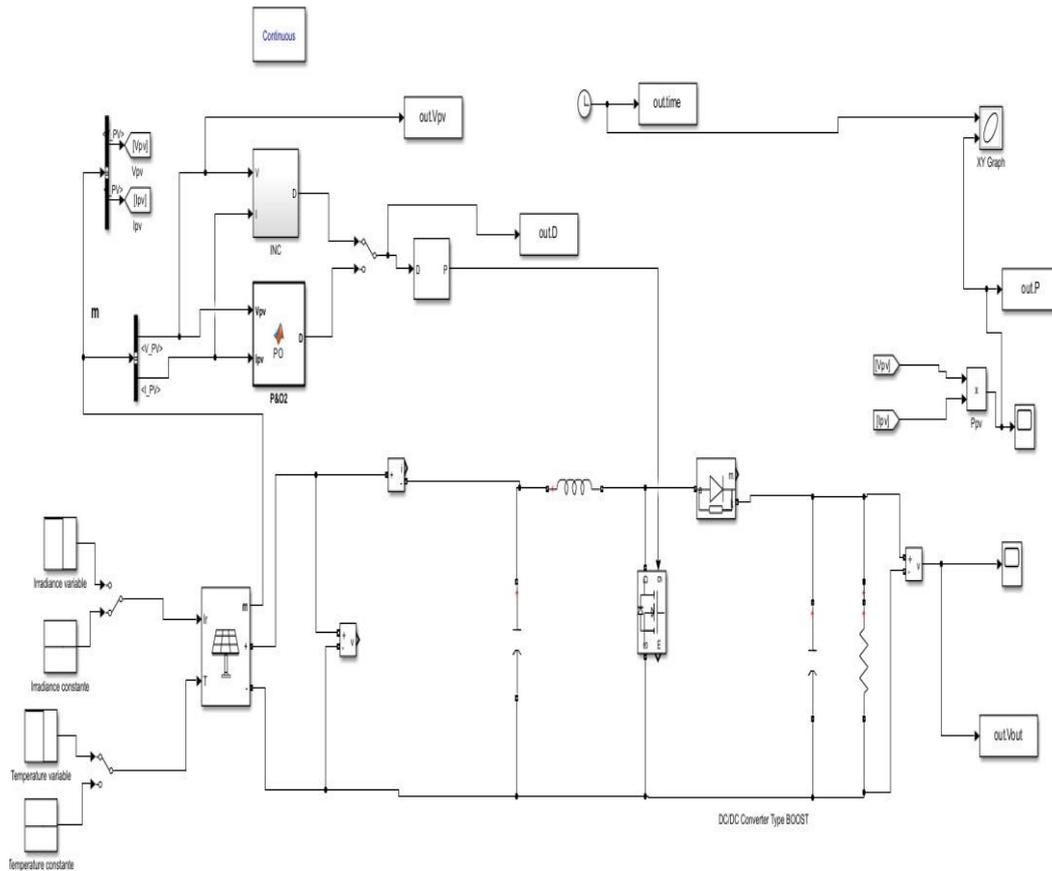


Fig .39 :: schéma bloc du modèle étudiant

IV-5 Résultats de simulation de l'algorithme P&O :

En utilisant le modèle Simulink comme outil de simulation, nous avons effectué des tests sous différentes conditions pour examiner la performance de l'algorithme P&O.

Les tests comprennent:

- Simulation sous conditions météorologiques standard (éclairage solaire de 1000 W/m² et température de 25 °C).
- Simulation avec un éclairage solaire variable et une température constante.
- Simulation avec un éclairage solaire constant et une température variable.

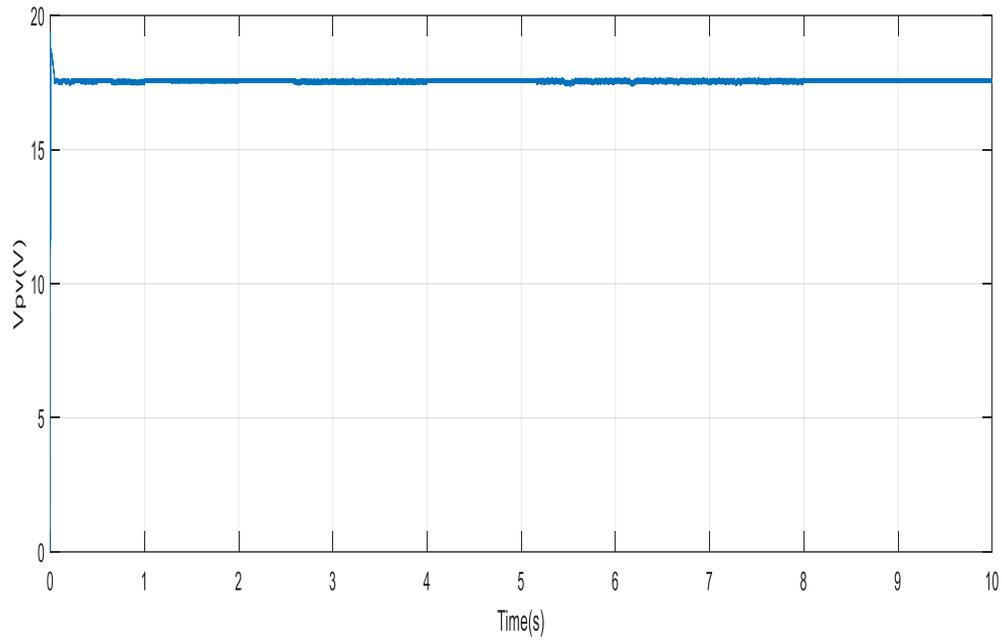


Fig .40 : Tension Photovoltaïque avec P&O

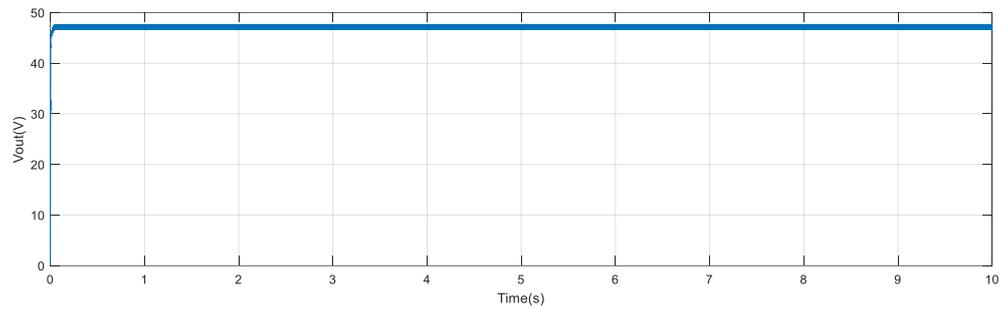


Fig .41 : Tension de sortie V_{out} avec P&O

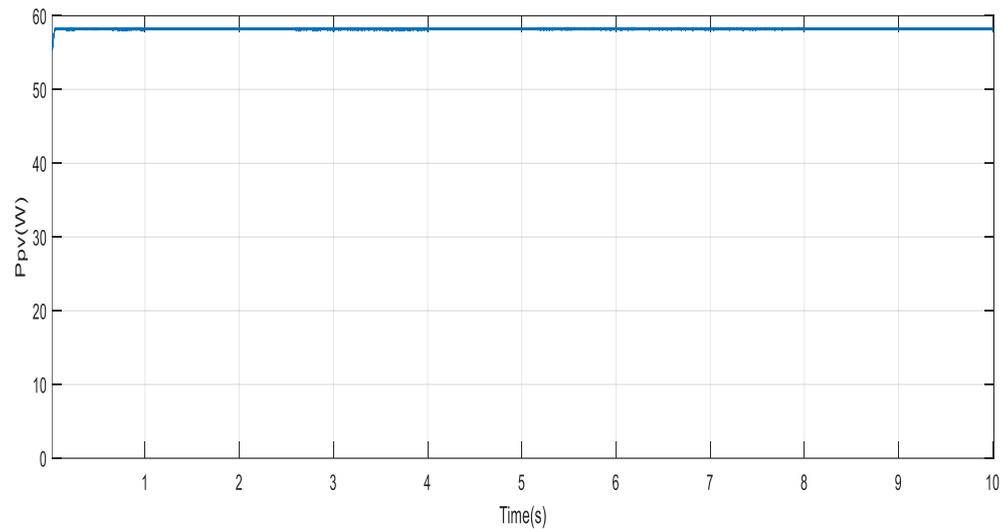


Fig .42 : Puissance Photovoltaïque avec P&O

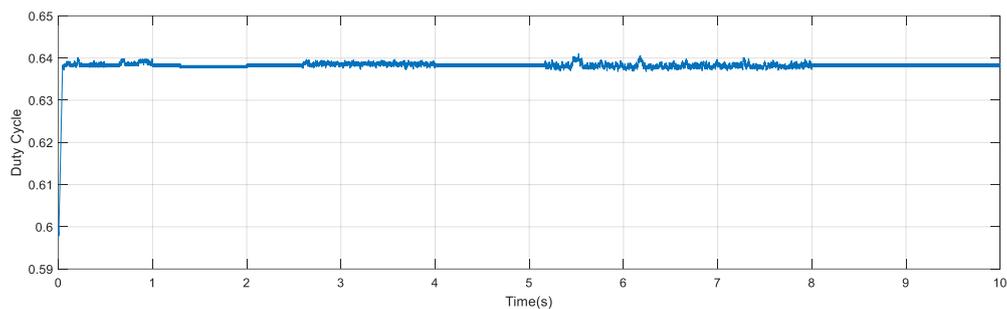


Fig .43 : Rapport Cyclique avec P&O

Les résultats de simulation montrent clairement que la réponse de la puissance PV avec la méthode P&O suit parfaitement son point maximum avec une considérable de perturbation.

IV-6 Résultats de simulation de la méthode d'Incrémentale Conductance

On refait le même test mais cette fois pour un système photovoltaïque commandé par l'algorithme INC

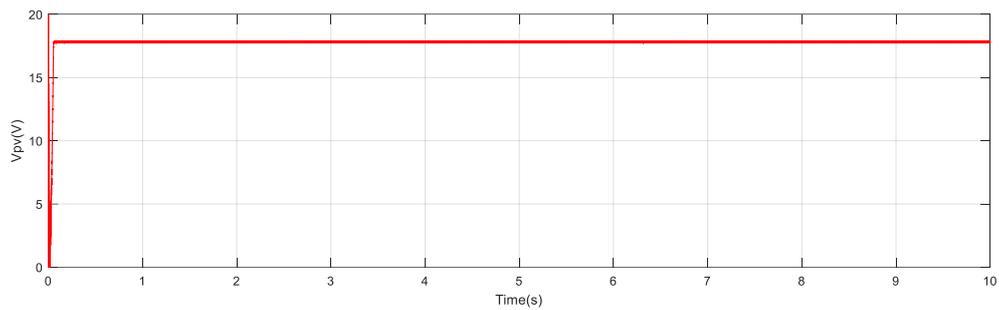


Fig .44 : Tension Photovoltaïque avec INC

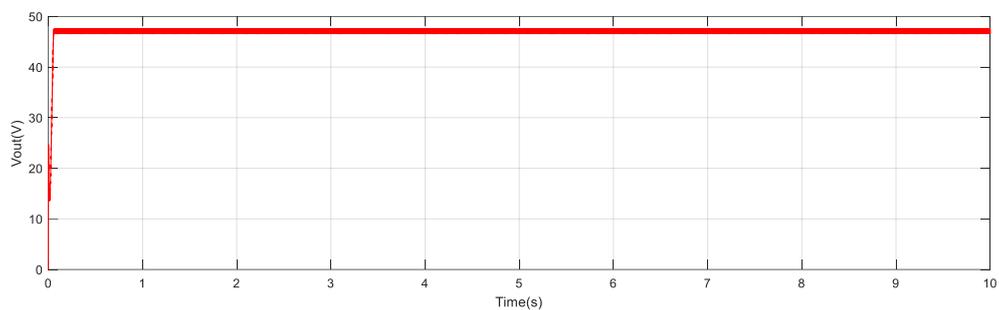


Fig .45 : Tension de sortie V_{out} avec INC

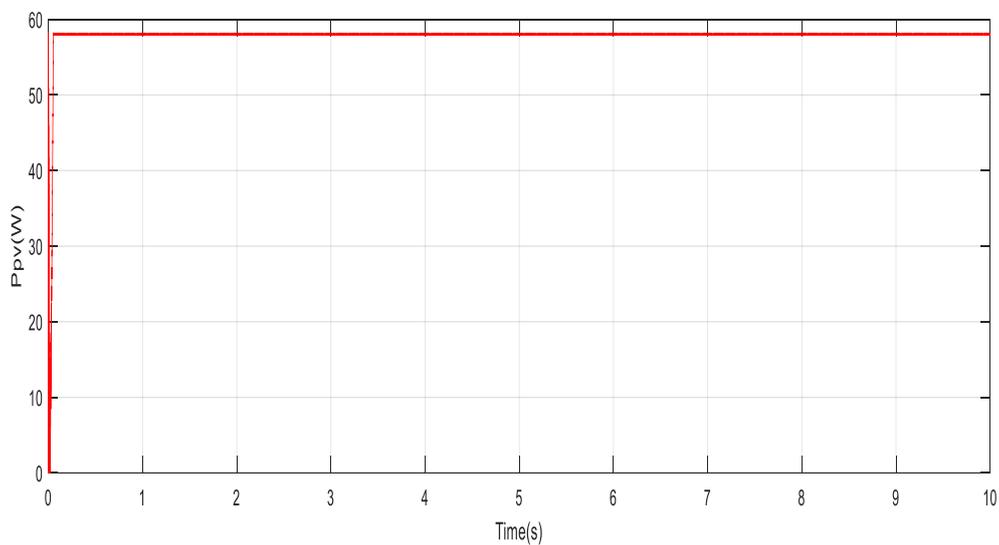


Fig .46 : Puissance Photovoltaïque avec INC

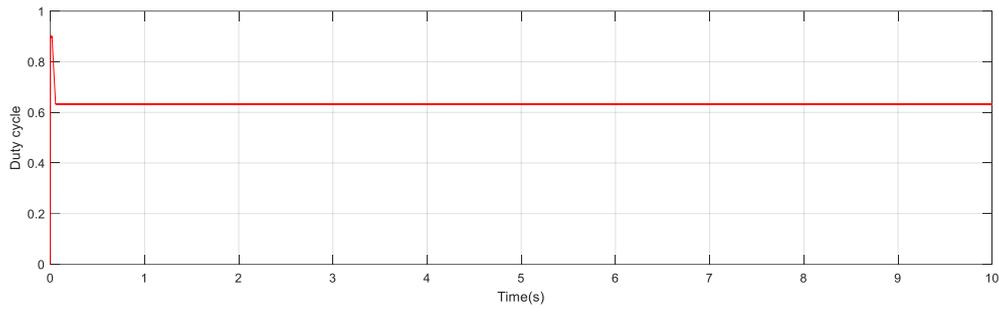


Fig .47 : Rapport Cyclique avec INC

Les résultats de simulation montrent clairement que la réponse de la puissance PV avec la méthode INC suit parfaitement son point maximum avec moins de fluctuation

IV-7 Comparaison entre les deux technique MPPT P&O et INC

COMPARAISON : CONDITION DE TEST STANDARD E=1000 ; T=25°

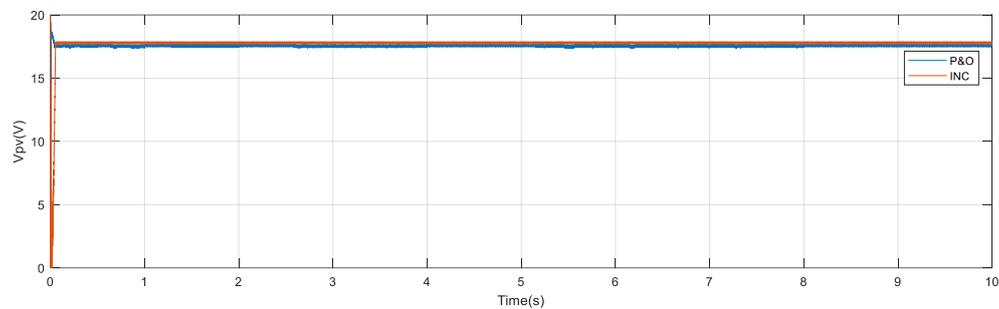


Fig .48 :Tension Photovoltaïque avec P&O et INC

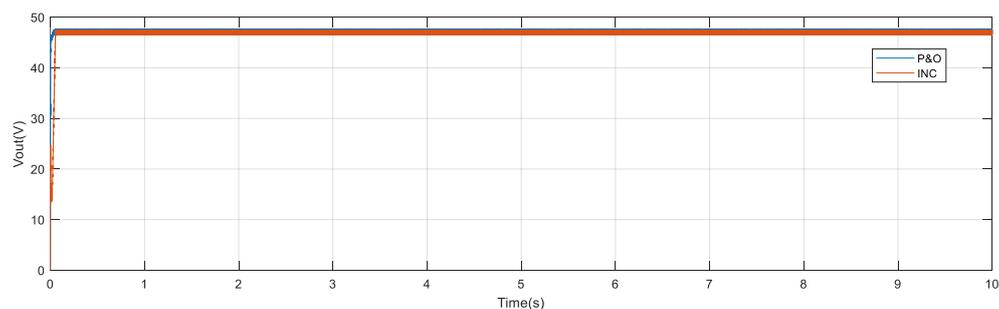


Fig .49 :Tension de Sortie avec P&O et INC

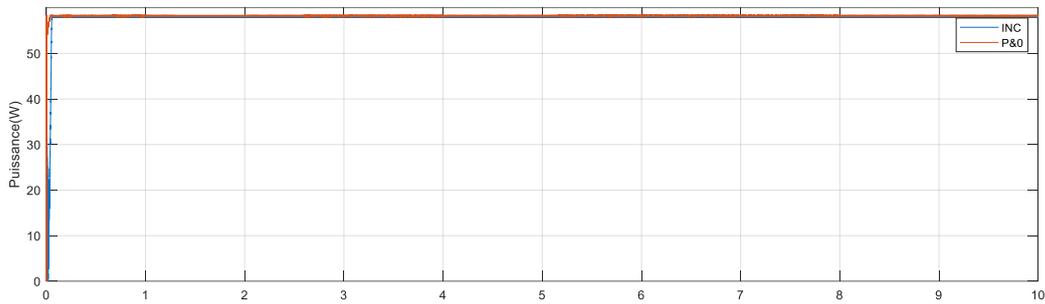


Fig .50 :Puissance Photovoltaïque avec P&O et INC

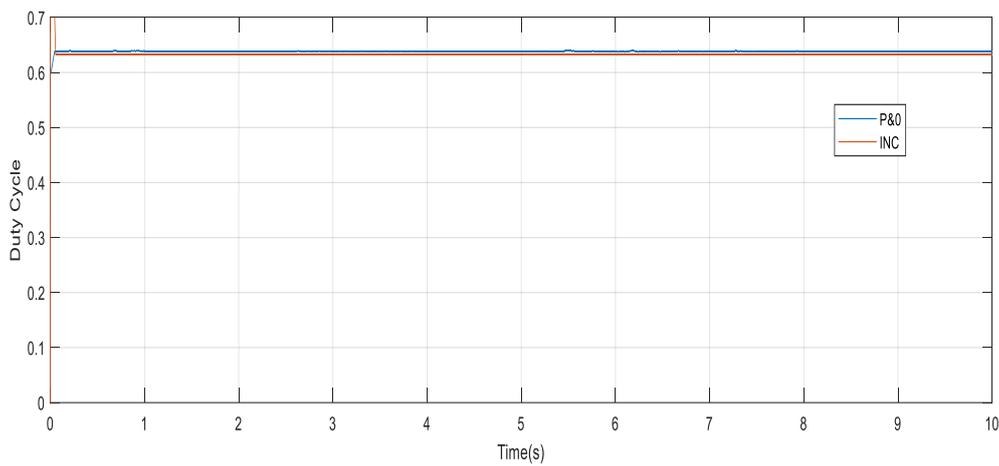


Fig .51 :Rapport cyclique avec P&O et INC

IV-7-1 Eclaircementvariable :

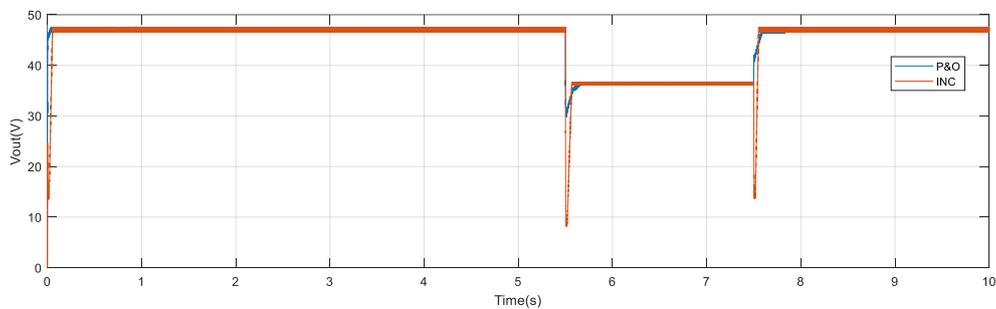


Fig .52 :Tension de Sortie avec P&O et INC

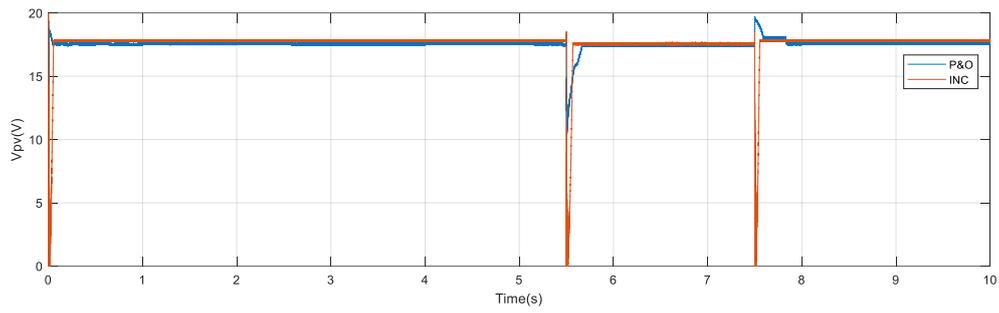


Fig .53 :Tension Photovoltaïque avec P&O et INC

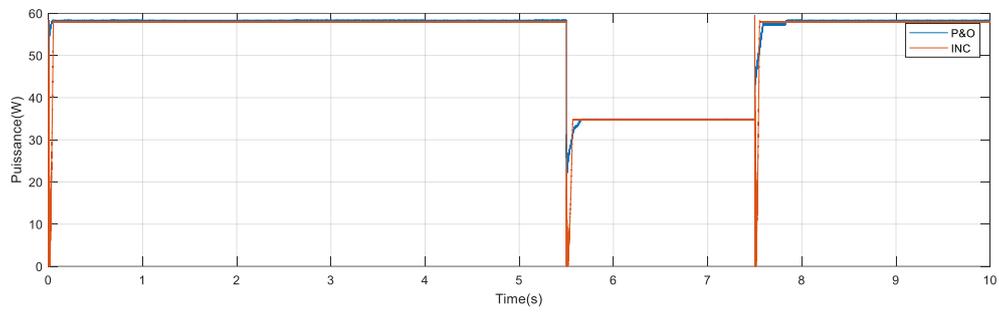


Fig .54 :Puissance Photovoltaïque avec P&O et INC

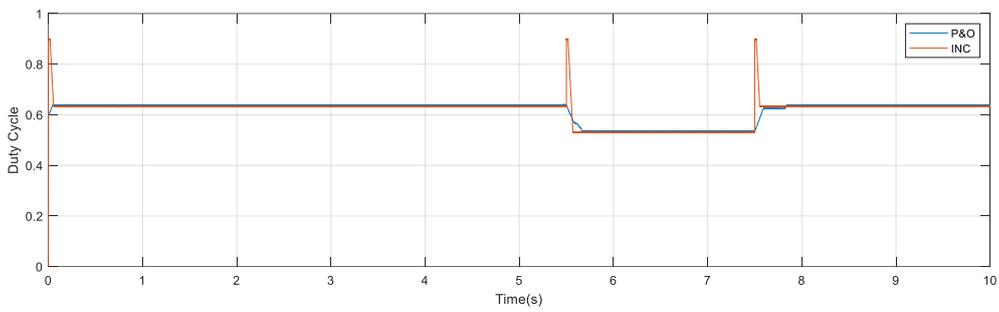


Fig .55 :Rapport cyclique avec P&O et INC

IV-7-2 Temperature variable:

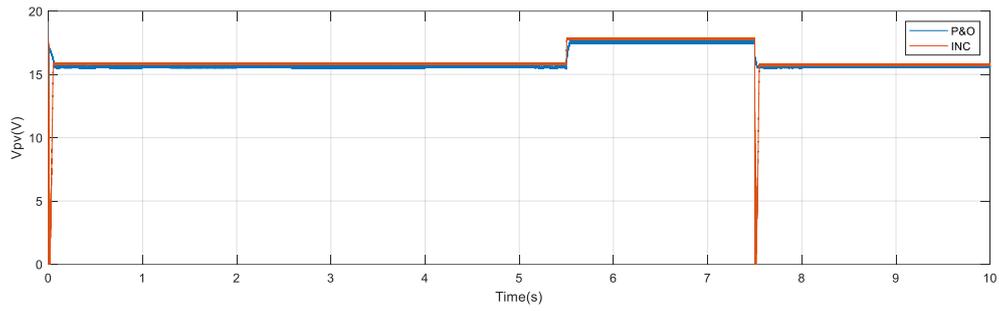


Fig .56 :TensionPhotovoltaïque avec P&O et INC

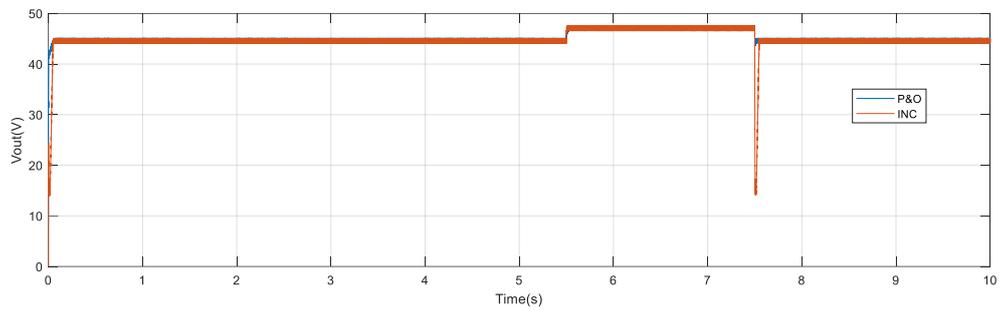


Fig .57 :Tension de sortie avec P&O et INC

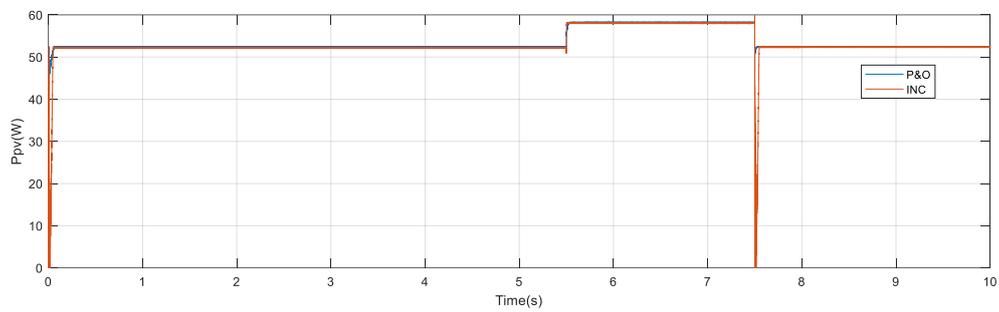


Fig .58 :Puissance Photovoltaïque avec P&O et INC

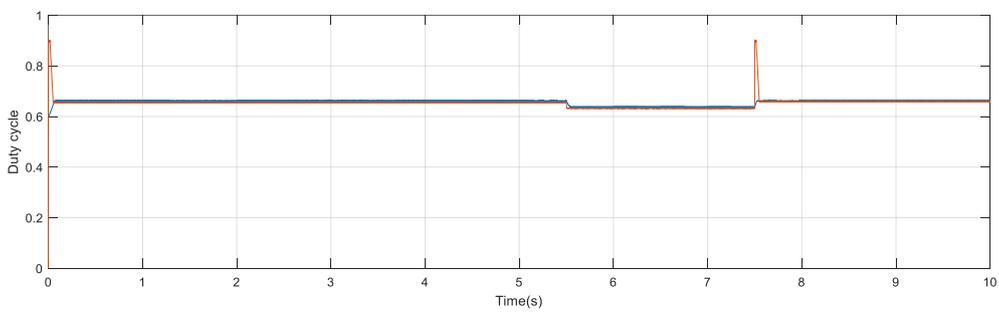


Fig .59 :Rapport Cyclique avec P&O et INC

Les résultats de simulation nous permettent de conclure que les caractéristiques avec la commande INC convergent plus rapidement et la précision s'améliore et présente moins d'oscillations par rapport à la commande P&O.

C'est intéressant de constater que même avec la variation des conditions météorologiques, les résultats de la simulation continuent de montrer que la commande INC offre des avantages significatifs par rapport à la commande P&O. La convergence plus rapide, l'amélioration de la précision et la réduction des oscillations indiquent que la commande INC est plus robuste et adaptable aux fluctuations météorologiques.

Conclusion

Notre étude s'intéresse sur la technique du suivi du point de puissance maximale. Les techniques MPPT les plus populaires sont revues et étudiées, telles que: Perturber et Observer et Incrément de la conductance. L'environnement Matlab-Simulink est utilisé pour analyser, puis interpréter les résultats de simulation de ces algorithmes, et par conséquent, montrer les performances et les limites de chaque algorithme.

*Conclusion
générale*

Conclusion générale

En conclusion, cette étude comparative des algorithmes Perturbation et Observation (P&O) et Incrémentation de la Conductance (INC) pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT) dans les systèmes photovoltaïques (PV) a permis d'obtenir des résultats significatifs et des conclusions importantes.

Tout d'abord, nous avons examiné en détail le fonctionnement et les caractéristiques des deux algorithmes, mettant en évidence leurs avantages et leurs limites respectives. Nous avons également réalisé une analyse approfondie de la littérature existante et des recherches antérieures sur ce sujet, ce qui nous a permis de situer notre étude dans le contexte de la recherche actuelle.

Ensuite, à travers une série de simulations réalisées dans l'environnement MATLAB/SIMULINK, nous avons comparé les performances des algorithmes P&O et INC dans différentes conditions de fonctionnement, telles que les variations de l'intensité lumineuse et de la température. Les résultats de ces simulations ont révélé des différences significatives dans les performances des deux algorithmes, notamment en termes d'efficacité de suivi MPPT, de stabilité et de réactivité aux changements de conditions environnementales.

En résumé, bien que les algorithmes MPPT classiques comme le P&O et l'INC aient joué un rôle crucial dans le développement des systèmes photovoltaïques, il est clair que des commandes plus avancées promettent d'ouvrir de nouvelles perspectives passionnantes dans ce domaine. En combinant les leçons apprises des approches traditionnelles avec les avancées technologiques les plus récentes

Références

Références

Références

- [1]:Site Internet, <http://www.scribd.com/doc/46661921/Les-energies-renouvelables>, consulté le 12/06/2013.
- [2] <http://www.futura-sciences.com/>
- [3] <https://prezi.com/>
- [4] <http://fr.wikipedia.org/>
- [5] <http://jeunes.edf.com/>
- [6][http://fr.wikipedia.org/wiki/Biomasse_\(énergie\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/Biomasse_(énergie))
- [7] F. Lasnier, T.G. Ang, "Photovoltaic Engineering Handbook" IOP Publishing Ltd.1980. ISBN 0-85274-311-4
- [8] S. Belakehal, "Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables", Thèse de doctorat de l'université de Constantine, Juin 2010.
- [9] : A. Ouldmoamedyahia et al « étude et modalisation d'un générateur photovoltaïque » revue des Energie Renouvelables Vol.11 N° 3 2008 pp 473-483, 2008.
- [10] T.U. Townsend « A Method for Estimating the Long Term Performance of Direct Coupled Photovoltaic Systems ». MS Thesis, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, 1989.
- [11] M.M. Kassaby, "Monthly and Daily Optimum Tilt Angle for South Facing Solar Collectors, Theoretical Model, Experimental and Empirical Correlations", Solar and Wind Technology, Vol. 5, pp. 589 – 596, 1988.
- [e] R.Khezzar et al. « Comparaison entre les différents modèles électriques et détermination des paramètres de la caractéristique I-V d'un module photovoltaïque », Revue des énergies renouvelables vol.13 N°3, pp 379-388,2010
- [12] K.H.HusseinI.MuttaT.HoshinoM.Osakada « maximum photovoltaic power tracking : an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions », IEE Proc Gener. Trans.Distrib, Vol 142 N°1, pp 59-64 1995
- [13] Marcelo GradellaVillalva, Jonas Rafael Gazoli, Ernesto RuppertFilho « Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic array »,10th Brazilian Power Electronics Conference (COBEP) ,2009
- [h] : J. Royer,T. Djiako,E. Schiller,B. SadaSy, « Le pompage photovoltaïque : Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens», Université d'Ottawa, 1998.

Références

- [14] J.A. Gow and C.D.Manning « Development of a photovoltaic array model for use in power electronics simulation studies », IEE Proceedings on Electric power applications ,Vol 146,N°2, pp 193-200,1999
- [18] P. Kern and I. Harris, “On the Optimum Tilt of Solar Collector”, Solar Energy, Vol. 17, N°2, pp. 92 – 112, 1975.
- [19] : M. Hatti, « Contrôleur Flou pour la Poursuite du Point de Puissance Maximum d’un Système Photovoltaïque », JCGE’08, Lyon, 16 et 17 décembre, 2008.
- [16] G. Notton et al. « Influence d’un ombrage partiel sur la production électrique d’un module photovoltaïque en silicium monocristallin ». Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°1, pp 49-62, 2010.
- [15] T.U. Townsend « A Method for Estimating the Long Term Performance of DirectCoupled Photovoltaic Systems ». MS Thesis, Solar EnergyLaboratory, University of Wisconsin, Madison, 1989.
- [13] Zekai ,Sen “Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques”, 2008 Springer-Verlag London Limited, PP73, 74, 77, 87, 89
- [17] S.Bellakehel, « conception & commande des machines à aimants permanents Dédiées aux énergies renouvelables », thèse de doctorat, Université de Constantine 2010