

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE Echahid Hamma Lakhdar- EL Oued

Faculté de la Technologie

Département de Génie Electrique

Mémoire de Master

Spécialité : Réseaux Electriques

THEME

**Conception, simulation et réalisation d'un régulateur solaire
avec commande MPPT à base d'une carte Arduino**

Présenté et soutenu par :

Mr MEKKAOUI Saddam, Mr DHIF Souhaib & Mr CHEKIMA AhmedYahia.

Le:

Devant le jury composé de :

Dr : MAAMRI Oussama	Président
Dr : GACEM Abdelmalek	Encadreur
Dr : OBEIDI Nabil	Co-Encadreur
Dr : LABBI Yacine	Examineur

Année Universitaire 2021/2022.



Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A la mémoire de ma grande mère et mon grand père

A mon très cher père

A ma très chère mère

A tous mes frères

A toutes mes sœurs

A tout mes amis

A tout qui me connais de près ou de loin.

❖ **SADDAM MEKKAOUI**



Dédicace

JE DÉDIE CE MODESTE TRAVAIL :

A MON TRÈS CHER PÈRE

A MA TRÈS CHÈRE MÈRE

A MON FRÈRE WASSIM

A MA PETIT SŒUR AMIRA

A TOUT MES AMIS

A TOUT QUI ME CONNAIS DE PRÈS OU DE LOIN.

❖ DHIF SOUHAIB



Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A la mémoire de ma grande mère et mon grand père

A mon très cher père

A ma très chère mère

A tous mes frères

A toutes mes sœurs

A tous mes amis

A tout qui me connais de près ou de loin.

❖ AHMED YAHIA CHEKIMA

Remerciement

Avant tout, nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné courage, patience et force durant toutes ces années d'étude et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Nous tenons à exprimer notre remerciement et notre gratitude à notre encadreur :

Dr. « GACEM ABDELMALEK »

et à notre co-encadreur :

Dr. « OBEIDI NABIL »

*Nos remercie : ments à tous les enseignants qui nous enseignés durant les années du Cours au département de Génie Electrique
Université Echahid Hamma Lakhdar
El-Oued.*

Nos remerciements sont également adressés aux membres de jury qui ont accepté de juger ce travail.

Enfin nous remercions aussi toutes les nos familles et les personnes qui nous ont aidés de près ou de loin à la rédaction de ce travail spécifiquement :

Dr. Labiod Chouaib

Dr.Djaafar Toumi

Dr. Cherif Hakima

ملخص:

تكتسب الطاقة الكهروضوئية (PV) مكانتها بشكل متزايد في الطاقات المتجددة، لكن الألواح الشمسية، على الرغم من تطور تقنيات التصنيع، تعاني من كفاءة تحويل منخفضة إلى حد ما للطاقة، وقد تظل هذه الكفاءة أقل. إذا كان المولد الكهروضوئي (PVG) لا يعمل حول نقطة تسمى: نقطة الطاقة القصوى MPP. يعد تتبع هذه النقطة، التي تغير الموقع مع الظروف الجوية، خطوة مهمة للغاية في تشغيل نظام الكهروضوئية. في هذه الأطروحة سنقوم بمحاكاة وتحسين وتحقيق نظام ضوئي يعمل بمحول Buck-Boost تغطي هذه الدراسة تنفيذ مختلف خوارزميات نقطة الطاقة القصوى مثل خوارزمية الاضطراب والملاحظة (P&O) والتوصيل المتزايد (INC) وبحث الوقواق (CS). لذلك سنبدأ بالمحاكاة والنمذجة الرياضية للخلية الكهروضوئية والمحولات المختلفة وخاصة محول Buck-Boost. بعد ذلك، قمنا بتفصيل العديد من خوارزميات MPPT التي تتحكم في المحول المستخدم. أخيراً، قمنا بتنفيذ التحقيق العملي لنظامنا باستخدام خوارزميتين (P&O) و (INC) المقترحتين بواسطة لوحة Arduino Mega 2560.

كلمات مفتاحية: مولد كهروضوئي، رصد نقطة الاستطاعة القصوى MPPT، (P&O)، (INC)، مطبر رافع و خافض للجهد، لوحة أردوينو ميغا 2560.

Résumé :

L'énergie photovoltaïque (PV) gagne de plus en plus sa place dans les sources d'énergie renouvelable mais les panneaux solaires, malgré le développement des technologies de fabrication, souffrent d'un rendement de conversion énergétique assez faible, ce rendement peut être encore plus faible si le générateur photovoltaïque (GPV) ne fonctionne pas autour d'un point appelé : point de puissance maximale MPP. La poursuite de ce point, qui change de position avec les conditions climatiques, est une étape très importante dans la fonctionnement d'un système PV. Dans cette thèse nous allons simuler, optimiser et réaliser un système photovoltaïque fonctionnant avec un convertisseur Buck-Boost. Cette étude couvre la mise en œuvre de différents algorithmes du point de puissance maximale tels que l'algorithme de perturbation et d'observation (P&O), la conductance incrémentale (INC) et cuckoo search (CS). Par conséquent, nous commencerons par la simulation et la modélisation mathématique de la cellule photovoltaïque et des différents transformateurs et principalement le convertisseur Buck-Boost. Ensuite, nous avons détaillé plusieurs algorithmes MPPT contrôlant notre convertisseur. Enfin,

nous avons fait la réalisation pratique de notre système avec le deux algorithmes MPPT (P&O) et (INC) proposés à base d'une carte Arduino Méga 2560.

Mots clés : Générateur photovoltaïque, Buck-Boost, P&O, INC, MPPT , Arduino Mega2560.

Abstract:

Photovoltaic (PV) energy is increasingly gaining its place in renewable energies but solar panels, despite the development of manufacturing technologies, suffer from a fairly low energy conversion efficiency, this efficiency may still be lower. if the photovoltaic generator (PVG) does not operate around a point called: maximum power point MPP. Tracking this point, which changes position with weather conditions, is a very important step in the operation of a PV system. In this thesis we will simulate, optimize and realize a photovoltaic system operating with a Buck-Boost converter. This study covers the implementation of different maximum power point algorithms such as Perturbation and Observation (P&O) algorithm, Incremental Conductance (INC) and Cuckoo Search (CS). We will therefore start with the simulation and mathematical modeling of the photovoltaic cell and the various transformers and mainly of the Buck-Boost converter. Next, we detailed several MPPT algorithms controlling our converter. Finally, we carried out the practical realization of our system with the two MPPT algorithms (P&O) and (INC) proposed on the basis of an Arduino Mega 2560 board.

Keywords: Photovoltaic generator, Buck-Boost, P&O, INC, MPPT, Arduino Mega.

TABLE DES MATIÈRES

Table des matières	i
Table des figures	v
Liste des tableaux	viii
Liste des symbols et Abréviations	ix
Introduction générale	1
1 Généralité sur le système photovoltaïque	3
1.1 Introduction	4
1.2 L'énergie Solaire	4
1.2.1 Rayonnement solaire	5
1.2.2 Spectre du rayonnement	6
1.2.3 Durée d'insolation	7
1.3 Description des éléments d'un système photovoltaïque	7
1.3.1 Constitution de la cellule photovoltaïque	7
1.3.2 L'effet photovoltaïque	8
1.4 Conversion du rayonnement solaire par effet photovoltaïque	9
1.5 Technologies des cellules photovoltaïques	10
1.5.1 Technologies de la 1ère génération à base de Silicium Cristallin	10
1.5.2 Technologies de la 2ème génération à base de couche-mince	10
1.5.3 Technologies de la 3ème génération «les cellules organiques»	10

1.6	Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque	11
1.6.1	Paramètres d'une cellule photovoltaïque	12
1.7	La protection des modules solaires	13
1.8	Simulation de générateur photovoltaïque	14
1.8.1	Plaque signalétique d'un générateur photovoltaïque de 50 W	15
1.8.2	l'influentes de température	15
1.8.3	Influence de l'éclairement	16
1.9	Applications des systèmes photovoltaïques	17
1.9.1	Systèmes autonomes	17
1.9.2	Systèmes hybrides	17
1.9.3	Systèmes couplés au réseau	18
1.9.4	Systèmes fonctionnant au fil du soleil (Pompage photovoltaïque)	19
1.10	Modélisation d'une cellule photovoltaïque	20
1.10.1	Cas d'une cellule idéale	20
1.10.2	Cas d'une cellule réelle	21
1.11	Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques	22
1.11.1	Avantages	22
1.11.2	Inconvénients	23
1.12	Conclusion	23
2	Les convertisseurs statique DC-DC	24
2.1	Introduction	25
2.2	Etude des convertisseurs DC-DC	25
2.2.1	Convertisseur DC/DC (hacheur)	25
2.2.2	Type des hacheurs	26
2.2.3	Applications des convertisseurs DC-DC	27
2.2.4	Considération de commutation des convertisseurs DC-DC	27
2.3	Rôle des convertisseurs DC-DC	27
2.4	Convertisseur Buck	28
2.5	Convertisseur Boost	28
2.6	Convertisseur Buck-Boost :	29
2.7	Convertisseur Cuk	29
2.8	Convertisseur Sepic	29
2.9	Comparaison des montages	30

2.10	Convertisseur utilisé (BUCK-BOOST)	31
2.10.1	Principe de fonctionnement :	31
2.10.2	Modélisation du circuit :	31
2.10.3	Représentation d'état :	31
2.10.4	Avantages et inconvénients du convertisseur buck-boost	33
2.11	Conclusion	33
3	MPPT problématique	34
3.1	Introduction	35
3.2	La commande MPPT	35
3.2.1	Convertisseur pour la poursuite du point de puissance maximum (MPPT)	35
3.2.2	Principe de la recherche du point de puissance maximale(MPPT)	37
3.3	Classification des commandes MPPT	38
3.3.1	Classification des commandes MPPT selon les paramètres d'entrée.	39
3.3.2	Classification des commandes MPPT selon le type de recherche	39
3.4	Les algorithmes MPPT	40
3.4.1	Algorithme Perturber et observer	40
3.4.2	Algorithme de couckou search (CS)	41
3.4.3	Algorithme Incrément de la conductance	43
3.4.4	Algorithme à base de la logique floue	44
3.4.5	Optimisation d'essaim de particules (PSO)	46
3.4.6	Le technique de réseaux de neurones artificiels	48
3.5	Techniques de la commande PWM	50
3.5.1	Principe de la commande PWM	50
3.6	Critères d'évaluation d'une commande MPPT	51
3.6.1	Simplicité et Coût	51
3.6.2	Réponse dynamique	51
3.6.3	Flexibilité	52
3.6.4	Compétitive sur une large gamme de puissance	52
3.7	Conclusion	52
4	Simulation et réalisation de système	53
4.1	Introduction	54
4.2	Simulation d'un système photovoltaïque	54

4.2.1	Schéma Matlab/Simulink du simulation de système photovoltaïque . . .	55
4.2.2	Résultats de la simulation	56
4.3	Matériel utilisé	60
4.3.1	Le microcontrôleur	60
4.3.2	Le panneau solaire	62
4.3.3	Convertisseur Buck-Boost et circuit de controle de convertisseur	62
4.4	Réalisation du système	63
4.4.1	Schéma Matlab/Simulink du pratique de système photovoltaïque	64
4.4.2	Résultas pratique	65
4.5	Discussion générale de résultats	66
4.6	Conclusion	67
	Conclusion générale	68
	Bibliographie	69

TABLE DES FIGURES

1.1	Composante du rayonnement global sur un plan horizontal.	6
1.2	spectre solaire hors atmosphère.	7
1.3	Schéma d'une cellule élémentaire.	8
1.4	Principe de l'effet photovoltaïque.	9
1.5	Schéma équivalent électrique de la cellule PV.	11
1.6	Exemples d'association sécurisée de deux modules PV commerciaux en parallèles avec leurs diodes de protections.	13
1.7	Effet de la diode by-pass sur la caractéristique $I(V)$ d'un générateur photovoltaïque.	14
1.8	Schéma Matlab/Simulink de generateur PV.	14
1.9	Caractéristique courant-tension d'une module PV.	15
1.10	Caractéristique puissance-tension d'une module PV.	16
1.11	Caractéristique courant-tension d'une module PV	16
1.12	Caractéristique puissance-tension d'une module PV.	17
1.13	Système hybride.	18
1.14	Système PV couplés aux réseaux.	18
1.15	Les éléments d'une installation de pompage photovoltaïque.	19
1.16	Schéma équivalent d'une cellule idéale.	20
1.17	Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.	21
2.1	Principe de base d'un hacheur.	25
2.2	Symbole d'un hacheur DC/DC..	26
2.3	Schéma électrique de l'hacheur Buck.	28
2.4	Schéma électrique de l'hacheur Boost.	28

2.5	Schéma électrique de l'hacheur Buck-Boost.	29
2.6	Schéma électrique de l'hacheur Cuk.	29
2.7	Schéma électrique de l'hacheur Sepic.	30
3.1	Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque associée à une commande MPPT.	36
3.2	Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.	37
3.3	Recherche et recouvrement du point de puissance maximale.	38
3.4	Organigramme de l'algorithme 'PO'.	41
3.5	Organigramme de l'algorithme 'INC'.	44
3.6	Schéma bloc de l'algorithme à base de la logique floue.	44
3.7	Schéma bloc de l'algorithme à base de la logique floue.	45
3.8	Organigramme de la PSO.	48
3.9	Exemple d'un réseau de neurones.	49
4.1	Données sur les caractéristiques électriques du module PV tirées de Matlab/Simulink.	54
4.2	Schéma Matlab/Simulink du système photovoltaïque.	55
4.3	(A) Rapport cyclique (B) Puissance PV.	56
4.4	Resultat de simulation de :(A) courant PV (B) tension PV.	56
4.5	(A) Rapport cyclique (B) Puissance PV.	57
4.6	Resultat de simulation de :(A) courant PV (B) tension PV	57
4.7	(A) Rapport cyclique (B) Puissance PV.	58
4.8	(A) Rapport cyclique (B) Puissance PV.	58
4.9	Resultat de simulation de :(A) courant PV (B) tension PV	58
4.10	(A) Rapport cyclique (B) Puissance PV.	59
4.11	Resultat de simulation de :(A) courant PV (B) tension PV	59
4.12	Résultats de la simulation des formes d'onde de suivi MPP : (A) rapport cyclique,(B) puissance PV,(C) courant PV et (D) tension PV pour le fonctionnement en régime permanent avec deux facteur de mise à l'échelle MPPT :(blue) PO basé sur 0.01 et (rouge) PO basé sur 0.0025.	60
4.13	Arduino MEGA.	61
4.14	(A) Photo réel panneau PV (B) Plaque signalétique du panneau PV.	62
4.15	(A) Photo réel de convertisseur Buck-Boost (B) circuit de controle de convertisseur.	63
4.16	Banque d'essais réel de système photovoltaïque.	64
4.17	Schéma Matlab/Simulink du pratique de système photovoltaïque.	64
4.18	Résultat pratique des algorithmes utilisée.	65

4.19	Résultat pratique des algorithmes utilisée.	65
4.20	(A) résultat pratique du tension de sortie de convertisseur (B)Résultat pratique de puissance PV.	66
4.21	(A) Le changement de tension de sortie par controle de constante de PWM [0.9;0.1] (B) Signal de PWM transféré de controle au convertisseur	66

LISTE DES TABLEAUX

1.1	Plaque signalétique d'un générateur photovoltaïque de 50 W	15
2.1	Récapitulatif des caractéristiques des convertisseurs continu-continu.	30
3.1	Règles d'inférence.	46
3.2	Paramètre de l'algorithme PSO.	47
4.1	Paramètre de convertisseur buck-boost.	55
4.2	la carte arduino MEGA.	61

LISTE DES SYMBOLS ET ABRÉVIATIONS

E : Eclairement [W/m^2].

Λ : vitesse spécifique

H : Constante de PLANCK [J/s]

E_{pv} : Énergie de photon [eV]

I_{ph} : Le photo-courant [A].

I : Le courant généré par la photopile [A].

I_s : Le courant de saturation [A].

I_{sc} : le courant du court-circuit [A].

I_L : Le courant de l'inductance du hacheur [A].

I_{pv} : Courant délivré par le générateur PV [A].

V : la tension aux bornes de la cellule [V].

q : La charge de l'électron $=1,6 \cdot 10^{-19}$ C.

R_s : La résistance série [Ω].

R_{sh} : La Résistances shunt [Ω].

T : La température de fonctionnement en Kelvin.

A : le facteur de qualité de la cellule.

V_{th} : La tension thermique.

V_{oc} : La tension de circuit ouvert [V].

P : La puissance caractéristique [W].

P_{max} : La puissance maximale [W].

N_s : Nombre de modules dans le panneau en série.

N_p : Nombre de modules dans le panneau en parallèle.

V_{opt} : Tension optimale [V].

I_{opt} : Courant optimum [A]

η : Rendement de la cellule [%]

η_{mpp} : Rendement du MPPT [%]

MPPT : maximum power point tracking

PPM : point de fonctionnement optimale

G : L'éclairement de référence (1000 W/m²).

C : Condensateur de filtrage de sortie du hacheur [μ F].

L : Inductance du hacheur.

Q : L'interrupteur du hacheur.

D : Rapport cyclique.

PV : Photovoltaïque.

GPV : Générateur Photovoltaïque.

MPPT : Maximum Power Point Tracking.

PO : Perturbation et Observation.

DC : Courant Continu (Direct Current)

DC-DC : conversion continu-continu

PSO : Optimisation d'essaim de particules

Inc.CoN : Incrément de conductance

CS : Couckou search

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les énergies renouvelables et en particulier l'énergie photovoltaïque sont devenues très prometteuses sources d'énergie dans les ressources énergétiques futures d'un pays, d'abord en raison de sa nature propre, mais aussi à cause de la diminution des réserves de ressources conventionnelles (pétrole, gaz, etc...), la croissance démographique et économique de ce pays, encourageant la production de plus énergie électrique.

Plusieurs sources d'énergie renouvelable ont été découvertes ces dernières années, notamment l'énergie éolienne, hydraulique et photovoltaïque, cette dernière étant l'une des énergies les plus renouvelables au le monde.

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement solaire. Il peut même être transformée en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque. Panneaux photovoltaïques constitués de cellules photovoltaïques ont la capacité de transformer des photons en électrons. Énergie dans la forme de courant continu est donc directement utilisable.

L'efficacité des systèmes photovoltaïques peut être améliorée par des solutions utilisant des techniques pour trouver le point de puissance maximale (appelées techniques MPPT).

Dans cette thèse, nous nous intéressons principalement au développement d'une procédure d'optimisation qui permet le suivi ponctuel de la puissance maximale (Maximum Power Point Tracking MPPT) d'un générateur photovoltaïque (GPV), telle que la méthode perturbation et observation (PO) et coucou search (CS).

Ainsi, nous présentons dans ce projet la simulation sous matlab/simulink et la réalisation de un contrôle MPPT numérique basé sur les algorithmes MPPT qui sont PO, INC, en faisant un réalisation au moyen d'une carte Arduino Mega 2560 avec un contrôle MPPT. La thèse se compose de quatre chapitres :

Dans **le premier chapitre**, nous présenterons une généralité sur les systèmes photo-

voltaïques, le principe de conversion photovoltaïque et la modélisation du module photovoltaïque. Aussi, Nous énumérons les technologies photovoltaïques et les applications des systèmes photovoltaïques.

Dans **le deuxième chapitre**, nous avons étudié le convertisseur DC-DC couramment utilisé dans les systèmes photovoltaïques (le Buck- Boost convertisseur), nous avons étudié la modélisation et le principe de fonctionnement puis nous avons expliqué la différence entre cinq convertisseurs (Buck, Boost, Buck-Boost, Cuk et Sepic).

Dans **le troisième chapitre**, est consacré au le problème MPPT et pourquoi nous avons besoin de mppt puis introduit et expliqué nombreux algorithmes d'MPPT et le principe de chacun d'eux et expliqué la technique PWM.

Dans **le dernier chapitre**, nous présenterons les résultats des simulations et des tests expérimentaux Enfin, nous terminerons notre thèse par une conclusion générale qui résumera l'intérêt de notre étude.

CHAPITRE 1

GÉNÉRALITÉ SUR LE SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE

1.1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est la plus jeune des énergies renouvelables, elle a l'avantage d'être non polluante, souple et fiable. Elle désigne la transformation d'une source d'énergie lumineuse en électricité et son utilisation. Ce chapitre décrit le fonctionnement de l'énergie solaire photovoltaïque et donne les bases théoriques des différents éléments d'un système photovoltaïque et les types d'installations des systèmes photovoltaïques. On trouvera donc dans ce chapitre des définitions, des principes et des équations sur les cellules, les modules et les générateurs PV.

1.2 L'énergie Solaire

La distance de la terre au soleil est environ 150 million de kilomètres et la vitesse de la lumière est d'un peu plus de 300000 km/h [1], les rayons du soleil mettent donc environ 8minutes à nous parvenir. La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au soleil. Sa valeur est communément prise égale à 1360W/m². Au niveau du sol, la densité d'énergie solaire est réduite à 1000 W/ m² à cause de l'absorption dans l'atmosphère. Albert Einstein a découvert en travaillant sur l'effet photoélectrique que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie est portée par des particules, les photons. L'énergie d'un photon étant donnée par la relation :

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (1.1)$$

h : la constante de Planck, C : la vitesse de la lumière. Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande. Une façon commode d'exprimer cette énergie est :

$$E = \frac{1.26}{\lambda} \quad (1.2)$$

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10 microns (μm). L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

- 6 % dans la bande des ultraviolets ($<0,4\mu\text{m}$).
- 74 % dans la bande visible ($0,4$ à $0,8 \mu\text{m}$).
- 77 % dans la bande des infrarouges ($>0,8\mu\text{m}$).

1.2.1 Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est la matière première de l'énergie solaire. c'est une propagation d'une onde de longueur qui varie entre 0.2et 4.10-6m .sans la nécessite d'un support physique pour se déplacer, il arrive au sol après la perte d'une grande partie de son intensité, à cause d'une partie de l'ultraviolet, qui s'absorbent :

- **Le rayonnement direct** est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs. Il peut être mesuré par un pyréliomètre.

- **Le rayonnement diffus** est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). la diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. dans le ciel, ce sont à la fois les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuages) et les poussières qui produisent cet(éclatement) des rayons du soleil. Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques.

- **Le rayonnement solaire réfléchi** ou l'albédo du sol est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).

- **Le rayonnement global** :est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyranomètre ou un solarimètre sans écran. Les stations météorologiques généralement mesurer le rayonnement global horizontal par un Pyranomètre placé horizontalement à l'endroit requis

[2]

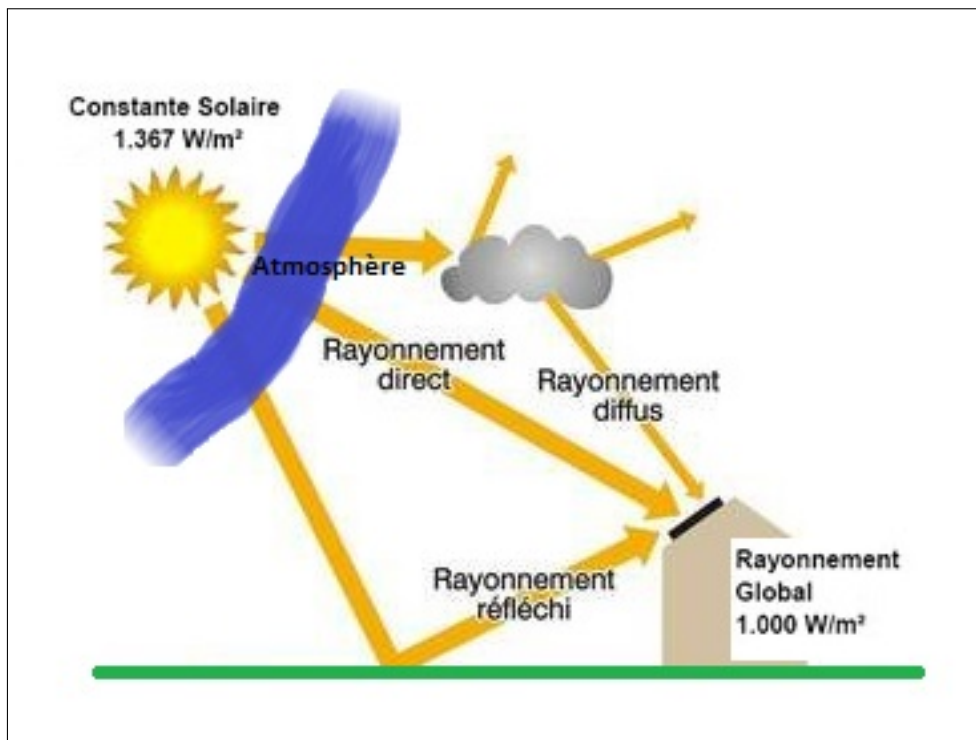


FIGURE 1.1 – Composante du rayonnement global sur un plan horizontal.

1.2.2 Spectre du rayonnement

Le rayonnement électromagnétique est composé de «grains» de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde : Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à 5800° K . Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom de AM0. Sa distribution en énergie est répartie en [3]

Ultraviolet UV $0.20 < \lambda < 0.38 \text{ mm}$ 6.4%

Visible $0.38 < \lambda < 0.78 \text{ mm}$ 48.0

Infrarouge IR $0.78 < \lambda < 10 \text{ mm}$ 45.6%

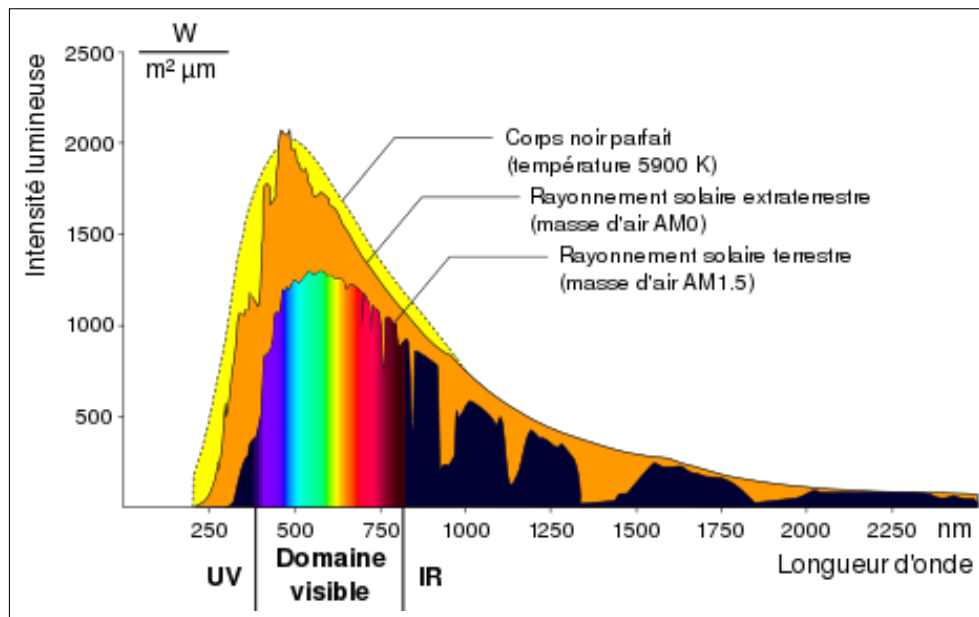


FIGURE 1.2 – spectre solaire hors atmosphère.

1.2.3 Durée d'insolation

La durée d'insolation correspond au nombre d'heures dans la journée, entre le lever et le coucher du soleil, où celui-ci est bien visible. le relevé est fait au moyen de l'héliographe de Campbell-Stokes dans lequel une sphère de cristal concentre les rayons du soleil sur un papier qu'il brûle en se déplaçant. ainsi, seuls les moments où le soleil est bien visible sont enregistrés on parle alors de durée d'insolation réelle ou effective et dépend du fait que le soleil levé soit visible du point d'observation ou caché par les nuages.

Au défaut de l'héliographe, il est possible à partir du calcul du mouvement astronomique relatif du soleil et de la terre d'évaluer la durée théorique du jour ; c'est-à-dire, celle qu'il y aurait si les nuages ne cachaient pas le soleil.

1.3 Description des éléments d'un système photovoltaïque

1.3.1 Constitution de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est assimilable à une diode photosensible. Son fonctionnement est basé sur les propriétés des matériaux semi-conducteurs. Une cellule est constituée de deux couches minces d'un semi-conducteur qui sont dopées différemment, Figure (I.3). Pour la couche N, c'est un apport d'électrons périphériques et pour la couche P c'est un déficit d'électrons, les deux couches présentent ainsi une différence de potentiel.

L'énergie des photons lumineux captés par les électrons périphériques (couche N) leur permet de franchir la barrière de potentiel et d'engendrer un courant électrique continu. Pour effectuer la collecte de ce courant, des électrodes sont déposées par sérigraphie sur les deux couches du semi-conducteur. L'électrode supérieure est une grille permettant le passage des rayons lumineux. Une couche anti reflet est ensuite déposée sur cette électrode afin d'accroître la quantité de lumière absorbée [4].

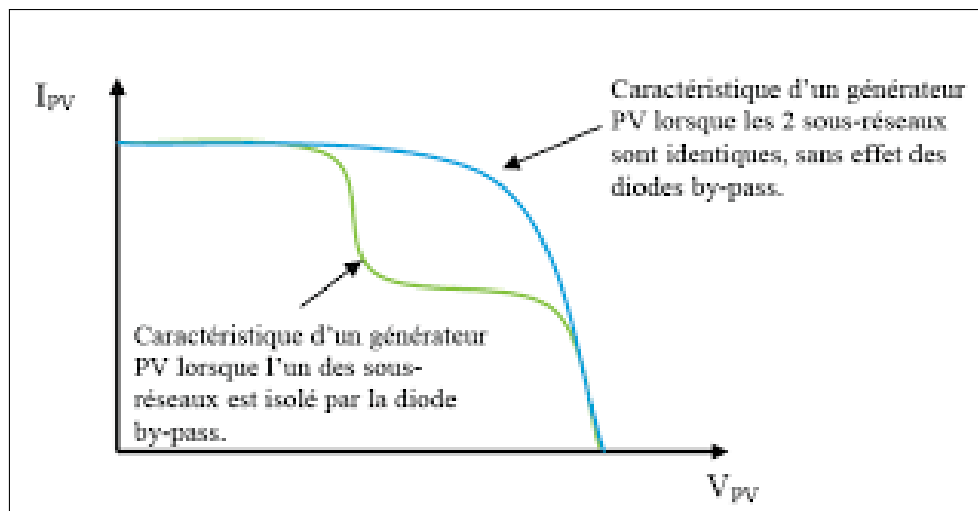


FIGURE 1.3 – Schéma d'une cellule élémentaire.

1.3.2 L'effet photovoltaïque

Le terme « photovoltaïque » vient du Grec et qui signifie Lumière, il est composé de deux parties : « photos » (lumière) et du nom de famille du physicien italien (Alessandro Volta) qui inventa la pile électrique en 1800 et donna son nom à l'unité de mesure de la tension électrique, le volt.

Lorsqu'un matériau semi-conducteur est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont "bombardés" par les photons constituant la lumière ; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être "arrachés" : Si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique.

Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons "arrachés" créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque [5]

L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique au moyen de cellules généralement à base de silicium. Pour obtenir une puissance suffisante, les cellules sont reliées entre elles et constituent le module solaire.

L'effet photovoltaïque, c'est-à-dire la production d'électricité directement de la lumière, fut observée la première fois, en 1839, par le physicien français Edmond Becquerel. Toutefois, ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs des laboratoires Bell, aux Etats-Unis, parvinrent à fabriquer la première cellule photovoltaïque, l'élément primaire d'un système photovoltaïque [5].

1.4 Conversion du rayonnement solaire par effet photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque ». Cet effet peut être expliqué par le fait qu'un photon reçu du rayonnement solaire, heurte une cellule PV, son énergie peut être transférée à un électron dans le matériau semi-conducteur de la cellule. Avec cette énergie supplémentaire, l'électron peut alors s'échapper de sa position normale dans l'atome (de la bande de valence à la bande de conduction traversant la bande interdite), créant ainsi un trou qui deviendra une partie d'un courant dans un circuit électrique.

C'est ce qu'on appelle la paire électron-trou [6], comme la montre la figure ci-dessous

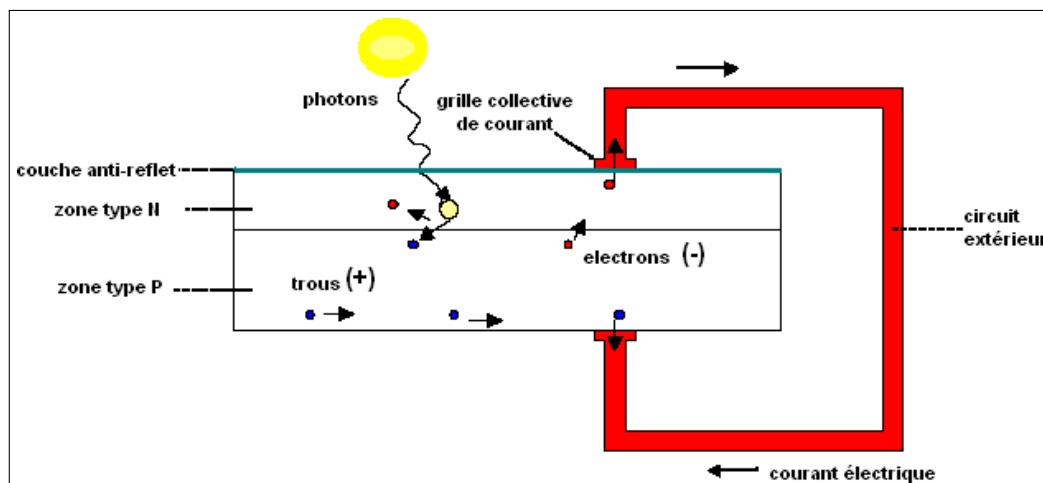


FIGURE 1.4 – Principe de l'effet photovoltaïque.

La structure la plus simple d'une cellule PV, comporte une jonction entre deux matériaux semi-conducteurs dopés de sorte que l'une conduise les charges négatives et l'autre, les charges

positives. Le but de la structure photovoltaïque, c'est de créer un champ électrique interne permanent, il se crée donc une différence de potentiel entre les deux couches de la cellule. En conséquence, un courant électrique peut être établi en connectant les bornes de la jonction à un circuit extérieur [6].

1.5 Technologies des cellules photovoltaïques

On distingue trois générations des cellules photovoltaïques en fonction des développements technologiques [6],[7].

1.5.1 Technologies de la 1ère génération à base de Silicium Cristallin

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 de silicium est très énergivore et donc très chère. Elle nécessite par ailleurs un silicium d'une grande pureté. On différencie également les cellules à base de silicium monocristallin et poly cristallin [6].

1.5.2 Technologies de la 2ème génération à base de couche-mince

Plus récemment sont apparues les technologies de couches minces, plus fines et dont la part du marché semble promise à une augmentation rapide. Les cellules dites couche mince (Thin-film) constituent ce que certains appellent les cellules de seconde génération car elles font historiquement suite aux cellules en silicium cristallin relativement épaisses. On distingue plusieurs types de cellules couche minces à savoir :

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

1.5.3 Technologies de la 3ème génération «les cellules organiques»

Elles sont constituées de molécules organiques combinant flexibilité et légèreté. Il y a trois types de ces cellules : les moléculaires, celles en polymères et les organiques hybrides. Ces technologies sont encore au stade de la recherche et développement [6].

1.6 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

La figure (I.4) présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque sous éclairement. Il correspond à un générateur de courant I_{ph} monté en parallèle avec une diode. Deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma. Ces résistances ont une certaine influence sur la caractéristique $I = f(V)$ de la cellule :

- La résistance série (R_{ser}) est la résistance interne de la cellule; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles .
- La résistance shunt (R_{shu}) est due à un courant de fuite au niveau de la jonction; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée

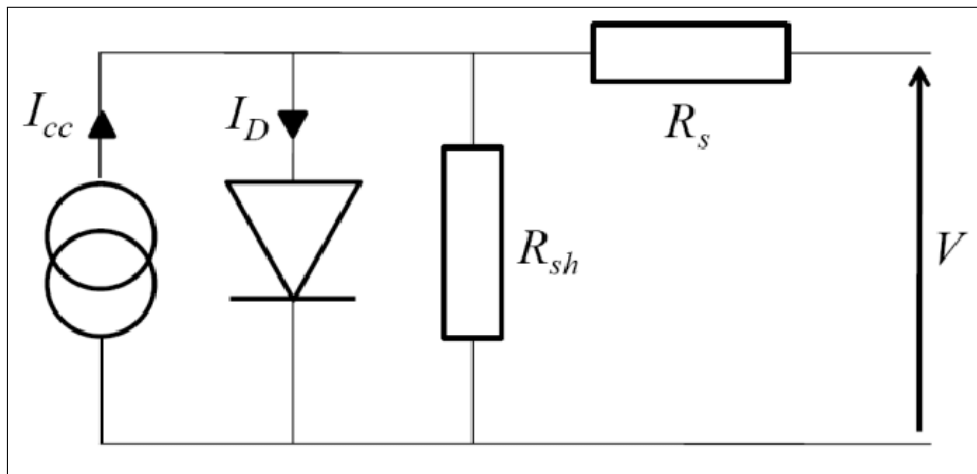


FIGURE 1.5 – Schéma équivalent électrique de la cellule PV.

Le modèle mathématique pour la caractéristique courant-tension d'une cellule PV est donné par :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp\left(\frac{e(V_{pv} + (I_{pv} * R_{ser}))}{nKT}\right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + (I_{pv} * R_{ser})}{R_{shu}} \quad (1.3)$$

Où I_{sat} est le courant de saturation, K est la constante de Boltzmann ($1,381 \cdot 10^{-23}$ J/K), T est la température effective des cellules en Kelvin(K), e est la charge de l'électron ($e=1,6 \cdot 10^{-19}$ C), n est le facteur d'idéalité de la jonction ($1 < n < 3$), I_{pv} est le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur, V_{pv} est la tension aux bornes de cette même cellule, I_{ph} est le photo-courant de la cellule dépendant de l'éclairage et de la température ou bien courant de (court circuit), R_{shu} est la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction, R_{ser} est la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions [5].

1.6.1 Paramètres d'une cellule photovoltaïque

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique.

Les plus usuels sont les suivantes :[5].

A/ 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_{ser} nulle et R_{shu} infinie), ce courant se confond avec le photocourant I_{ph} dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (1.3), on obtient :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp\left(\frac{e(I_{cc} * R_{ser})}{nKT}\right) - 1 \right] - \frac{(I_{cc} * R_{ser})}{R_{shu}} \quad (1.4)$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme

$$I_{sat} \left[\exp\left(\frac{e(V_{pv} + (I_{pv} * R_{ser}))}{nKT}\right) - 1 \right] \quad (1.5)$$

devant . L'expression approchée du courant de courtcircuit est alors :

$$I_{cc} = \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_{ser}}{R_{shu}}\right)} \quad (1.6)$$

Quantitativement, il a la plus grande valeur du courant généré par la cellule (pratiquement $I_{cc}=I_{ph}$)[5].

B/ Tension de circuit-ouvert (V_{co})

C'est la tension V_{co} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).

$$0 = I_{cc} - I_{sat} \left[\exp\left(\frac{eV_{pv}}{nKT}\right) - 1 \right] - \frac{V_{pv}}{R_{shu}} \quad (1.7)$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieur à : [5]

$$V_{co} = V_T \ln \left[\frac{I_{ph}}{I_{sat}} + 1 \right] \quad (1.8)$$

C/ Rendement énergétique C'est le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule $P_{max}(I_{opt}, V_{opt})$ et la puissance solaire incidente. Il est donné par :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{opt} V_{opt}}{P_{inc}} \quad (1.9)$$

Avec P_{inc} est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles. Ce paramètre reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique [5].

1.7 La protection des modules solaires

Pour garantir une durée de vie importante d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique sur des années, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules commerciaux afin d'éviter des pannes destructrices liées à l'association de cellules en série et de panneaux en parallèles. Pour cela, deux types de protections classiques sont utilisés dans les installations actuelles figure (I.6) : [8].

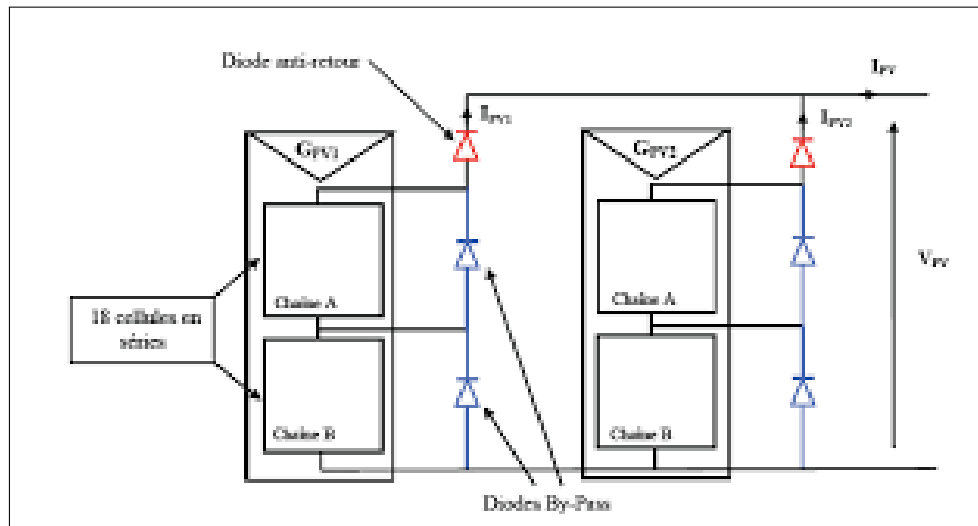


FIGURE 1.6 – Exemples d'association sécurisée de deux modules PV commerciaux en parallèles avec leurs diodes de protections.

- la diode anti-retour empêchant un courant négatif dans les GPV. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit.
- les diodes by-pass peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène évitant ainsi l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées. La mise en conduction de ces diodes affecte la caractéristique de sortie du générateur, comme illustré sur la figure (I.7) [9], par la perte d'une partie de la production d'énergie et par la présence de deux maximums de puissance.

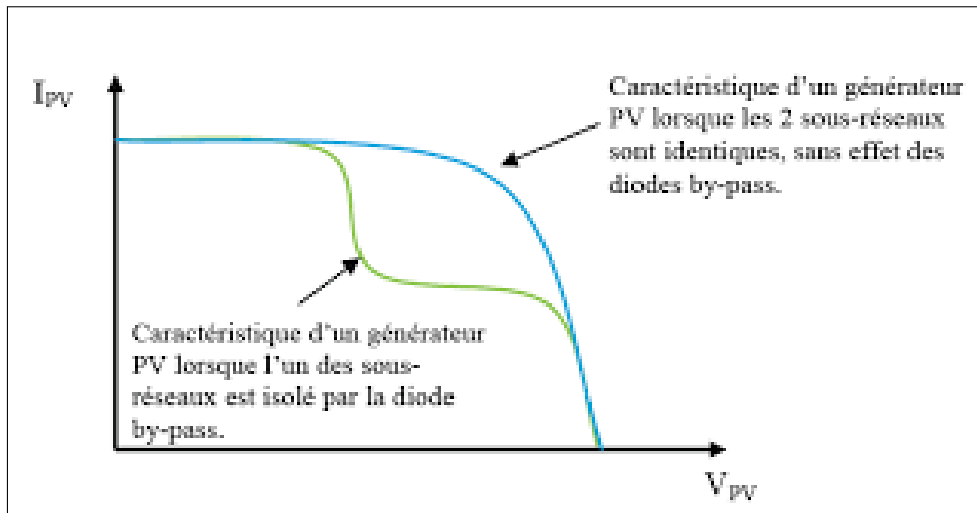


FIGURE 1.7 – Effet de la diode by-pass sur la caractéristique $I(V)$ d'un générateur photovoltaïque.

1.8 Simulation de générateur photovoltaïque

Dans ce simulation nous utilisons MATLAB/SIMULINK, pour simuler un GPV de 50 W.

La puissance générée par cette GPV est affecté par l'éclairement et la température, pour changer l'éclairement nous utilisons une source et nous changeons la température dans les paramètres de la diode. Nous avons acquis les caractéristiques $I=f(v)$ et $P=f(v)$

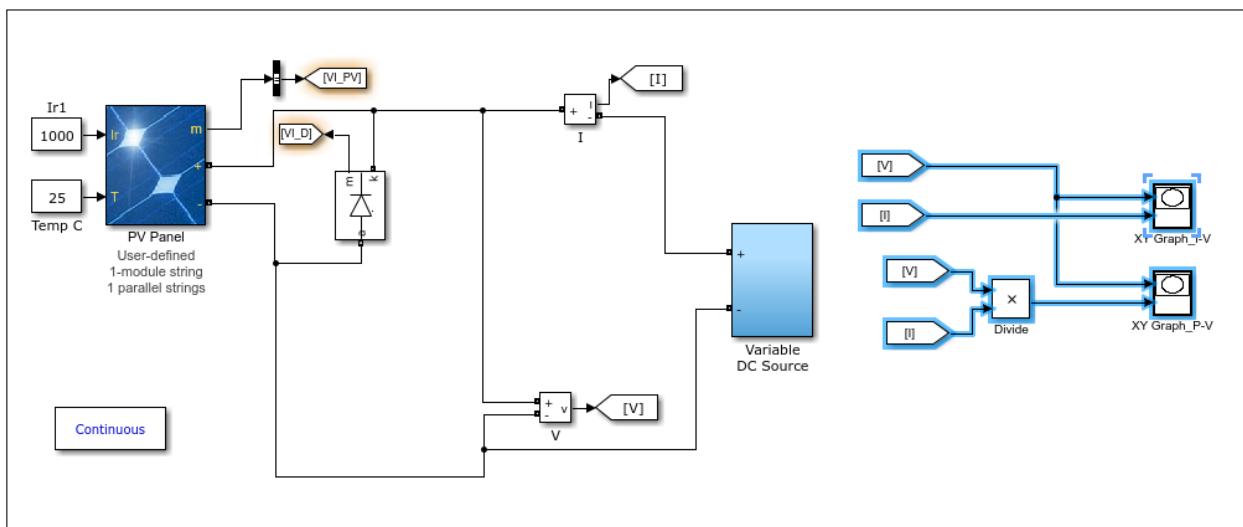


FIGURE 1.8 – Schéma Matlab/Simulink de générateur PV.

1.8.1 Plaque signalétique d'un générateur photovoltaïque de 50 W

Puissance Maximum (Pmax)	50 W
Courant Max (Imax)	2.78 A
Tension Max (Vmax)	17.98 V
Courent Court Circuit (Icc)	3.04 A
Tension Circut Overt (Voc)	21.87 V
Eclairmetn Standard, G	1000 W/m ²
Temperateur Standard, T	25°C

TABLE 1.1 – Plaque signalétique d'un générateur photovoltaïque de 50 W

1.8.2 l'influentes de température

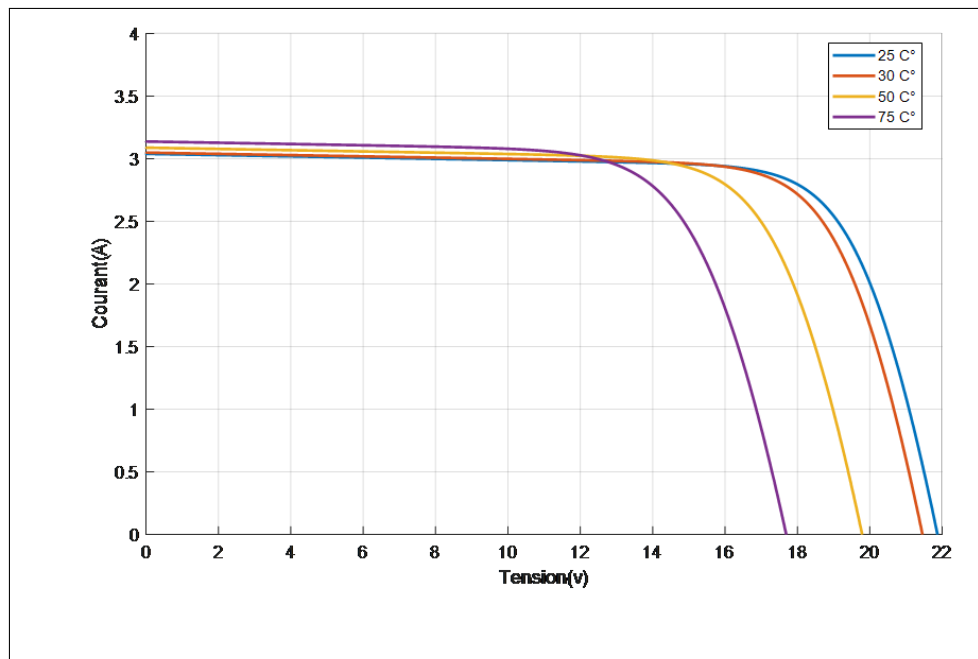


FIGURE 1.9 – Caractéristique courant-tension d'une module PV.

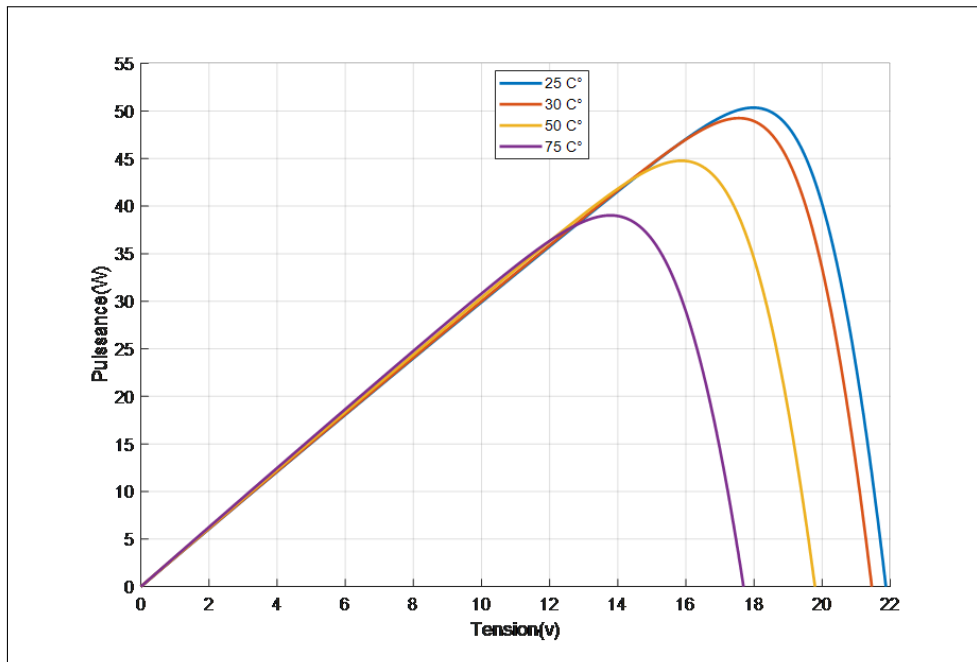


FIGURE 1.10 – Caractéristique puissance-tension d'une module PV.

1.8.3 Influence de l'éclairement

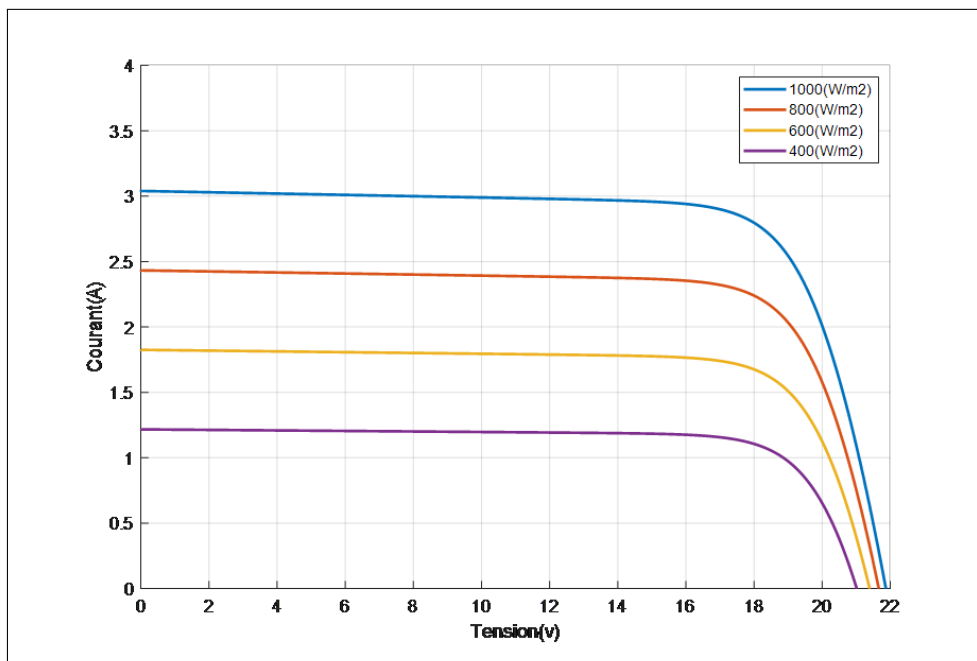


FIGURE 1.11 – Caractéristique courant-tension d'une module PV .

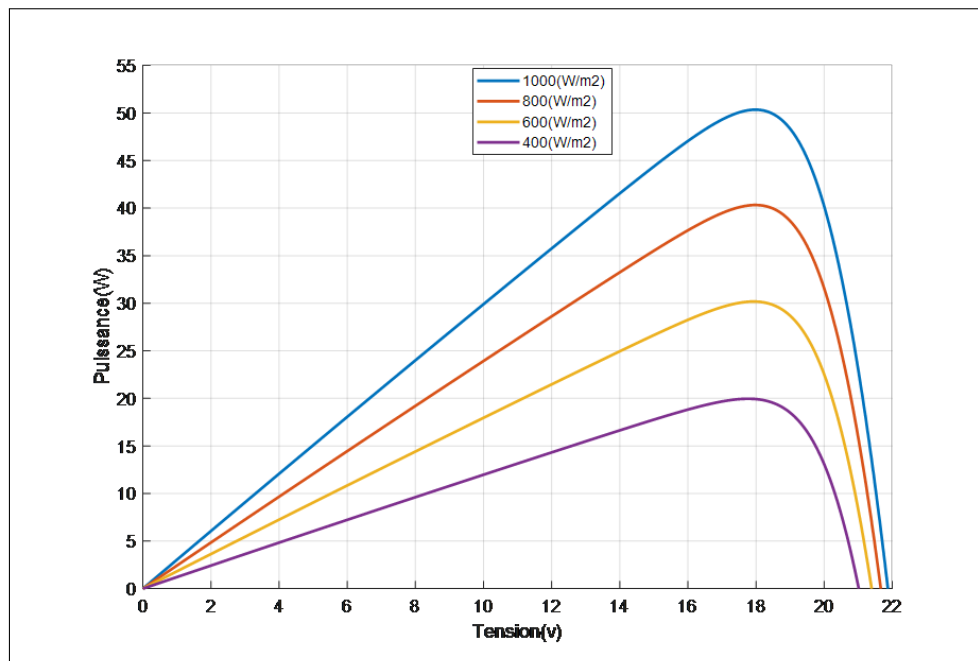


FIGURE 1.12 – Caractéristique puissance-tension d'un module PV.

1.9 Applications des systèmes photovoltaïques

Les principales applications des systèmes photovoltaïques sont énumérées ci-après.

1.9.1 Systèmes autonomes

Une installation photovoltaïque autonome est une installation qui fonctionne indépendamment du réseau électrique ou toutes autres sources d'énergies. Dans la majorité des cas, ce système est utilisé dans les sites isolés. Une telle installation doit être capable de fournir de l'énergie, y compris lorsqu'il n'y a pas de soleil (la nuit ou en cas de mauvais temps). Il faut donc qu'une partie de la production journalière des modules photovoltaïques soit stockée dans des batteries [7]. Cette installation se compose d'un ou plusieurs modules photovoltaïques, d'un régulateur de charge, d'une ou plusieurs batteries et éventuellement d'un onduleur.

1.9.2 Systèmes hybrides

Les systèmes hybrides consistent en l'association de deux ou plusieurs technologies complémentaires de manière à accroître la fourniture d'énergie. Les sources d'énergie comme le soleil et le vent ne délivrent pas une puissance constante, et leur combinaison peut permettre de parvenir à une production électrique plus continue dans le temps. Les systèmes hybrides

fonctionnent tels que, les batteries sont chargées par les panneaux solaires (le jour) et par le générateur éolien (lorsqu'il y'a du vent)[10].

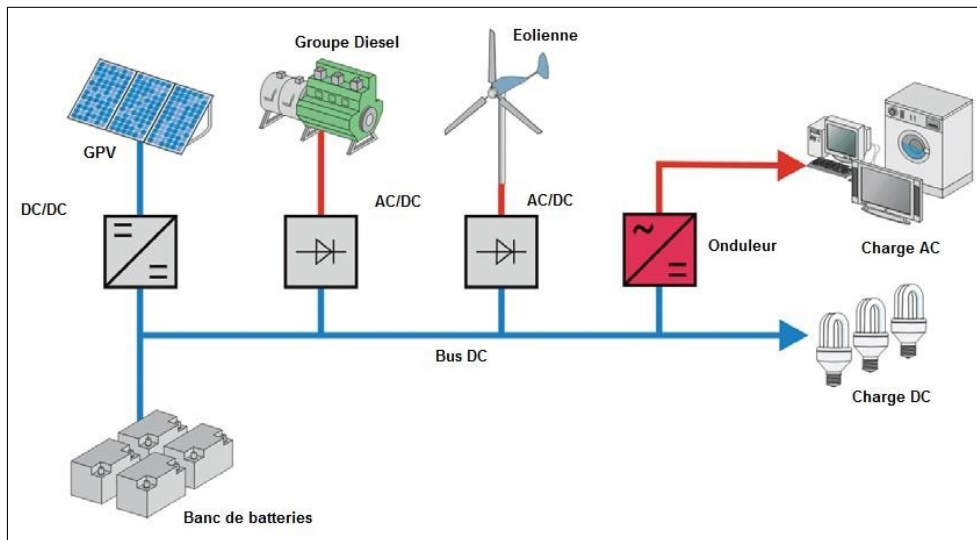


FIGURE 1.13 – Système hybride.

1.9.3 Systèmes couplés au réseau

Les installations raccordées au réseau électrique (ou reliées à une centrale de distribution) constituent généralement une solution optimale pour la production de l'électricité solaire, tant en termes d'énergie que de coûts [11]. Ces installations se composent de modules photovoltaïques interconnectés, d'un (ou plusieurs) onduleur(s) raccordée au réseau électrique. L'onduleur convertit le courant continu généré par les modules photovoltaïques et produit un courant alternatif conforme au réseau électrique. La figure (1.16) illustre le principe d'un système photovoltaïque connecté au réseau.

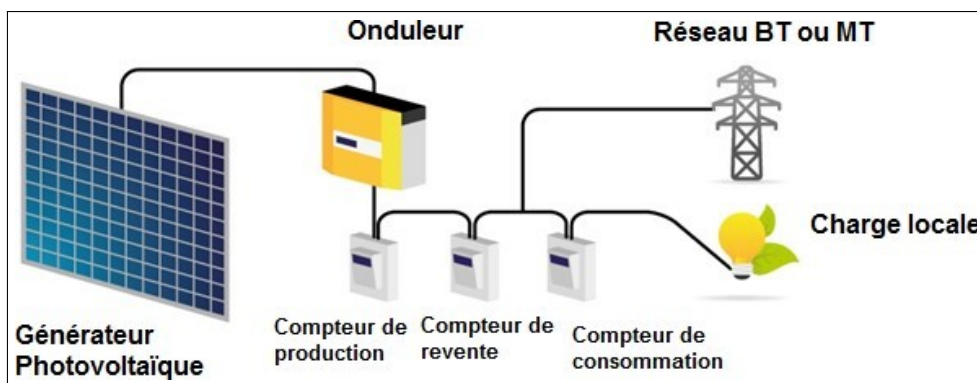


FIGURE 1.14 – Système PV couplés aux réseaux.

1.9.4 Systèmes fonctionnant au fil du soleil (Pompage photovoltaïque)

Dans les régions éloignées, désertiques ou montagneuses, l'alimentation en eau potable et d'irrigation reste toujours le souci quotidien des populations. Le pompage d'eau à l'aide de l'énergie solaire photovoltaïque est une solution bien adaptée pour ces régions. En effet, la majorité de ces régions sont très ensoleillées et cette énergie a l'avantage d'être présente et propre contrairement à l'énergie conventionnelle qui présente les contraintes de l'éloignement du réseau électrique et les contraintes du transport du combustible et les entretiens périodiques pour les moteurs diesels. Généralement, les systèmes de pompage photovoltaïque sont constitués d'un générateur photovoltaïque, un convertisseur du courant électrique qui peut être un convertisseur DC/AC pour un moteur à courant alternatif ou un convertisseur DC/DC pour un moteur à courant continu et d'un groupe motopompe [12]. Ces systèmes fonctionnent au fil du soleil sans stockage électrochimique. L'eau ainsi pompée peut être utilisée directement ou stockée dans un réservoir pour des utilisations ultérieures. Ce type de stockage de l'eau est la solution la plus adoptée par rapport au stockage électrochimique dans des batteries. Le générateur photovoltaïque est responsable de la conversion instantanée de l'énergie solaire en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque. Le générateur photovoltaïque est constitué de plusieurs modules photovoltaïques reliés en série et en parallèle selon la puissance requise. La figure 1.17 présente les différents éléments constitutifs d'une installation solaire de pompage d'eau.

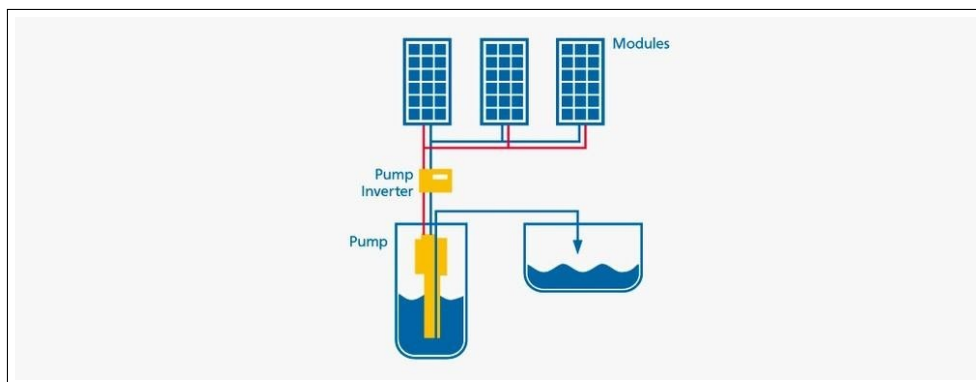


FIGURE 1.15 – Les éléments d'une installation de pompage photovoltaïque.

1.10 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

1.10.1 Cas d'une cellule idéale

Dans le cas idéal, la cellule d'une jonction PN soumise à l'éclairement photovoltaïque connecté à une charge peut être schématisée par un générateur de courant I_{ph} en parallèle avec une diode délivrant un courant selon la figure (1.8), qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire e idéale [4].

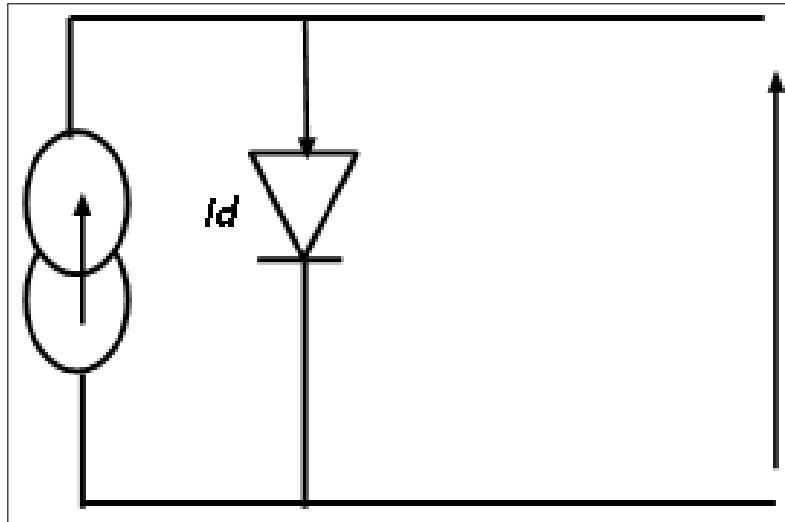


FIGURE 1.16 – Schéma équivalent d'une cellule idéale.

- Les équations retenues de ce modèle sont :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (1.10)$$

- Le courant I_{ph} est assimilé au courant I_{sc} avec $V_{pv}=0$, courant de court-circuit obtenu en court ci cuitant la charge.

$$I_{ph} = I_{sc} = \frac{E}{E_{ref}} \quad (1.11)$$

E : L'éclairement absorbé par la cellule

E_{ref} : L'éclairement de référence (1000 w/m²)

$$I_d = I_0(e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1) \quad (1.12)$$

I_0 : Courant de saturation inverse de la diode

$$I_t = \frac{NKT}{q} \quad (1.13)$$

V_t : Tension thermique N : Facteur d'idéalité de la photopile K : Constant de Boltzmann ($1,38.10^{-23}J/K$) q : Charge de l'électron ($1,6.10^{-19}C$) [4].

1.10.2 Cas d'une cellule réelle

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte d'effets résistifs parasites dues à la fabrication et représenté sur la figure (1.9). Ce schéma équivalent est constitué d'une diode (d) caractérisant la jonction, une source de courant (I_{ph}) caractérisant le photocourant, une résistance série (R_{ser}) représentant les pertes par effet Joule, et une résistance shunte (R_{shu}) caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière qui est généralement très supérieure à (R_{ser}) [4].

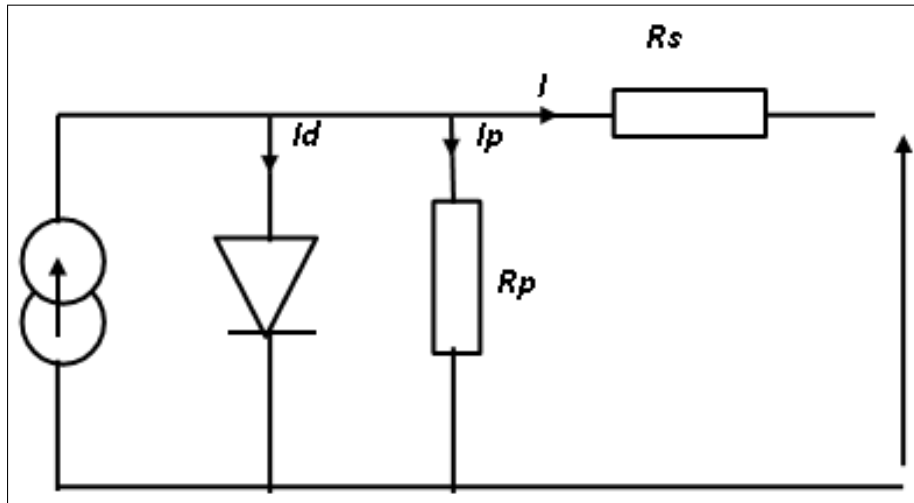


FIGURE 1.17 – Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.

Dans notre travail, nous avons utilisé le modèle mathématique du module solaire à exponentiel simple.

- Le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque se met sous la forme mathématique suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_p \quad (1.14)$$

I_{pv} : Courant généré par la cellule photovoltaïque I_{ph} : Photocourant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident) I_d : Le courant circulant dans la diode.

$$I_d = I_0(e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1) \quad (1.15)$$

$$I_0 = I_{0r} \left(\frac{T}{T_n} \right)^3 e^{\left[\frac{E_g}{BK} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right]} - 1 \quad (1.16)$$

: est le courant de court-circuit de la cellule à la température de référence T_n et l'éclairement de référence

T : Température de la jonction des cellules PV [°K]

T_n : Température de référence des cellules PV [°K]

B : facteur d'idéalité de la jonction

E_g : Énergie de gap [ev]

R_s : résistance série symbolise la résistance de masse du matériau semi-conducteur, ainsi les résistances ohmiques et de contact au niveau des connexions des cellules

V_{pv} : La tension de sortie

I_p : Le courant circulant dans la résistance R_p

R_p : Résistance shunt représente les fuites autour de la jonction p-n dues aux impuretés et sur les coins de cellule.

Les résistances R_s et R_p sont calculées par une boucle de programmation.

En substituant les équations (1.16; 1.17) dans l'équation (1.15) le courant IPV devient
Donc :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\left(\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{V_t} \right)} - 1 \right] - \frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{R_p} \quad (1.17)$$

1.11 Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques

1.11.1 Avantages

[7][13]

1-Le soleil est une source d'énergie propre et renouvelable, qui ne produit ni le gaz ni le déchet toxique par son utilisation.

2- Le processus photovoltaïque est complètement à semi-conducteurs et d'un seul bloc.

Il n'y a aucune pièce mobile et aucun matériau n'est consommé ou émis.

3- Les systèmes photovoltaïques ont les avantages suivants par rapport aux options de concurrence de puissance :

- ils ne font pas de pollution, sans émissions ou odeurs discernables .

- ils peuvent être des systèmes autonomes qui actionnent sûrement sans surveillance pendant de longues périodes.
- ils ne consomment aucun carburant, leur carburant est abondant et libre.
- ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité de système.
- ils n'exigent aucun raccordement à une source d'énergie ou à un approvisionnement en carburant existant.

1.11.2 Inconvénients

[7], [13]

- **prix** : les cellules solaires sont encore lointaines pour produire une fraction significative de l'énergie du monde requise en raison de la charge de placement initiale. rayonnement du soleil : l'intensité d'irradiante du rayonnement du soleil en un jour, toujours, change et flotte.
- le rendement réel d'un module photovoltaïque est de l'ordre de 10 à 15 %.
- ils sont tributaires des conditions météorologiques.
- l'énergie issue du générateur photovoltaïque est continue et de faible voltage (< à 30V) donc il doit être transformé par l'intermédiaire d'un onduleur.
- beaucoup des appareils vendus sur le marché fonctionnent avec du 230 V alternatif.

1.12 Conclusion

Dans ce chapitre, On a étudié le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule photovoltaïque et module photovoltaïque et Influence de température et l'éclairement sur les caractéristiques (I-V), (P-V) dans la simulation de générateur photovoltaïque. On a constaté que la tension à vide d'un module photovoltaïque diminue avec l'augmentation de la température du module PV, et l'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale. Ainsi que le courant de court circuit d'un module photovoltaïque augmente régulièrement selon de l'ensoleillement, et l'augmentation de l'éclairage se traduit aussi par une augmentation de la puissance maximale.

CHAPITRE 2

LES CONVERTISSEURS STATIQUE DC-DC

2.1 Introduction

Le présent chapitre traite de la conversion DC/DC, qui a pour but d'assurer la fluence d'énergie entre une source de tension continue et une source de courant continu.

Pour ce type de convertisseur statique, la gamme de puissance que l'on peut « traiter » s'étend de quelques watts, à une trentaine de kilowatts environ. Cependant, l'apparition de composants de puissance sans cesse plus performants, tout comme la définition de nouvelles structures (multi niveau en particulier), permettent d'envisager le traitement de puissances plus élevées. Nous distinguons deux types de convertisseurs continus/continus :

✓ les convertisseurs appelés ((hacheurs)), qu'ils soient abaisseurs, éleveurs ou bien dévolteurs (survolteurs), qui correspondent aux applications moyennes et fortespuissances.

✓ les alimentations à découpages, qui correspondent aux applications petites puissances de la conversion DC/DC [14]

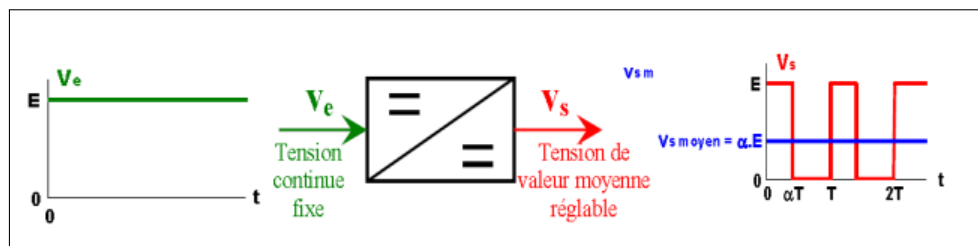


FIGURE 2.1 – Principe de base d'un hacheur.

2.2 Etude des convertisseurs DC-DC

Il existe une variété de convertisseurs DC-DC possibles, mais dans la liste des convertisseurs, seuls les trois premiers convertisseurs doivent être décrits, qui sont essentiellement des bornes de sortie d'entrée non isolées.

2.2.1 Convertisseur DC/DC (hacheur)

Les dispositifs électroniques de technologie nouvelle doivent satisfaire certains critères tels que la haute qualité, la fiabilité, la dimension, le poids et le coût réduit[15]. Les régulateurs de puissance linéaire, dont le principe de fonctionnement est basé sur un diviseur de courant ou de tension, peuvent fournir une tension de sortie de très haute qualité[16][17]. Cependant, ce

type de régulateurs restent inefficaces du fait que leur domaine principal d'application est à des niveaux de puissance faibles[18].

Les régulateurs de commutation appelés convertisseurs DC/DC utilisent des interrupteurs électroniques, à base de semi-conducteurs tels que : le thyristor, transistor de puissance ou l'IGBT...etc, parce qu'ils engendrent une faible perte de puissance lors de basculement d'un état à un autre [19]. Ces convertisseurs assurent des rendements élevés de conversion d'énergie et ils peuvent fonctionner à des fréquences élevées. Les caractéristiques dynamiques des convertisseurs DC/DC s'améliorent avec l'augmentation des fréquences de fonctionnement.

Les fréquences de fonctionnement élevées permettent donc de parvenir à une réponse dynamique plus rapide aux changements rapides dans le courant de charge ou de la tension d'entrée[18].

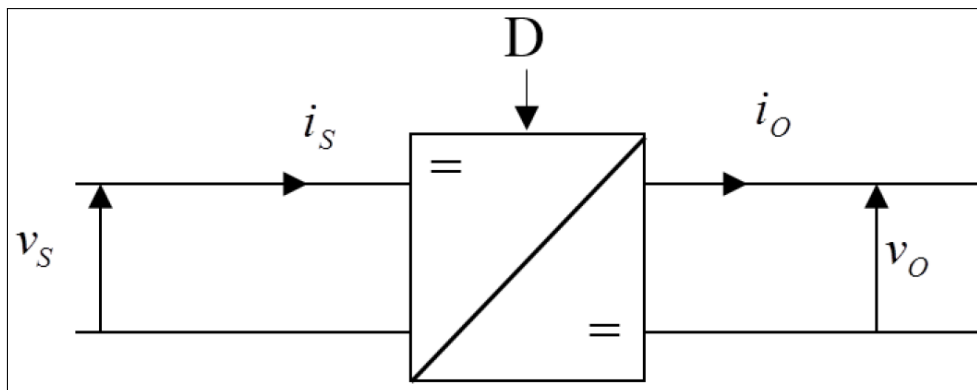


FIGURE 2.2 – Symbole d'un hacheur DC/DC..

2.2.2 Type des hacheurs

Les hacheurs sont des convertisseurs continu/continu qui ont pour but de contrôler le transfert et l'écoulement de l'énergie entre les panneaux solaires et la charge. Ils permettent 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). Ils sont souvent utilisés comme une interface d'adaptation qui assure la poursuite du point de puissance maximale selon des stratégies de contrôle spécifiques.

Les panneaux solaires et la charge peuvent être soit de nature capacitive (source de tension), soit de nature inductive (source de courant). La charge peut être de nature résistive aussi. Les convertisseurs DC-DC sont classés en deux types : les convertisseurs non isolés et les convertisseurs isolés de la source [20].

2.2.3 Applications des convertisseurs DC-DC

1. Les convertisseurs CC peuvent être utilisés dans le freinage régénératif des moteurs DC pour renvoyer l'énergie dans l'alimentation et cette caractéristique se traduit par des économies d'énergie pour le système de transport avec des arrêts fréquents. Comme par exemple :

- a) Commande de moteur de traction dans les automobiles électriques
- b) Chariots roulants
- c) Palans marins
- d) Chariots élévateurs
- e) Transporteurs de mines

2. Également utilisés dans les régulateurs de tension CC et sont également utilisés en conjonction avec un inducteur pour générer une source de courant CC, en particulier pour l'onduleur de source de courant.

2.2.4 Considération de commutation des convertisseurs DC-DC

Le commutateur de convertisseur peut être implémenté en utilisant a) Transistor de jonction bipolaire de puissance (BJT) b) Transistor à effet de champ semi-conducteur à oxyde métallique de puissance (MOSFET) c) Thyristor d'arrêt de porte (GTO) d) Transistor bipolaire à grille isolée (IGBT) Les appareils pratiques ont une chute de tension finie allant de 0,5V à 2V mais lors des calculs par souci de simplicité de compréhension, ces interrupteurs sont considérés comme sans perte.

2.3 Rôle des convertisseurs DC-DC

Pour la conversion de puissance, il est essentiel que le rendement soit maintenu élevé pour éviter la dissipation de la puissance et pour éviter les échauffements excessifs dans les composants électroniques. Pour cette raison toute la conversion de puissance échangée doit être réalisée autour des composants de stockage d'énergie (inductance et condensateurs) et les commutateurs. Les commutateurs de puissance utilisés dépendent du niveau de la puissance à convertir ou à commander. Les MOSFETS (transistors à effet de champ d'oxyde de métal) sont habituellement utilisés à la puissance relativement basse (quelques kW) et les IGBTs (transistors bipolaires à gâchette isolée) à des puissances plus élevées. Les thyristors ont été généralement utilisés et acceptés dans les plus hauts niveaux de puissance [21].

2.4 Convertisseur Buck

Le convertisseur DC/DC dévolteur (hacheur série) appelé (Buck), sert à convertir une tension d'entrée à une tension de sortie inférieure.. (Figure 2.3)

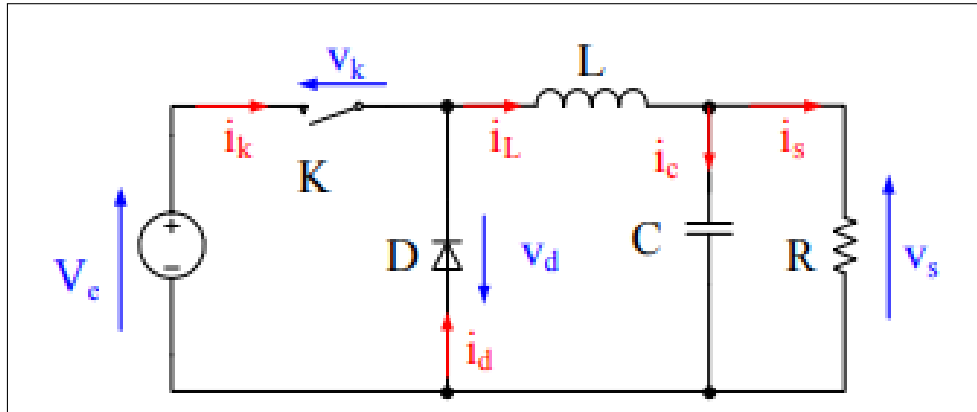


FIGURE 2.3 – Schéma électrique de l'hacheur Buck.

2.5 Convertisseur Boost

Le convertisseur DC/DC survolteur (hacheur parallèle) appelé (Boost), sert à convertir une tension d'entrée à une tension de sortie supérieure[22]. (Figure 2.4)

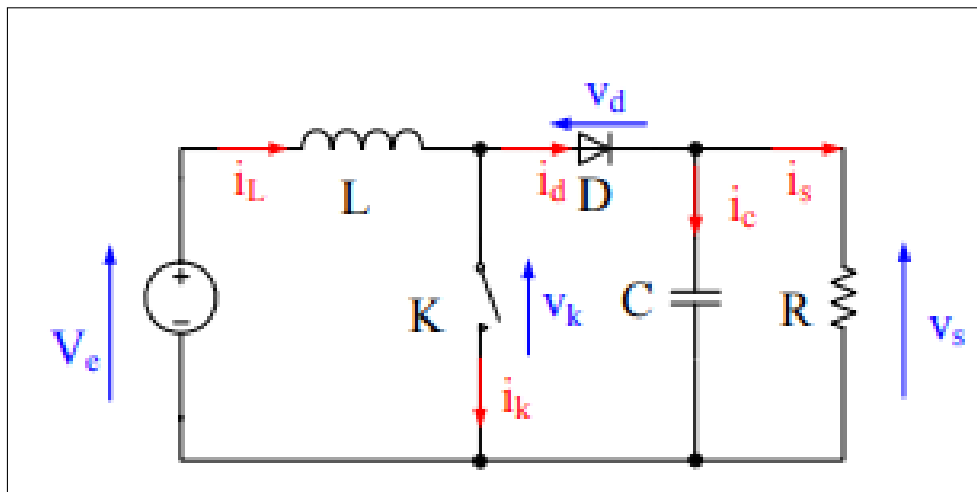


FIGURE 2.4 – Schéma électrique de l'hacheur Boost.

2.6 Convertisseur Buck-Boost :

Le convertisseur DC/DC dévolteur-survolteur (Buck-Boost), rassemble les propriétés des deux convertisseurs précédents, il sert à convertir la tension d'entrée à une tension de sortie inférieure ou supérieure selon le besoin[22]. (Figure 2.5)

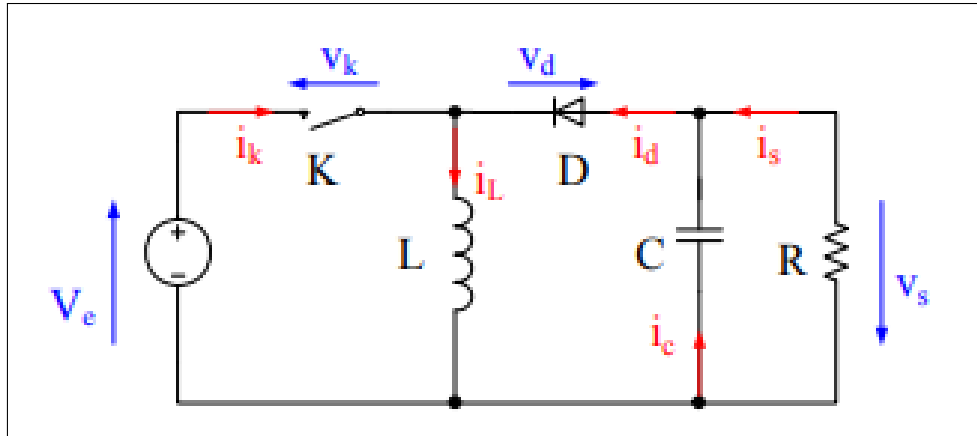


FIGURE 2.5 – Schéma électrique de l'hacheur Buck-Boost.

2.7 Convertisseur Cuk

En mode de conduction continue, les formes d'ondes de courant et de tension du convertisseur Cuk sont présentées dans la figure (2.6) [23]

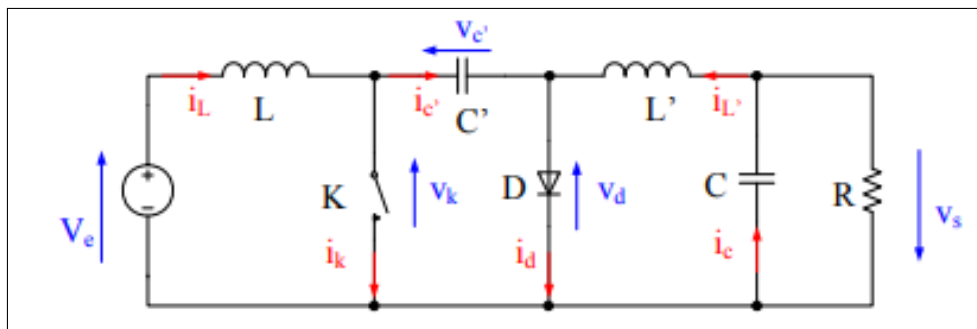


FIGURE 2.6 – Schéma électrique de l'hacheur Cuk.

2.8 Convertisseur Sepic

Le convertisseur Sepic (figure 1-6) présente des caractéristiques similaires à celles du convertisseur Cuk, sauf qu'il n'est plus inverseur de tension [23].

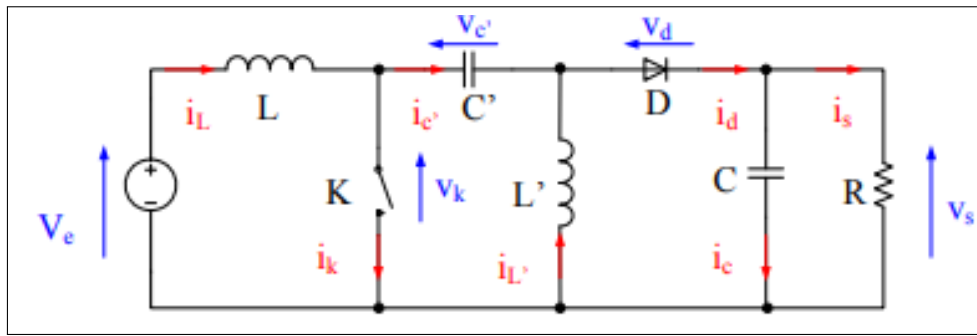


FIGURE 2.7 – Schéma électrique de l'hacheur Sepic.

2.9 Comparaison des montages

Le tableau 1-1 résume les gains en tension et les contraintes sur les interrupteurs des différents montages. Pour ces convertisseurs, l'évolution des gains en tension en fonction du rapport cyclique est présentée sur la figure 1-7. Si plusieurs montages peuvent être considérés comme élévateurs, en particulier si le rapport cyclique est supérieur à 0,5, seul le montage Boost est élévateur sur toute la plage de réglage des rapports cycliques. Pour un rapport cyclique de 0,5 par exemple, le Boost possède une tension de sortie double de la tension d'entrée. Alors que pour les autres montages élévateurs, la tension de sortie est pour cette valeur du rapport cyclique égale à la tension d'entrée. Ce n'est que lorsque le rapport cyclique se rapproche de 1 que les autres montages élévateurs tendent à ressembler au montage Boost.

convertisseurs / paramètres	Gain en Tension $\frac{V_s}{V_e}$	contraintes en Tension $V_{k,max} = V_{d,max} $	contraintes en Courant $i_{k,max} = i_{d,max}$
Boost	$\frac{1}{1-\alpha}$	$\frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_s}{2}$	$\frac{I_s}{1-\alpha} + \frac{\Delta I_L}{2}$
cuk	$\frac{\alpha}{1-\alpha}$	$\frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V'_e}{2}$	$I_L + I'_L + \frac{\Delta I_L + \Delta I'_L}{2}$
sepic	$\frac{\alpha}{1-\alpha}$	$\frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V'_e + \Delta V_s}{2}$	$I_L + I'_L + \frac{\Delta I_L + \Delta I'_L}{2}$
Buck-Boost	$\frac{\alpha}{1-\alpha}$	$\frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_s}{2}$	$\frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_s}{2}$
buck	α	V_e	$I_L + \frac{\Delta I_L}{2}$

TABLE 2.1 – Récapitulatif des caractéristiques des convertisseurs continu-continu.

2.10 Convertisseur utilisé (BUCK-BOOST)

2.10.1 Principe de fonctionnement :

Le fonctionnement d'un convertisseur Buck-Boost peut être divisé en deux configurations suivant l'état de l'interrupteur S :

✓ Dans l'état passant, l'interrupteur S est fermé, conduisant ainsi à une augmentation de l'énergie stockée dans l'inductance.

✓ Dans l'état bloqué, l'interrupteur S est ouvert. L'inductance est reliée à la charge et à la capacité. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité et la charge. Comparé aux convertisseurs Buck et Boost, les principales différences sont :

- La tension de sortie est de polarité inverse de celle d'entrée
- La tension de sortie peut varier de 0 à (pour un convertisseur idéal).

2.10.2 Modélisation du circuit :

$$\Delta I_{L_{on}} = \int_0^{DT} dI_L = \int_0^{DT} \frac{V_s}{L} dt = \frac{V_s DT}{L} \quad (2.1)$$

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_i}{L} \quad (2.2)$$

2.10.3 Représentation d'état :

Dans le cas où le système considéré est linéaire, la représentation d'état se met sous la forme :

$$\begin{cases} \dot{X} = A_3 x + B_3 u \\ Y = C_3 X \end{cases}$$

avec $X = \begin{bmatrix} I_0 \\ V_0 \end{bmatrix}$

Pour étudier le convertisseur abaisseur-élevateur et extraire son modèle mathématique, on analyse le fonctionnement du circuit équivalent pour S ouvert et fermé.

- Pour $T \in [0; DT_s]$, S est fermé

$$\begin{cases} i_{c_1}(t) = C_1 \frac{dV_s(t)}{dt} = i(t) - i_L(t) \\ i_{c_2}(t) = C_2 \frac{dV_O(t)}{dt} = -i_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_s(t) \end{cases}$$

Et

$$\begin{cases} L \frac{di_o}{dt} = DV_o + V_c(1 - D) \\ C \frac{dV_c}{dt} = -i_L(1 - D) - \frac{V_c}{R} \end{cases}$$

$$\begin{cases} L \frac{di_o}{dt} = DV_o \\ C \frac{dV_c}{dt} = -\frac{V_c}{R} \end{cases}$$

- Pour $T \in [DT_s; T_s]$, S est ouvert

$$\begin{cases} i_{c_1}(t) = C_1 \frac{dV_s(t)}{dt} = i(t) \\ i_{c_2}(t) = C_2 \frac{dV_O}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_o(t) \end{cases}$$

Et :

$$\begin{cases} L \frac{di_o}{dt} = V_c \\ C \frac{dV_c}{dt} = -i_L - \frac{V_c}{R} \end{cases}$$

- Donc le système sous forme matricielle devient :

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1-D}{T} \\ \frac{1-D}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{D}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_o$$

A partir des équations, on peut écrire l'équation suivante :

$$(V_s)DT_s = V_o * (1 - D) * T_s \quad (2.3)$$

Le rapport de conversion M(D) s'écrit sous la forme suivante :

$$M(D) = \frac{V_o}{V_s} = \frac{-D}{1 - D} \quad (2.4)$$

Cela donne en retour que :

$$D = \frac{V_o}{V_o - V_i} \quad (2.5)$$

2.10.4 Avantages et inconvénients du convertisseur buck-boost

Les convertisseurs buck-boost offrent une solution plus efficace avec moins de composants externes plus petits. Ils sont capables d'augmenter ou d'abaisser les tensions en utilisant ce nombre minimal de composants tout en offrant un cycle de fonctionnement inférieur et une efficacité supérieure sur une large gamme de tensions d'entrée et de sortie. Les convertisseurs buck-boost sont également beaucoup moins chers que les autres convertisseurs.

Ce ne sont cependant pas des solutions parfaites ; il y a quelques inconvénients. Par exemple, ils ne peuvent pas atteindre un gain élevé car l'efficacité est trop faible pour cela (c'est-à-dire un cycle de service très petit ou très grand uniquement - pas d'entre-deux). Il n'y a pas non plus d'isolation entre l'entrée et la sortie, ce qui la rend inadaptée à certaines applications.

2.11 Conclusion

Ce chapitre a présenté une analyse du fonctionnement du convertisseur Buck-Boost et ses performances ainsi que des directives d'optimisation de sa conception qui vont nous aider pour le montage de notre convertisseur.

Un convertisseur DC-DC est inclus dans le système entre la charge et la source pour obtenir une puissance maximale transfert entre la source et la charge. Le convertisseur Boost est utilisé lorsque l'impédance de charge est inférieure à l'impédance de la source. En modifiant le rapport cyclique du convertisseur pour chaque condition climatique (température et radiation),

CHAPITRE 3

MPPT PROBLÉMATIQUE

3.1 Introduction

Un générateur photovoltaïque peut fonctionner dans une large gamme de tension et de courant de sortes mais il ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières du courant et de la tension. En effet la caractéristique $I(V)$ du générateur dépend de l'éclairement solaire et de la température. ces variations climatiques entraînent la fluctuation du point de puissance maximale. A cause de cette fluctuation, on intercale souvent entre le générateur et le récepteur un ou plusieurs convertisseurs statiques commandés permettant de rattraper a chaque fois le point de puissance maximale. Ces convertisseurs connus sous le nom de MPPT (maximum power point tracking).assurent le couplage entre le générateur PV et le récepteur en forçant le premier à délivrer sa puissance maximale.

3.2 La commande MPPT

Définition

Dans un système photovoltaïque comprenant une source photovoltaïque et une charge, la recherche du point de fonctionnement optimal par des techniques d'optimisation représente une étape importante. Cette technique de commande est souvent nommée dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum » (Maximum Power Point Tracking, MPPT) [24].

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, quelque soient les conditions météorologiques (température et irradiation), et quelle que soit la tension de la batterie, la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum.

3.2.1 Convertisseur pour la poursuite du point de puissance maximum (MPPT)

Pour la maximisation de puissance de la source PV, en intercalant un quadripôle d'adaptation qui est un convertisseur d'énergie DC-DC entre la source PV et la charge et avec le contrôle rigoureux du rapport cyclique de ce dernier, Cette adaptation se réalise en cherchant de façon automatique le PPM du panneau PV et un suivi continu de la puissance maximale est assuré. Ce type de convertisseur est destiné à adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du champ PV correspondant au point de puissance maximal. Ce système

d'adaptation est couramment appelé MPPT (maximum power point tracking). Son rendement se situe entre 90 et 95% [25].

La Figure (3.1) représente la chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque associée à une commande MPPT.

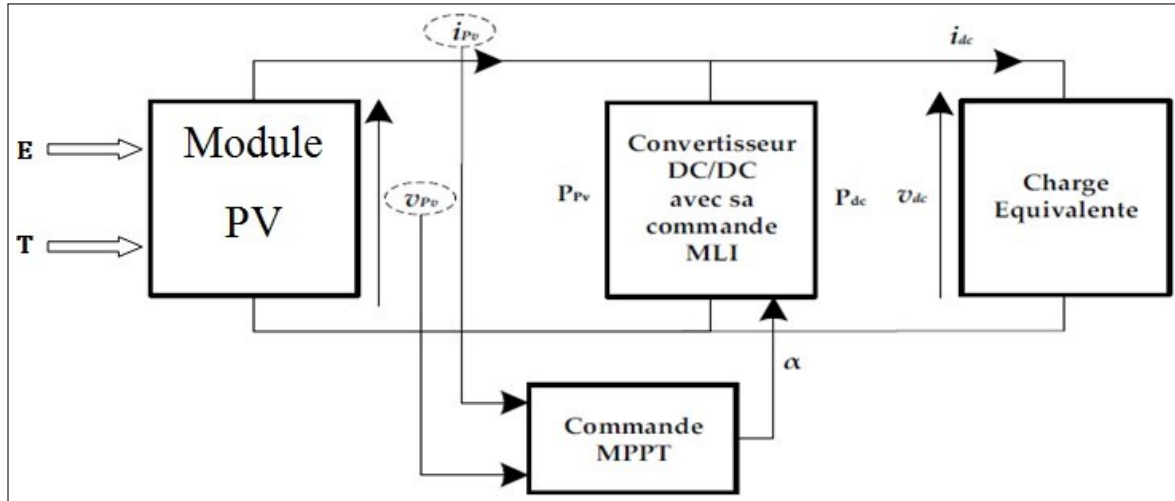


FIGURE 3.1 – Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque associée à une commande MPPT.

On utilise le convertisseur de type DC/DC dans la partie Contrôle du système photovoltaïque car il est facile à contrôler par leurs rapports cyclique en utilisant un signal MLI. Ici, on utilise le hacheur Boost comme interface de puissance à contrôler par le régulateur MPPT, afin d'adapter la tension de sortie du hacheur à la tension requise par la charge [26].

Du fait du non linéarité de la caractéristique I-V, le circuit MPPT oblige le système à fonctionner en permanence sur le point à puissance maximale du générateur, une fois l'éclairement ou la température change. Le hacheur capte alors la puissance électrique absorbée selon une période d'échantillonnage, et commence à incrémenter ou décrémenter le rapport cyclique pour annuler le gradient de la puissance.

En effet, ces dispositifs permettent aujourd'hui d'adapter et d'optimiser la production photovoltaïque par le biais de convertisseurs de puissance DC-DC insérés entre les modules photovoltaïques et l'entrée de l'onduleur. Généralement, ces étages disposent de commandes de gestion électrique plus ou moins complexes permettant d'adapter la tension PV à la tension d'entrée de l'onduleur [26].

3.2.2 Principe de la recherche du point de puissance maximale(MPPT)

Il existe un point de fonctionnement où la puissance débitée est maximale. L'optimisation consiste à réaliser ce point en permanence en agissant de façon automatique sur la charge vue par le générateur cette adaptation de charge dans le principe se fait en générale à l'aide d'un convertisseur statique dans les pertes doivent être aussi faibles que possible et qui peut, par ailleurs, assurer une fonction de mise en forme d'un générateur de sortie, différentes attitudes peuvent être envisagées quant à la commande de l'adaptateur.

Ce type de commande est souvent nommé « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou bien « Maximum Power Point Tracking » (MPPT).

La (figure 3.2) représente une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque élémentaire associée à une commande MPPT.

Pour simplifier les conditions de fonctionnement de cette commande, une charge DC est choisie. Comme nous pouvons le voir sur cette chaîne, dans le cas de la conversion solaire, l'adaptateur peut être réalisé à l'aide d'un convertisseur DC-DC de telle sorte que la puissance fournie par le GPV corresponde à la puissance maximale (P_{max}) qu'il génère et qu'elle puisse ensuite être transférée directement à la charge [27] [28] [29].

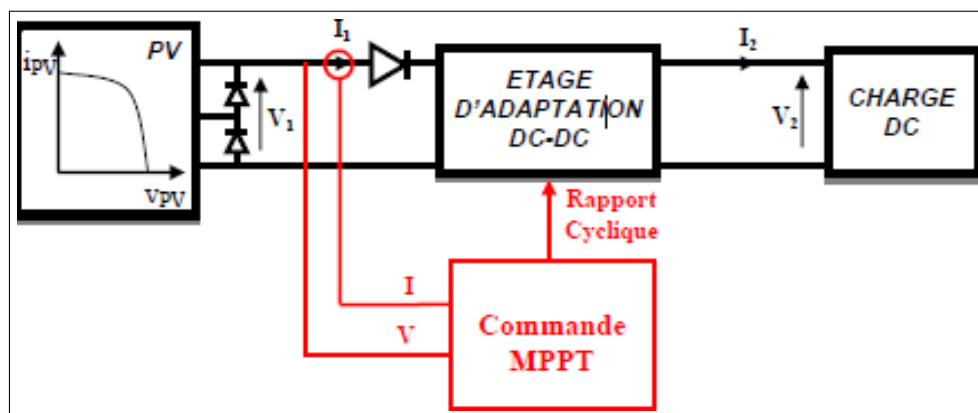


FIGURE 3.2 – Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.

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 quelles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir.

La (figure 3.3) 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 de l'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 G PV (cas b).**

Bien qu'il faille également agir au niveau de la commande.

✓ **Pour une variation de charge (cas c),**

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 :

Est réalisé au moyen d'une commande spécifique nommée MPPT qui 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 [28] [29] [30].

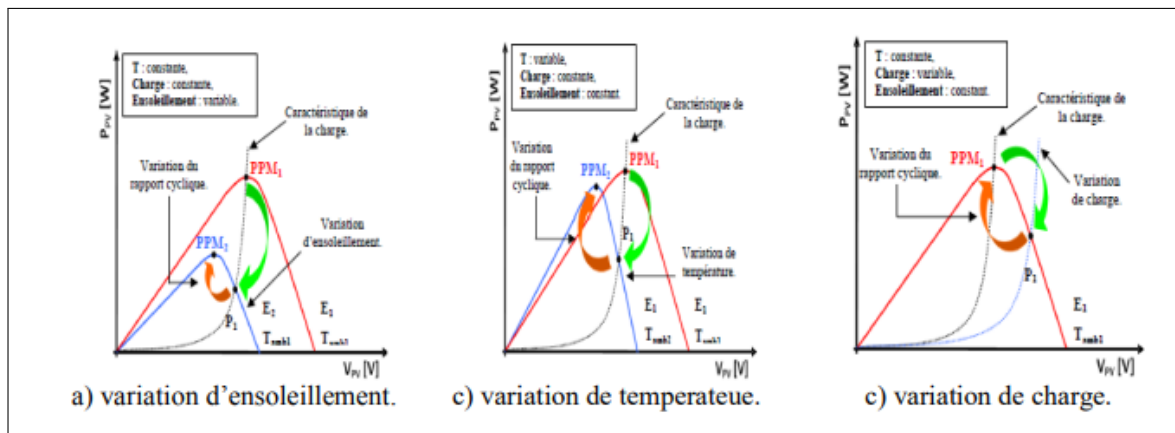


FIGURE 3.3 – Recherche et recouvrement du point de puissance maximale.

3.3 Classification des commandes MPPT

Nous pouvons classifier d'une manière générale les commandes MPPT selon le type d'implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant de les classifier selon le type de recherche qu'elles effectuent et selon les paramètres d'entrée de la commande MPPT [31].

3.3.1 Classification des commandes MPPT selon les paramètres d'entrée.

Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée

Il y a un certain nombre de commandes MPPT qui effectue une recherche du PPM selon l'évolution de la puissance fournie par le GPV. Comme la méthode de PerturbObserve, les algorithmes d'incrément de conductance qui utilisent la valeur de la puissance fournie par le GPV pour l'application d'une action de contrôle adéquate pour le suivi du PPM ou bien Les commandes qui sont basé sur des relations de proportionnalité entre les paramètres optimaux caractérisant le point de puissance maximal (VOPT et IOPT) et les paramètres caractéristiques du module PV (VOC et ICC). Notamment, les MPPT inspirées des réseaux de neurones. Dans ces commandes, soit on fait appel à des systèmes à mémoires informatiques importantes ayant stocké tous les cas possibles, soit les commandes sont encore une fois de plus approximatives. Toutes ces commandes ont comme avantages leurs précisions et leur rapidité de réaction [31].

3.3.2 Classification des commandes MPPT selon le type de recherche

a) MPPT Indirect

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées (I_{sc} ou V_{oc}), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur. Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser. Elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques [32] [31].

b) MPPT Direct

Ce type de commande MPPT détermine le point de fonctionnement optimal (MPP) à partir des courants, tensions ou puissances mesurés dans le système. Il peut donc réagir à des changements imprévisibles du fonctionnement du GPV. Généralement, ces procédures sont basées sur un algorithme de recherche, avec lequel le maximum de la courbe de puissance est déterminé sans interruption du fonctionnement. Pour cela, la tension du point de fonctionnement est incrémentée dans des intervalles réguliers. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la

direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée. Le point de fonctionnement réel oscille alors autour du MPP. Ce principe de base peut être préservé par d'autres algorithmes contre des erreurs d'interprétation. Ces erreurs peuvent survenir, par exemple, à cause d'une mauvaise direction de recherche, résultant d'une hausse de puissance qui est due à une augmentation rapide du niveau de rayonnement. La détermination de la valeur de la puissance du générateur PV, indispensable pour la recherche du MPP, nécessite la mesure de la tension et du courant du générateur, ainsi que la multiplication de ces deux variables. D'autres algorithmes se basent sur l'introduction de variations sinusoïdales en petit signal sur la fréquence de découpage du convertisseur pour comparer la composante alternative et la composante continue de la tension du GPV et pour ainsi placer le point de fonctionnement du GPV le plus près possible du MPP. L'avantage de ce type de commandes est leurs précisions et leur rapidité de réaction [32] [31].

3.4 Les algorithmes MPPT

Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV. Une synthèse des principaux modes de recherche du PPM existants dans ce chapitre nous a permis de bien identifier l'existant et les points qu'il restait à améliorer.

3.4.1 Algorithme Perturber et observer

Le principe de cet algorithme est d'effectuer une perturbation sur la tension du panneau PV tout en agissant sur le rapport cyclique α . En effet, suite à cette perturbation, on calcule la puissance fournie par le panneau PV à l'instant k , puis on la compare à la précédente de l'instant $(k - 1)$.

Si la puissance augmente, on s'approche du point de puissance maximale, et la variation du rapport cyclique est maintenue dans le même sens.

Au contraire, si la puissance diminue, on s'éloigne du point de puissance maximale. Alors, on doit inverser le sens de la variation du rapport cyclique [32].

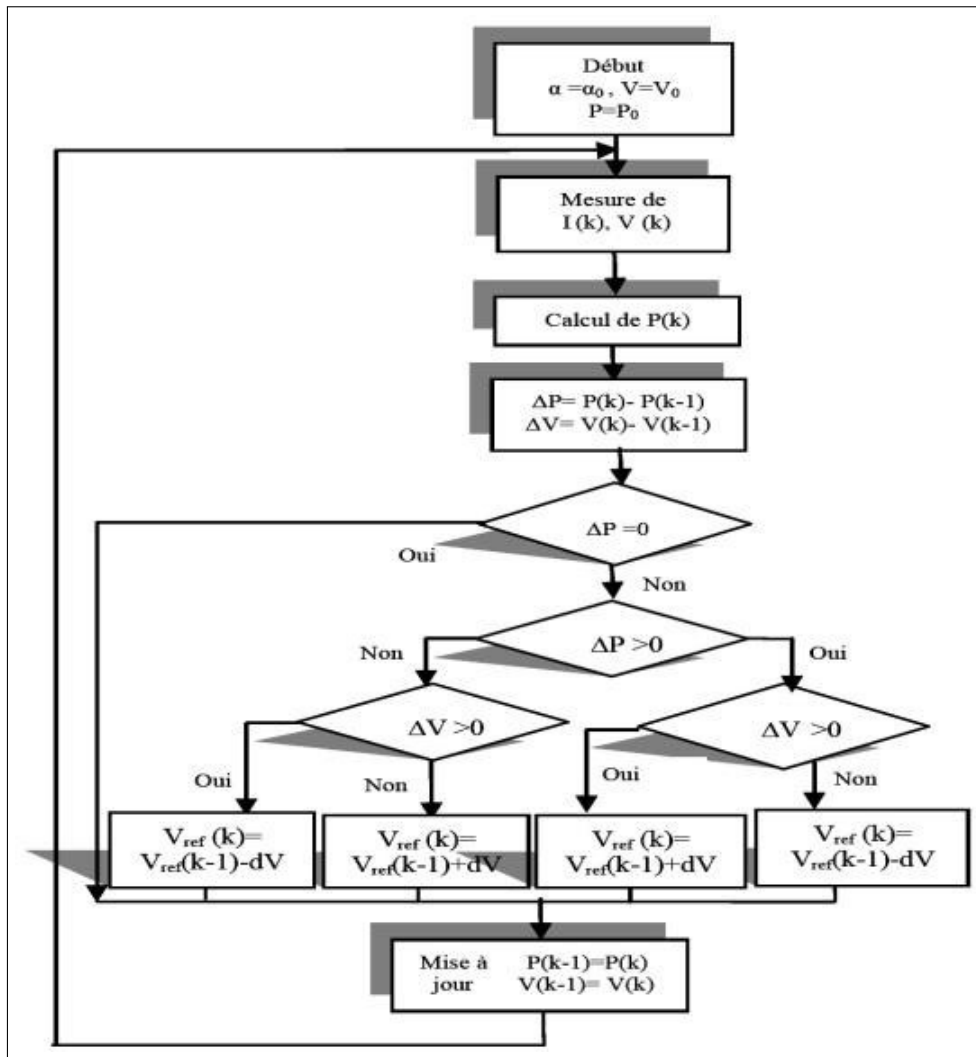


FIGURE 3.4 – Organigramme de l’algorithme ‘PO’.

3.4.2 Algorithme de coucou search (CS)

L’algorithme de Coucou search une méthode d’optimisation métaheuristique bio inspirée. Elle se base sur le système productif agressif des oiseaux coucou. Il est calqué sur le comportement des femelles coucou lors de la période de couvaison. Lesoiseaux coucou sont des oiseaux fascinants. Ils se nourrissent principalement d’insectes et de chenilles velues. Il se nourrit dans les arbres et les broussailles, à découvert. Ils vivent aux lisières des forêts et dans les clairières, les fermes, les marais, les dunes côtières et les campagnes ouvertes, les zones cultivées avec des arbres et des buissons, et près des roselières.

Quelques espèces des oiseaux coucou ont un système agressif, en effet :

Ils pondent leurs œufs des nids d’autres oiseaux, ils peuvent aussi enlever les œufs des autres pour augmenter la probabilité d’éclosion de leurs propres œufs. Lorsqu’un oiseau haut découvre qu’un œuf étranger est dans le nid, il engage un conflit direct avec les coucou parasites, comme

il abandonne le nid en cours, ou bien il construit un autre ailleurs.

Principe et paramètres

L'algorithme de recherche de coucou jouit de deux capacités : une recherche locale et une autre globale, contrôlées par son paramètre Switch/probabilité de découverte. La recherche Globale est favorisée par P_a qui prend la valeur $1/4$ (0.25), tandis que la recherche locale est renforcée dans $3/4$ de la population. Cela permet au CS de procéder efficacement tout en balançant entre l'exploration et l'exploitation. Un autre facteur avantageux est le choix des vols de Levy, à la place des marches aléatoires. On ne peut pas, ainsi, négliger le nombre de paramètres réduit qui permet au CS d'être plus générique. En plus de ses avantages, les chercheurs ont constaté que CS a plus de place pour plus d'améliorations, soit en termes de sa source d'inspiration ou au cœur de l'algorithme lui-même [33].

La force de CS est sa manière d'exploiter et d'explorer l'espace de solutions à l'aide des coucous. Le coucou montre une certaine intelligence de façon à détecter les meilleures solutions. Donc, il représente un outil de contrôle direct pour intensifier ou diversifier les recherches.

Les principales étapes de l'algorithme de recherche coucou

[33]

L'algorithme de la recherche du coucou se résume autour des règles idéales suivantes :

- ✓ Chaque œuf du coucou dans un nid représente une solution.
- ✓ Chaque oiseau de coucou pondra un seul œuf à la fois, et choisira son nid de façon aléatoire. Donc, chaque individu de la population des coucous a le droit de générer aléatoirement une seule nouvelle solution.
- ✓ Les meilleurs nids de meilleure qualité d'œufs nous mèneront vers les nouvelles générations. Ici, on a introduit implicitement la notion d'intensification ou la recherche autour des meilleures solutions.
- ✓ Certaines nouvelles solutions doivent être générées par les vols du Lévy autour de la meilleure solution obtenue jusqu'ici. Cela accélérera la recherche locale.
- ✓ Le nombre de nids hôtes est fixe, et l'œuf pondu par l'oiseau est découvert par l'hôte avec une probabilité $P_a \in [0,1]$. Dans ce cas, l'oiseau hôte choisi se débarrassera de l'œuf, ou d'abandonner le nid et de reconstruire un autre nid quelque part.
- ✓ Pour la simplification, cette dernière hypothèse sera approximée par la fraction P_a des n nids qui sont remplacés par des nouveaux (nouvelles solutions aléatoires).

Une fraction importante des nouvelles solutions doivent être générées par randomisation vers des régions lointaines et dont les emplacements doivent être assez loin de la meilleure solution actuelle, ce qui fera que le système ne sera pas pris au piège dans un optimum local.

✓ Chaque nid peut contenir plusieurs œufs signifiant un ensemble de solutions.

La probabilité P_a représente la fraction de N nids qui vont être remplacés par de nouveaux nids (avec de nouvelles solutions aléatoires dans de nouvelles positions dans l'espace de recherche). La qualité d'un nid ou d'une solution est mesurée en fonction de la fonction fitness (fonction objective) qui se varie d'un problème un autre [34].

3.4.3 Algorithme Incrément de la conductance

Le principe de cet algorithme est basé sur la connaissance de la valeur de la conductance $G = I/V$ et sur l'incrément de la conductance (dG) pour en déduire la position du point de fonctionnement par rapport au point de puissance maximale, . Si l'incrément de conductance (dG) est supérieur à l'opposé de la conductance ($-G$), on diminue le rapport cyclique. Par contre, si l'incrément de conductance est inférieur à l'opposé de la conductance, on augmente le rapport cyclique. Ce processus est répété jusqu'à atteindre le point de puissance maximale [35].

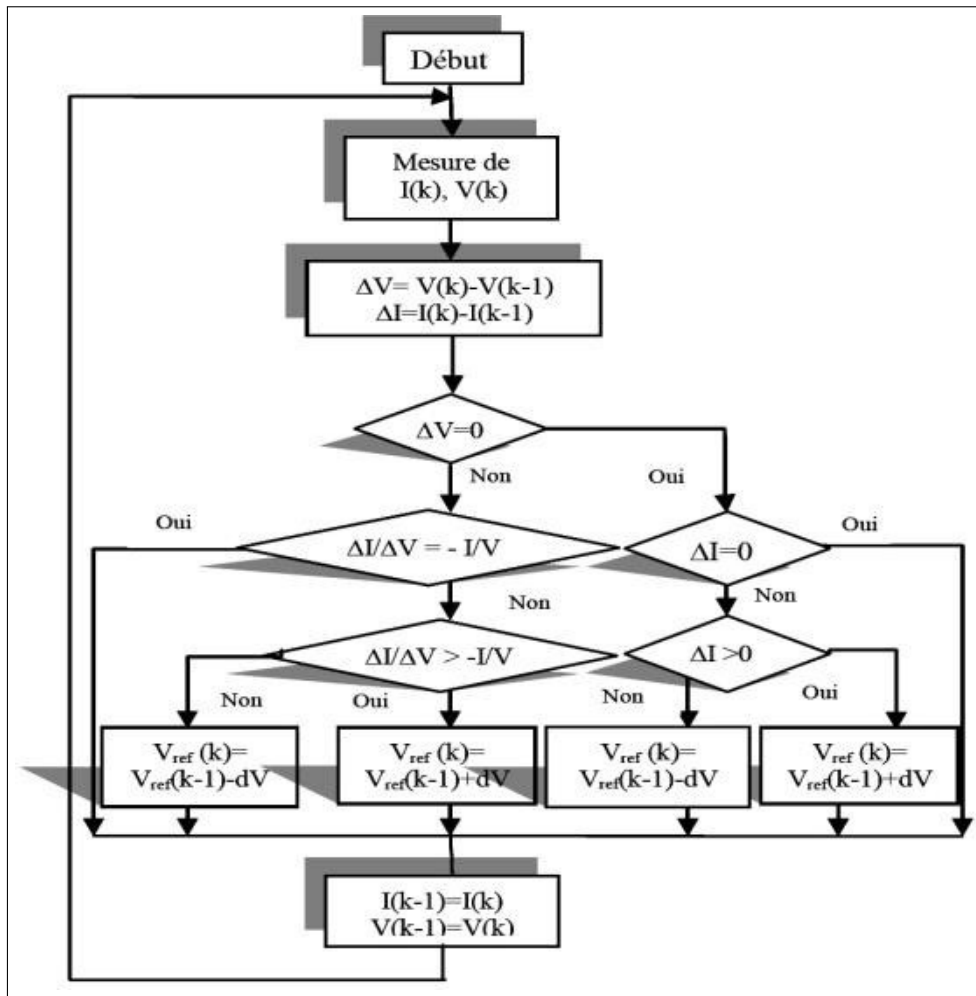


FIGURE 3.5 – Organigramme de l’algorithme ‘INC’.

3.4.4 Algorithme à base de la logique floue

Récemment, la commande à base de la logique floue a été utilisée dans les systèmes de poursuite du point de puissance maximale. Cette commande offre l’avantage d’être une commande robuste et qui ne nécessite pas la connaissance exacte du modèle mathématique du système.

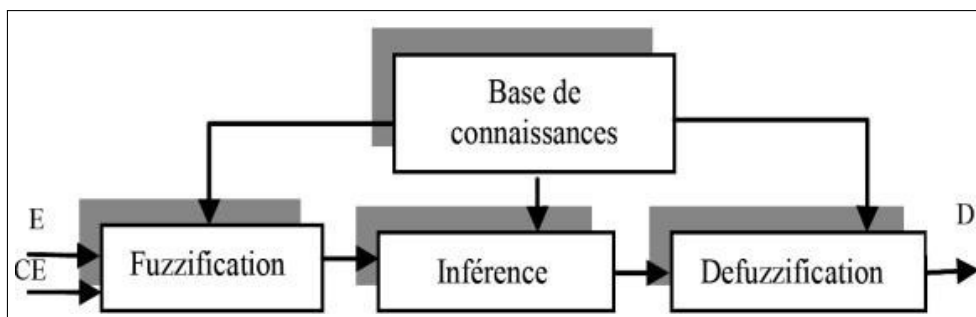


FIGURE 3.6 – Schéma bloc de l’algorithme à base de la logique floue.

En particulier, cette commande est mieux adaptée aux systèmes non linéaires. Le fonction-

nement de cet algorithme se fait en trois blocs : la fuzzification, l'inférence et la défuzzification

La fuzzification permet la conversion des variables physiques d'entrée en ensembles flous. Dans notre cas, on a deux entrées, l'erreur E et la variation de l'erreur CE définies comme suit :

$$E = \frac{P(k) - P(k - 1)}{I(k) - I(k - 1)}$$

$$CE = E(k) - E(k - 1)$$

On attribue à ces grandeurs des variables linguistiques : NG(Negative Grand), NM(Negative Moyen), NP(Negative Petit), Z(Zéro), PP (Positive Petit), PM(Positive Moyen) et PG(Positive Grand) :

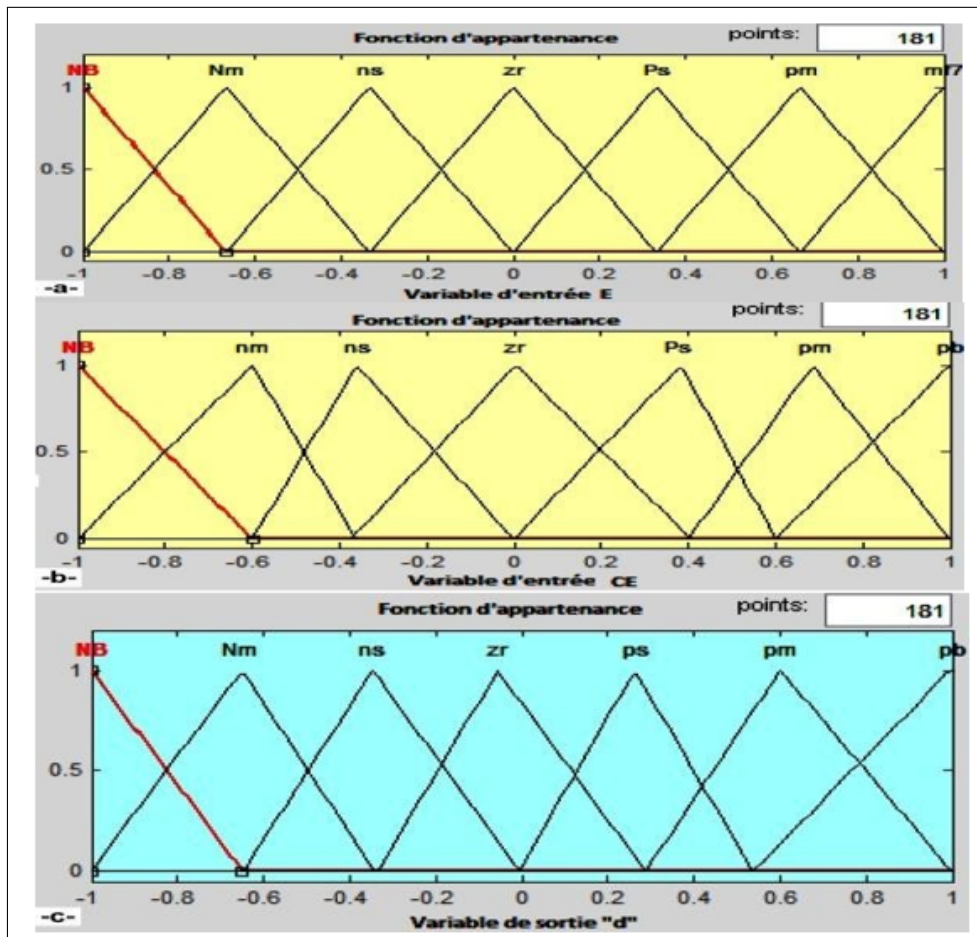


FIGURE 3.7 – Schéma bloc de l'algorithme à base de la logique floue.

Dans l'étape d'inférence, on prend des décisions. En effet, on établit des relations logiques entre les entrées et la sortie tout en définissant les règles d'appartenance. Par la suite, on dresse le tableau de règles d'inférence (Tableau 1). Finalement, en défuzzification, on convertit les sous ensembles flous de sortie en une valeur numérique.

E / CE	NG	NM	NP	Z	PP	PM	PG
NG	NG	NG	NG	NM	NM	NP	Z
NM	NG	NG	NM	NM	NP	Z	PP
NP	NG	NM	NM	NP	Z	PP	PM
Z	NM	NM	NP	Z	PP	PM	PM
PP	NM	NP	Z	PP	PM	PM	PG
PM	NP	Z	PP	PM	PM	PG	PG
PG	Z	PP	PM	PM	PG	PG	PG

TABLE 3.1 – Règles d'inférence.

3.4.5 Optimisation d'essaim de particules (PSO)

En 1995, James Kennedy et Russell Eberhart ont développé l'algorithme d'optimisation d'essaim de particules (Particle swarm optimization (PSO)). Cet algorithme est une technique d'optimisation stochastique inspirée du comportement des animaux tels que les oiseaux [36],[37]. La PSO est une méthode méta-heuristiques de recherche globale qui est basée sur l'activité commune et auto-organisationnelle des particules de même groupe [38],[39]. Comme le montre la Fig. 3.4, cette technique est régie par des règles de déplacement (dans l'espace des solutions), permettant à ces particules de se déplacer progressivement de leur positions aléatoires pour atteindre une position locale optimale [40]. Le Tableau 3.2 donne les paramètres de la PSO, la position de la particule est corrigée en fonction de sa vitesse actualisée (vélocité), la meilleure position personnelle obtenue (PBest) et la meilleure position obtenue au voisinage (GBest). La PSO repose sur les règles, de la mise à jour des positions locales et globale de particules et du groupe, donnée par les équations (3.3, 3.4)[40],[38][39]

$$Vi(t+1) = w*(Vi(t) + c1*rand1*(PBesti(t) - Dfitnessi(t)) + c2*rand2*(GBesti(t) - Pi(t))) \quad (3.1)$$

$$Pi(t+1) = Pi(t) + Vi(t+1) \quad (3.2)$$

$$D = PSO(V, I) \quad (3.3)$$

- P : Position de la particule.
- V : Vitesse.
- PBest : Meilleure position de la particule qui correspond à Local-Dbest.
- GBest : Meilleure position du groupe de particule qui correspond à Global-Dbest.
- rand : Variable aléatoire uniformément distribuée sur un intervalle de $[0, 1]$ (fonction définie dans Matlab).
- D : Rapport cyclique.

	Symbole	Valeur
Nombre d'essais	<i>swarms</i>	10
Nombre des iterations	<i>itermax</i>	20
Poids de l'information locale	<i>c1</i>	0.02
Poids de l'information globale	<i>c2</i>	0.05
Poids de l'inertie	<i>w</i>	0.5
Dimension du problème	Dim	1
Point global de puissance maximale	GMPP	0

TABLE 3.2 – Paramètre de l'algorithme PSO.

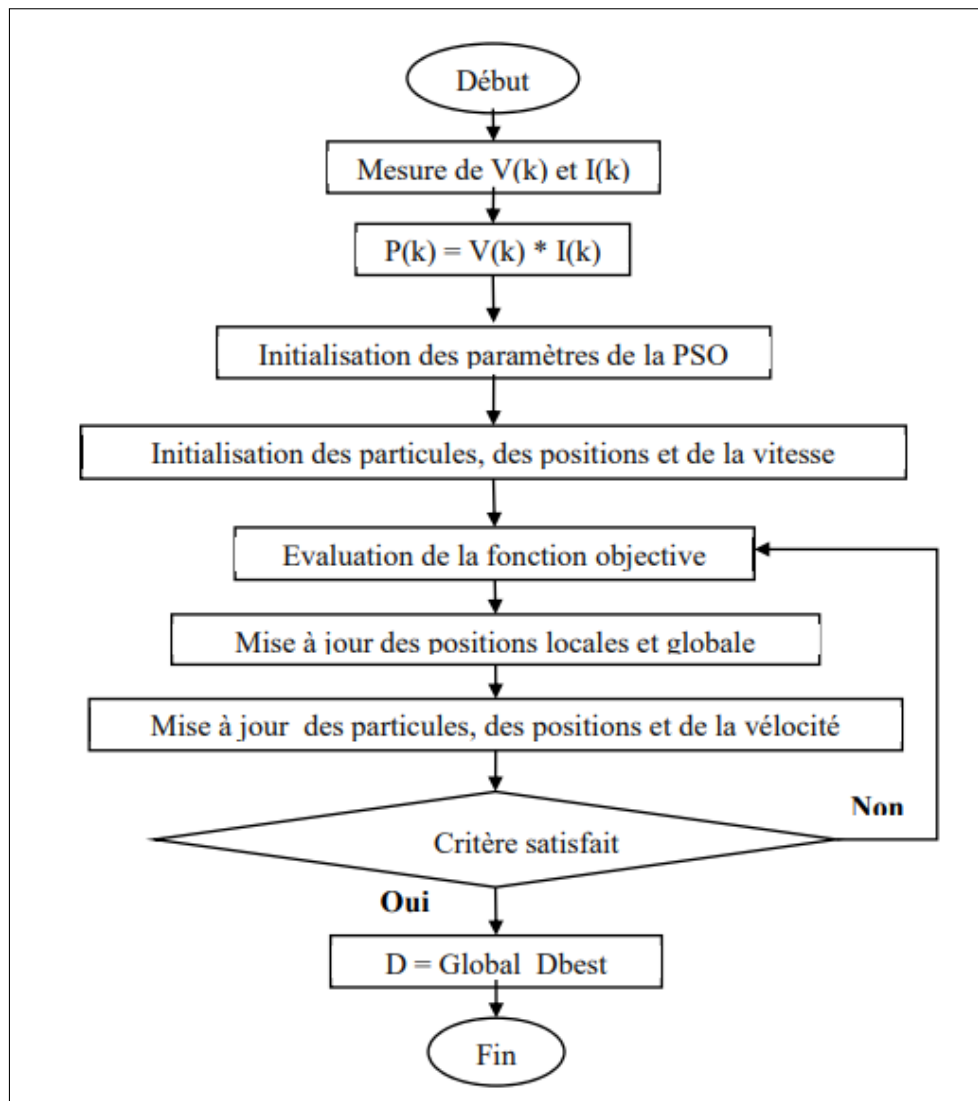


FIGURE 3.8 – Organigramme de la PSO.

3.4.6 Le technique de réseaux de neurones artificiels

La technique de réseaux de neurones elle est aussi, de plus en plus utilisée, car elle offre une grande alternative pour résoudre des problèmes complexes [32-33]. Ces dernières années, l'utilisation de cette méthode dans divers domaines d'application ne cesse d'augmenter car elle fonctionne à partir d'une boîte noire qui n'exige pas d'informations détaillées sur le fonctionnement du système. Elle établit des relations entre les variables d'entrée et de sortie en analysant les précédentes données mémorisées. Un autre avantage est qu'elle peut traiter des problèmes d'une grande complexité grâce à des paramètres interdépendants.

Les réseaux de neurones sont composés généralement de trois couches différenciées, de dénominations :

- Couche d'entrée (Input layer),

- Couche cachée (Hidden layer),
- Couche de sortie (Output layer).

Comme le montre la figure(3.14)

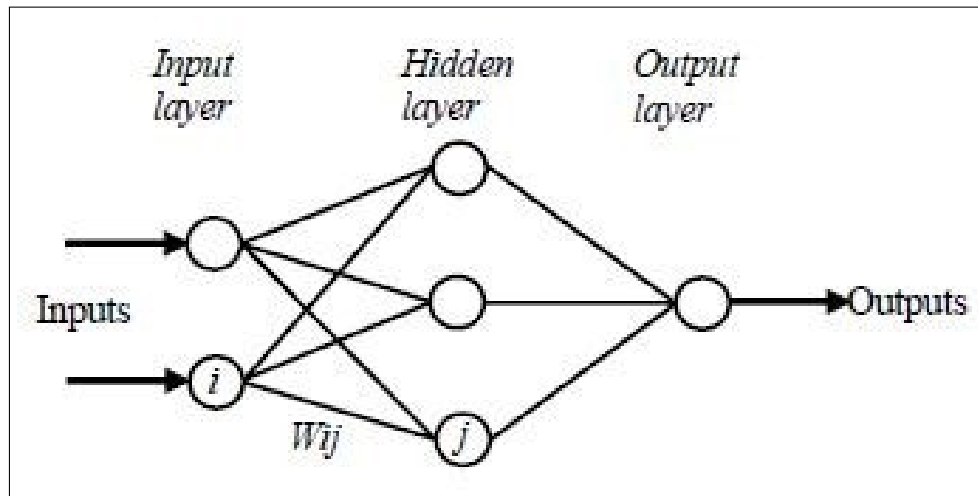


FIGURE 3.9 – Exemple d'un réseau de neurones.

Le nombre de nœuds au niveau des différentes couches est variable en fonction du degré d'apprentissage souhaité et de la précision de la commande souhaitée. Pour une commande MPPT, les variables d'entrées peuvent donc être les paramètres caractéristiques d'un GPV ((,associées ou non à des données atmosphériques comme la température ou l'irradiation ou bien une combinaison de ces dernières. La sortie est généralement un ou plusieurs signaux de référence comprenant au moins le rapport cyclique permettant de commander le convertisseur statique(CS) pour fonctionner le plus souvent possible au PPM. La qualité de la recherche du PPM dépend essentiellement de l'algorithme utilisé dans la couche cachée et de la construction proprement dite du réseau. Ainsi, l'importance entre deux nœuds de la valeur du poids choisi W_{ij} est à prendre en compte. Pour identifier avec précision les différents PPM éventuels, les poids W_{ij} doivent être initialement déterminés avec le plus de soin possible à travers des procédures d'apprentissage pénibles et spécifiques à chaque GPV, chaque site d'implantation et chaque type de charge. De plus, cet apprentissage doit être révisé régulièrement (typiquement chaque mois) pour mettre à jour les relations entre les entrées et les sorties du réseau. Ce qui rend cette commande fastidieuse en entretien et en maintenance.

Bien qu'il existe une grande quantité de ces commandes MPPT dans la littérature, nous ne connaissons pas d'application industrielle les utilisant.

3.5 Techniques de la commande PWM

Les techniques de la commande PWM (pulse width modulation), appelée aussimodulation de largeur d'impulsions sont multiples. Cependant quatre catégories seulement ont été développées et sont donnée comme suit :

- ✓ Les modulations sinus-triangle effectuant la comparaison d'un signal de référence à une porteuse, en général triangulaire.
- ✓ Les modulations pré-calculées pour lesquelles les angles de commutation sont calculés hors ligne pour annuler certaines composantes du spectre harmonique.
- ✓ Les modulations post-calculées encore appelées PWM régulières symétriques ou PWM vectorielles dans lesquelles les angles de commutation sont calculés en ligne.
- ✓ Les modulations stochastiques pour lesquelles l'objectif fixé est le blanchiment du spectre (bruit constant et minimal sur l'ensemble du spectre). Les largeurs des impulsions sont réparties suivant une densité de probabilité Le développement considérable de la technique de modulation de largeur d'impulsion ouvre une large étendue d'application dans les systèmes de commande et beaucoup d'autres fonctions. Elle permet une réalisation souple et rentable des circuits de commande des hacheurs.

3.5.1 Principe de la commande PWM

Le principe de base de la commande PWM est fondé sur le découpage d'une pleine onde rectangulaire. Ainsi la tension de sortie est formée par une succession de créneaux d'amplitude égale à la tension continue d'alimentation et de largeur variable. La technique la plus répandue pour l'obtention d'un signal PWM est de comparer deux signaux :

- Le premier, appelé signal de référence, est un signal continu qui varie entre deux seuils définis en fonction de l'application.
- Le second, appelé signal de la porteuse, définit la cadence de la commutation des interrupteurs statiques du convertisseur. C'est un signal de haute fréquence par rapport au signal de référence.
- L'intersection de ces signaux donne les instants de commutation des interrupteurs [41].

3.6 Critères d'évaluation d'une commande MPPT

La qualité d'une commande MPPT peut être définie comme la position du point de fonctionnement du système par rapport au PPM.

La puissance P_{in} effectivement délivrée par le GPV dépend de la commande utilisée au niveau du convertisseur (MPPT, asservissement de tension, connexion directe, ...). Le rendement du point de fonctionnement qui en découle et que nous noterons η_{mppt} , permet de mesurer l'efficacité de la commande qui a en charge le contrôle du convertisseur de puissance.

En résumé cela donne le % de pertes de puissance d'un module PV par rapport à la fourniture de la puissance maximale qu'il pourrait produire.

$$\eta_{mppt} = \frac{P_{in}}{P_{max}} \quad (3.4)$$

Les performances d'une commande MPPT ne se résument pas à ce seul paramètre (η_{MPPT}). D'autres critères, présentés dans la suite du document, tels que le temps de réponse et son aptitude à fonctionner sur une large gamme de puissance est importante pour évaluer les qualités de ce type de commande [42].

3.6.1 Simplicité et Coût

En plus de ses performances théoriques, il est important de connaître le niveau de complexité de l'algorithme entraînant des difficultés d'implémentation et des pertes liées directement au nombre de calculs nécessaires. En résumé, une commande MPPT doit avoir un niveau de simplicité important favorisant une faible consommation et donc un coût de développement raisonnable pour que sa présence compense le surcoût généré.

En effet, il ne faut pas oublier que dans un contexte énergétique fortement concurrentiel, le fait d'insérer un étage d'adaptation avec une commande MPPT doit avoir un gain du point de vue énergétique recouvrant le surplus économique. Sinon, cette solution ne sera jamais viable du point de vue industriel. Dans le cas contraire, la commande aussi performante qu'elle soit en termes de rendement, présente trop de contraintes pour être choisie pour ce type d'application [28].

3.6.2 Réponse dynamique

Une commande MPPT doit avoir un bon comportement en dynamique afin de pouvoir piloter l'étage d'adaptation et assurer que la recherche du nouveau PPM, suite aux changements

d'éclairement ou de température, soit faite le plus rapidement possible [28].

3.6.3 Flexibilité

Une commande MPPT doit être précise et stable quelles que soient ses conditions d'utilisation. C'est-à-dire qu'elle ne doit pas être conçue pour fonctionner pour un seul type de Panneau. Elle doit être la plus universelle possible, capable de fonctionner avec des panneaux de différentes technologies sans trop de modifications, tout en gardant le même taux de précision et de robustesse [28].

3.6.4 Compétitive sur une large gamme de puissance

Par définition, une commande MPPT, utilisée dans des applications photovoltaïques, est supposée traquer le PPM généré par un module PV, quel que soit le niveau d'ensoleillement. La commande MPPT est dite compétitive si le PPM est atteint avec une erreur statique, correspondant à la position du point de fonctionnement par rapport au PPM, relativement faible sur une large gamme de puissance [28].

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous rappelons brièvement la problématique de la recherche du PPM en établissant une classification des commandes MPPT présentes dans la littérature.

Comme nous l'avons vu dans ce chapitre, MPPT est un processus important pour le système PV fournir une puissance maximale à la charge et aussi pour augmenter l'efficacité.

Dans ce chapitre, nous avons étudié la commande MPPT et son principe et les différents types des méthodes de poursuite du point de puissance maximal générée par le générateur photovoltaïque.

CHAPITRE 4

SIMULATION ET RÉALISATION DE SYSTÈME

4.1 Introduction

La simulation est un outil pour l'évaluation des performances théoriques d'un système. En effet cette partie nous permettra d'effectuer des simulations d'un générateur photovoltaïque suivi par un convertisseur DC/DC et de tester les commandes MPPT. Ceci nous permet de modifier les paramètres du système facilement telles que les conditions météorologiques, et de visualiser l'apport de la commande sur le générateur photovoltaïque. Le logiciel MATLAB et son extension graphique associée SIMULINK font partie d'un ensemble d'outils intégrés au traitement du signal, présentent la possibilité de simuler des systèmes à leurs états continus et discrets, il est donc bien adapté pour tester les commandes MPPT numériques. Ce chapitre est consacré à la simulation et l'étude comparative entre les méthodes de commande à fin d'obtenir de meilleurs résultats.

4.2 Simulation d'un système photovoltaïque

Comme nous l'avons montré dans le chapitre précédente, pour que le générateur photovoltaïque (PV) fonctionne dans les conditions optimales, il doit être doté d'un quadripôle d'adaptation. Cette adaptation se réalise par la recherche automatique du point de puissance maximale (PPM) du générateur PV et ceci lorsque le système est placé dans un environnement où les conditions météorologiques (ensoleillement, température) et charge sont stables.

Module data	
Module:	User-defined
Maximum Power (W)	51.6026
Cells per module (Ncell)	36
Open circuit voltage Voc (V)	21.87
Short-circuit current Isc (A)	3.04
Voltage at maximum power point Vmp (V)	17.98
Current at maximum power point Imp (A)	2.87
Temperature coefficient of Voc (%/deg.C)	-0.229
Temperature coefficient of Isc (%/deg.C)	0.030706

FIGURE 4.1 – Données sur les caractéristiques électriques du module PV tirées de Matlab/Simulink.

convertisseur buck-boost	Valeurs
Capacité d'entrée (C _{in})	100 μF
Inductance (L)	0.018 mH
Capacitance (C)	100 μF
Résistance à la charge (R)	30 Ω

TABLE 4.1 – Paramètre de convertisseur buck-boost.

4.2.1 Schéma Matlab/Simulink du simulation de système photovoltaïque

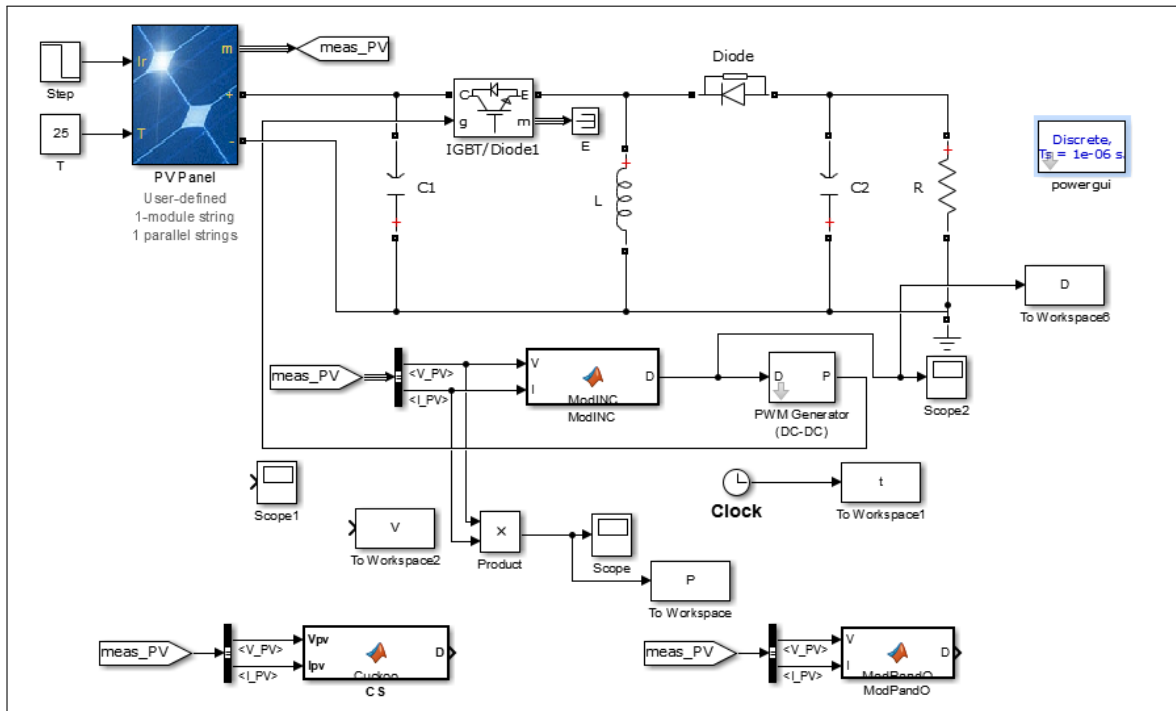


FIGURE 4.2 – Schéma Matlab/Simulink du système photovoltaïque.

4.2.2 Résultats de la simulation

a) Algorithme PO (stable radiation)

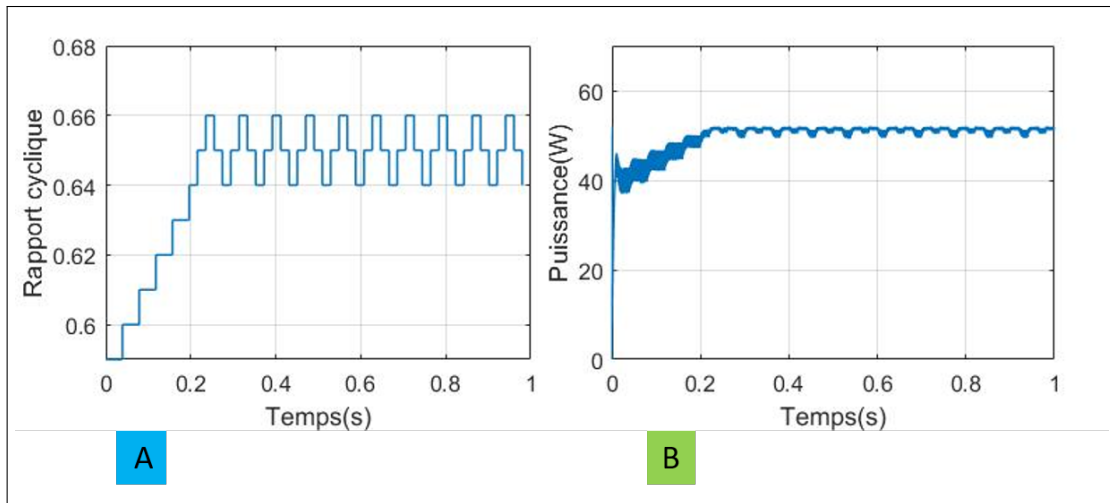


FIGURE 4.3 – (A) Rapport cyclique (B) Puissance PV.

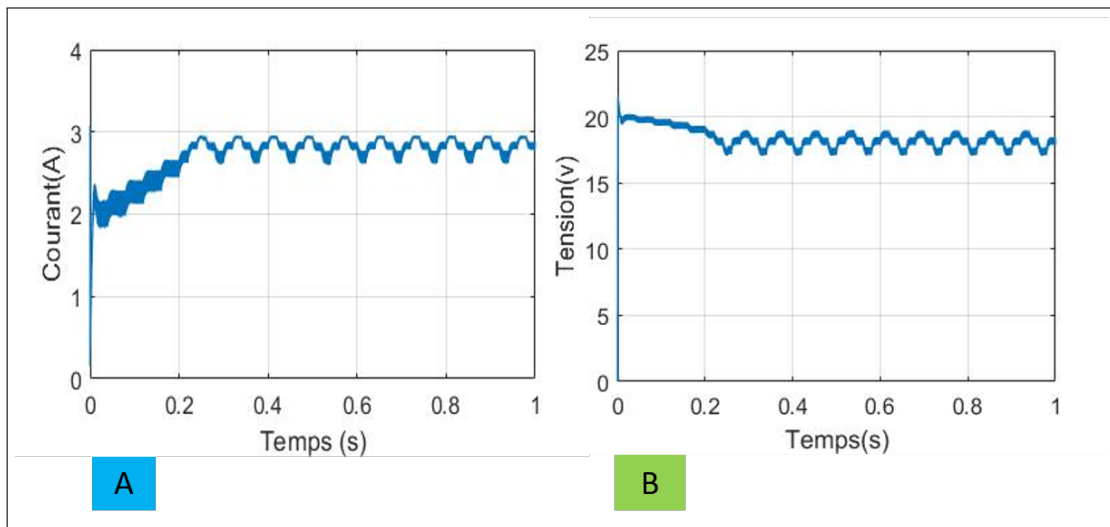


FIGURE 4.4 – Resultat de simulation de :(A) courant PV (B) tension PV.

b) Algorithme PO (variable radiation)

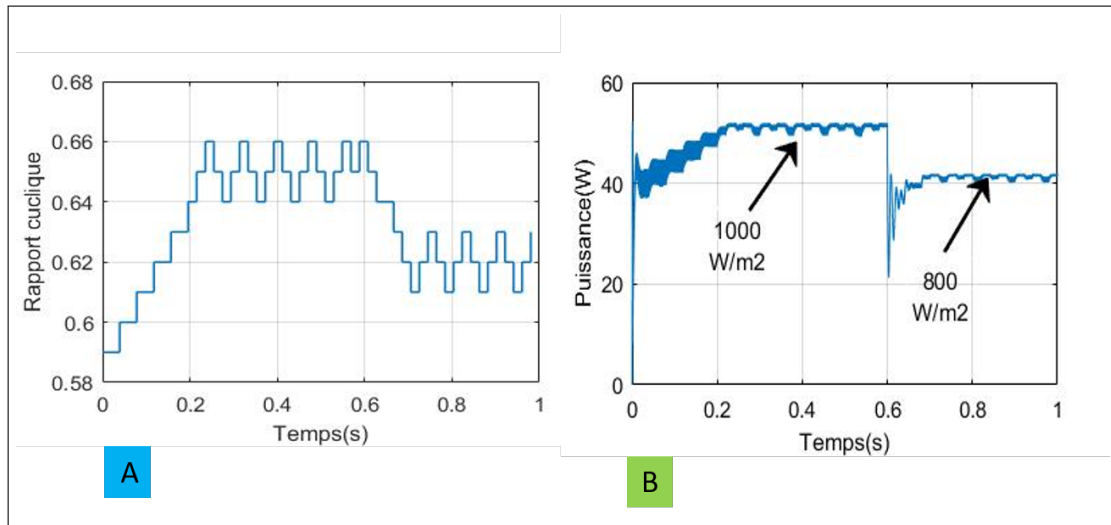


FIGURE 4.5 – (A) Rapport cyclique (B) Puissance PV.

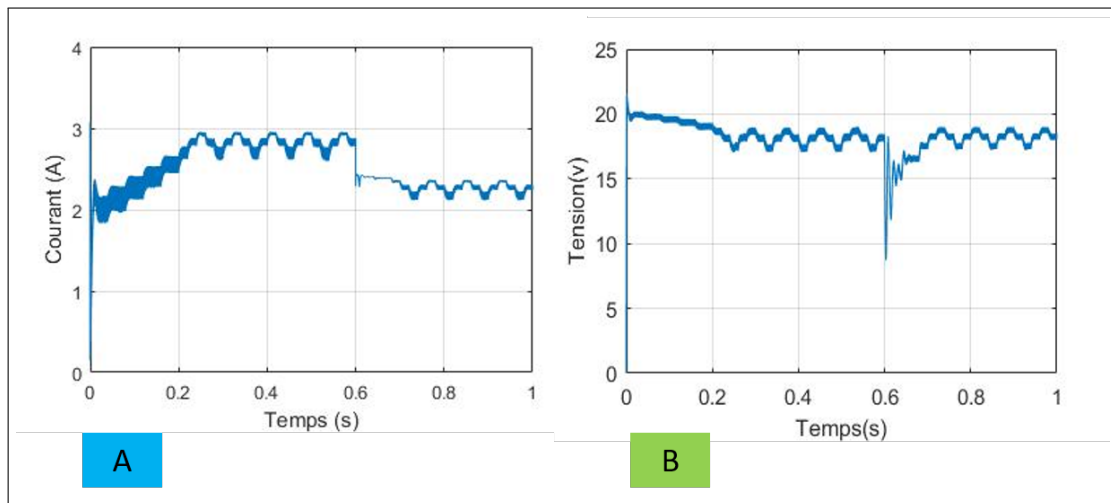


FIGURE 4.6 – Resultat de simulation de :(A) courant PV (B) tension PV .

c) Algorithme de coucou search

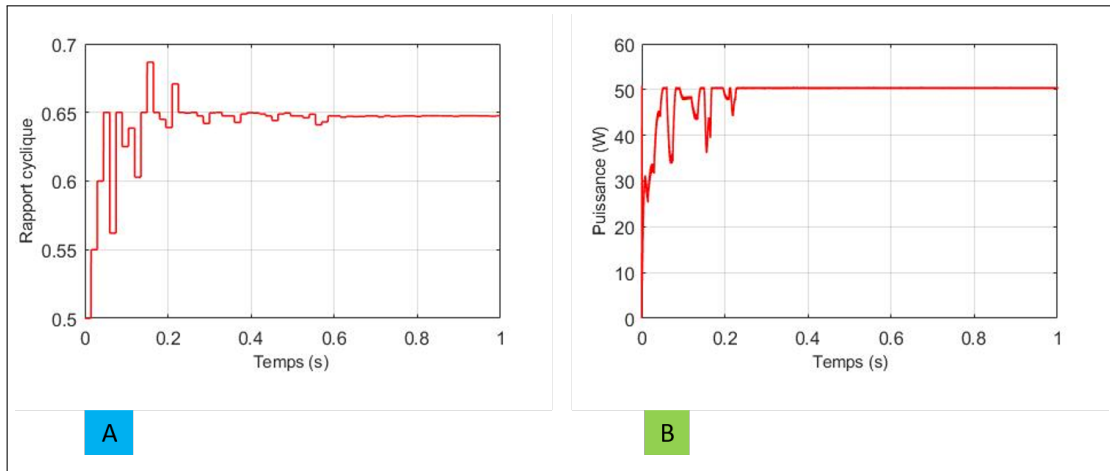


FIGURE 4.7 – (A) Rapport cyclique (B) Puissance PV.

d) Incrément de conductance(stable radiation)

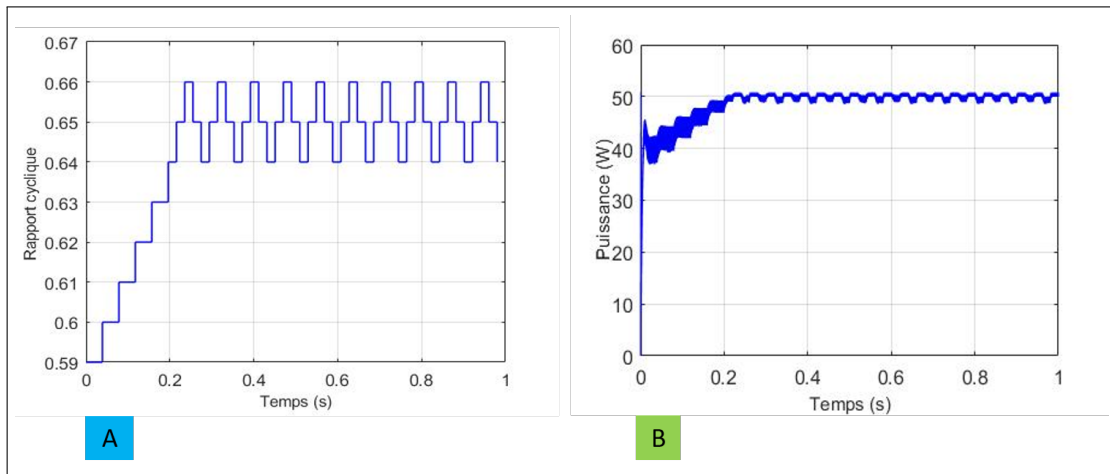


FIGURE 4.8 – (A) Rapport cyclique (B) Puissance PV.

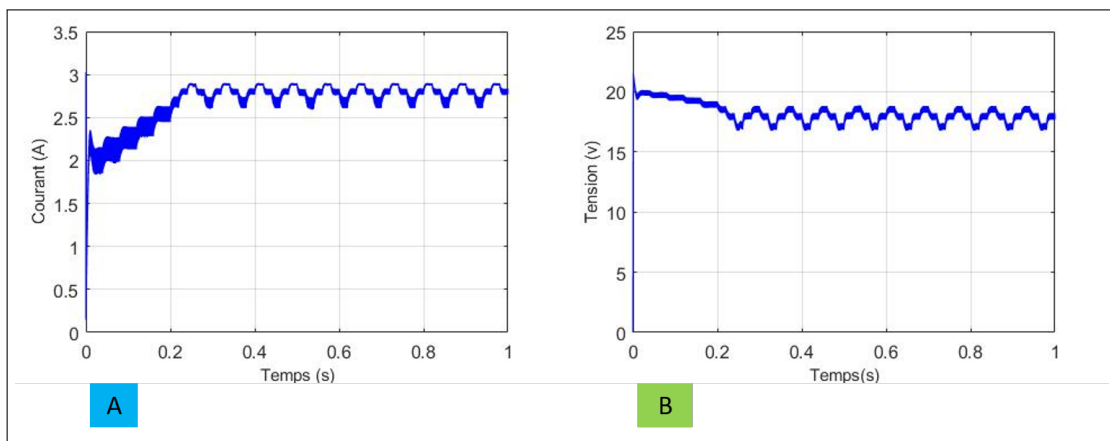


FIGURE 4.9 – Resultat de simulation de :(A) courant PV (B) tension PV .

e) Incrément de conductance(variable radiation)

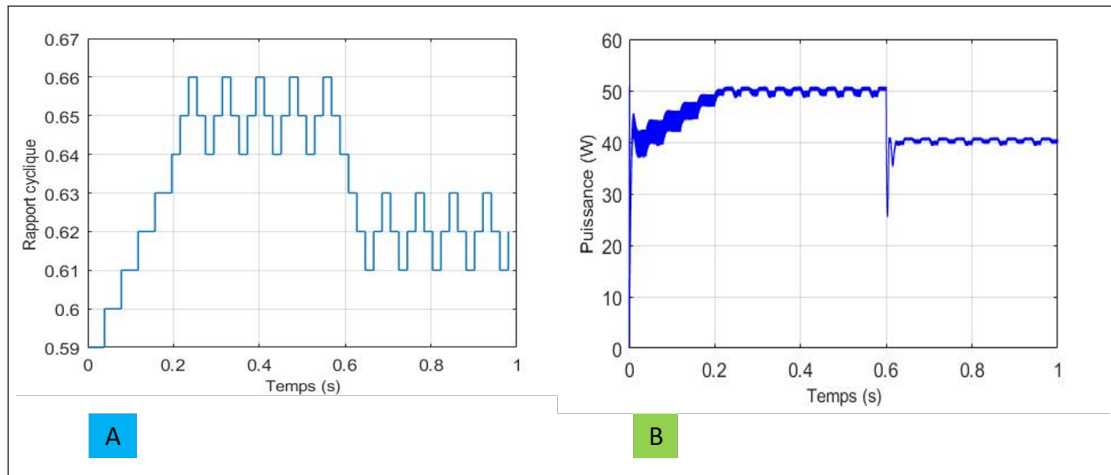


FIGURE 4.10 – (A) Rapport cyclique (B) Puissance PV.

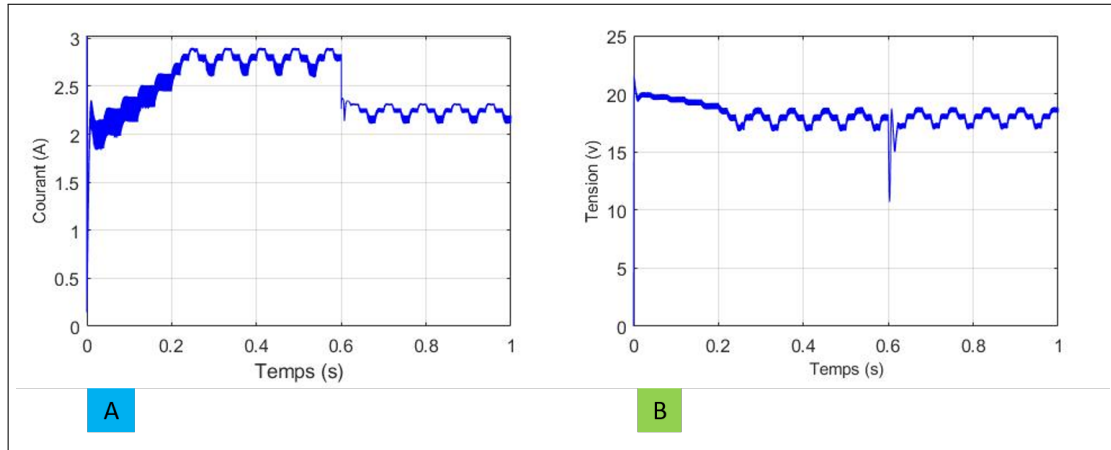


FIGURE 4.11 – Resultat de simulation de :(A) courant PV (B) tension PV .

f) Résultats de la simulation des formes d'onde de suivi MPP

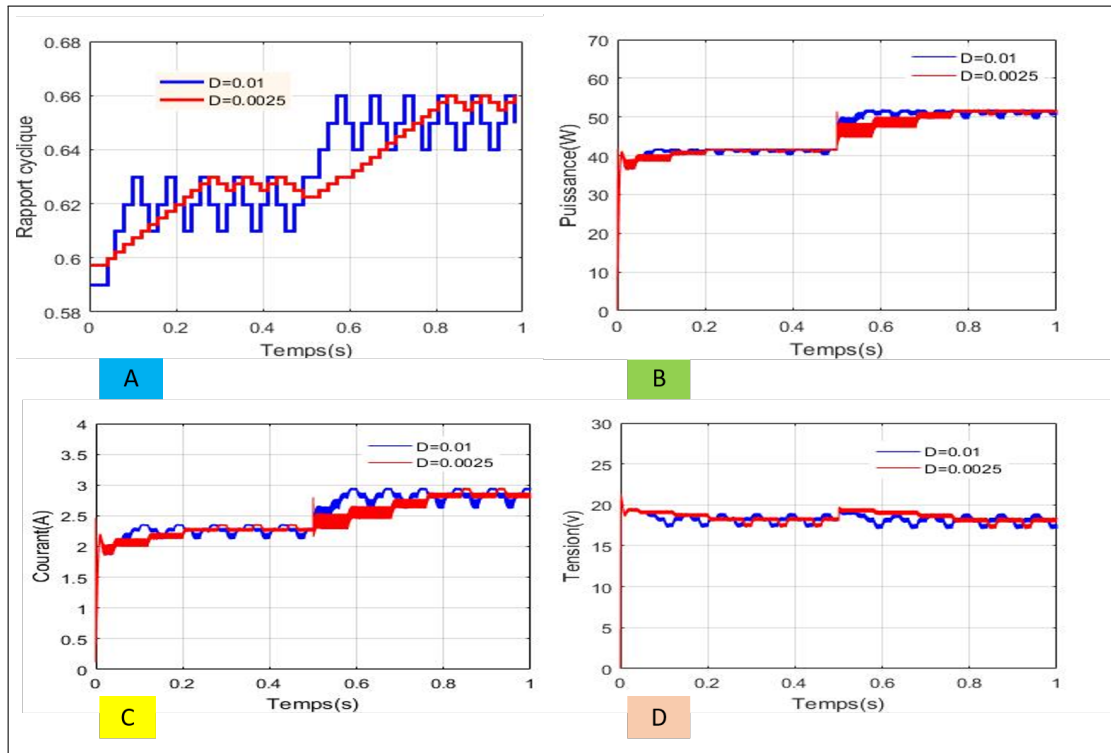


FIGURE 4.12 – Résultats de la simulation des formes d'onde de suivi MPP : (A) rapport cyclique, (B) puissance PV, (C) courant PV et (D) tension PV pour le fonctionnement en régime permanent avec deux facteurs de mise à l'échelle MPPT : (bleu) PO basé sur 0.01 et (rouge) PO basé sur 0.0025.

4.3 Matériel utilisé

4.3.1 Le microcontrôleur

- **Définition**

À cet égard, l'ArduinoMega est similaire au Due en ce sens qu'il possède 54 broches E / S. Cependant, au lieu d'être alimenté par un processeur ARM, il est alimenté par un ATmega2560.

Le processeur fonctionne à 16 MHz et dispose de 256 kilo-octets de ROM, 8 kilo-octets de RAM, 4 kilo-octets d'EEPROM et fonctionne à 5 volts, ce qui le rend compatible avec la plupart des produits électroniques grand public.

L'ArduinoMega possède 16 entrées analogiques, 15 sorties PWM, un brochage similaire au Due et un matériel compatible avec les blindages Arduino. La compatibilité logicielle avec Mega, comme avec Due, ne peut pas toujours être garantie.

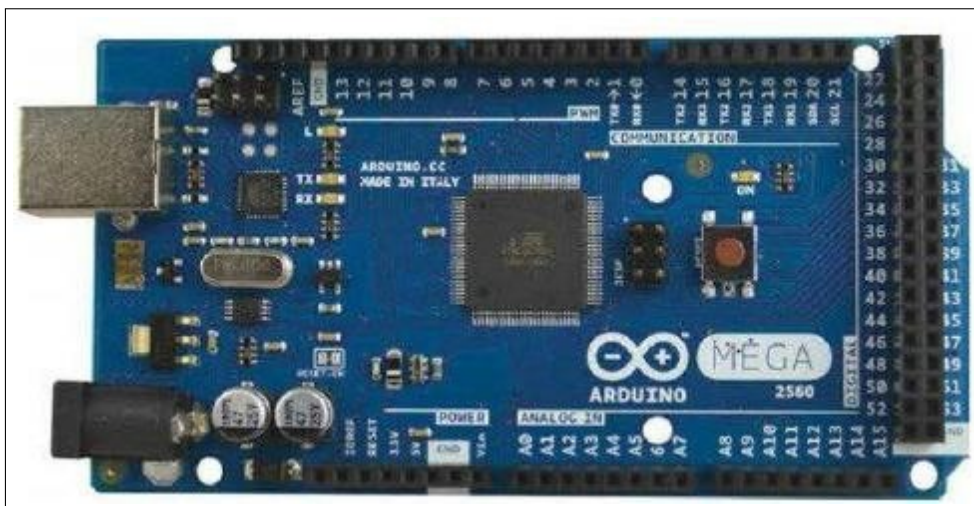


FIGURE 4.13 – Arduino MEGA.

Categorie	Valeur
Microcontrôleur	Atmega 2560
Fréquence d'horloge	16MHZ
Tension de service	5V
Tension d'entrées (recommandée)	7-12V
Tension d'entrées (limites)	6-20V
Portes numériques	54 entrées et sortie
Portes analogiques	16 entrées analogiques
Courant maxi.par broche d'E/S	40mA
Courant maxi.par broche3.3V	50mA
Mémoire	256KO flash, 8ko SRAM, 4ko EEPROM
Chargeur d'amorçage	8 KO(en mémoire flash)
Interface	USB
Dimensions	10.16 cm*5.3cm
Prix	47\$

TABLE 4.2 – la carte arduino MEGA.

4.3.2 Le panneau solaire

On a utilisé le panneau solaire de la paillasse du laboratoire 21.87v,50W qu'est illustré par la figure(4.8)

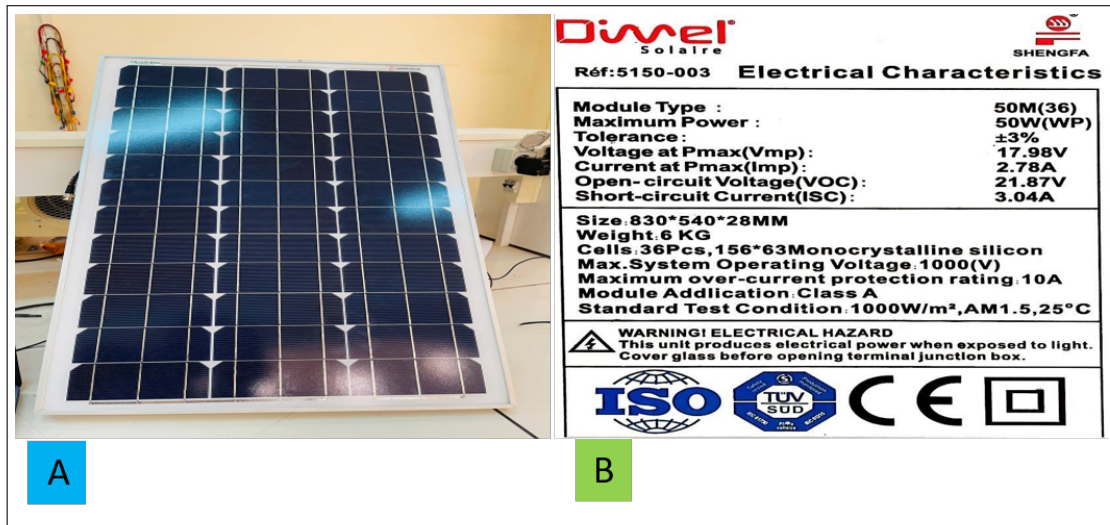


FIGURE 4.14 – (A) Photo réel panneau PV (B) Plaque signalétique du panneau PV.

4.3.3 Convertisseur Buck-Boost et circuit de controle de convertisseur

✓ Le convertisseur Buck-Boost est composé de

- deux condensateur $C_{in}=3000\mu\text{f}$, $C_{out} =3000\mu\text{f}$, branché aux bornes du module pour filtrer la tension d'entrée du hacheur et diminuer les ondulations d'entrée et de sortie.

- Une inductance : $L=0.018\text{mH}$.

- Une MOSFET IRF830.

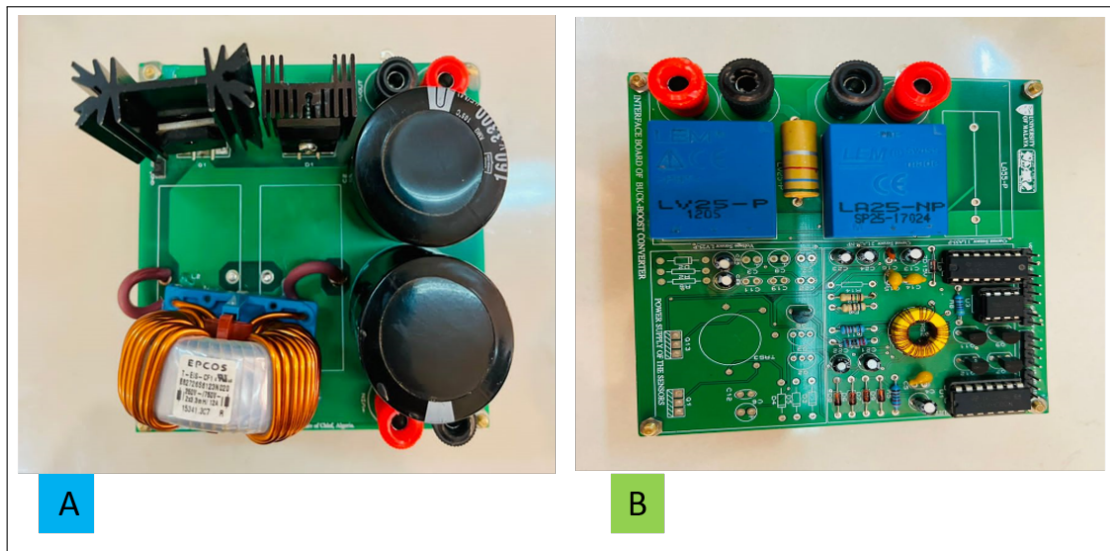


FIGURE 4.15 – (A) Photo réel de convertisseur Buck-Boost (B) circuit de controle de convertisseur.

4.4 Réalisation du système

Dans cette partie, un système efficace de suivi de point de puissance maximale basé sur arduino / matlab utilisant un véritable panneau photovoltaïque est conçu. Nous présenterons les résultats expérimentaux de l'expérience, en travaillant avec PO et INC.

Nous avons fait un vrai test de mesure du jour nuageux, du jour ensoleillé et du faux panneau ombragé pour évaluer l'efficacité de la méthode proposée dans des conditions climatiques variables.

L'utilisateur n'a pas besoin de faire de programmation dans Arduino IDE. Tout sera fait dans Simulink à l'aide de S-function builder. Cette solution consiste d'une part à utiliser les fonctions offertes par Simulink qui permet d'envoyer et d'acquérir des données via le port série (USB) et d'autre part de traiter et visualiser ces données en temps réel.

Aussi, nous avons besoin de faire en sorte que la sortie arduino PWM atteigne 20 kHz au moins parce que arduino à l'aide d'un code spécial de fonction S.

- 1- Entrée matérielle, où les capteurs de V_{pv} et I_{pv} seront lus à l'aide d'arduino,
- 2- Traitement des données par l'algorithmes d'MPPT et transférer le signal(PWM) de contrôle au convertisseur Buck-boost.

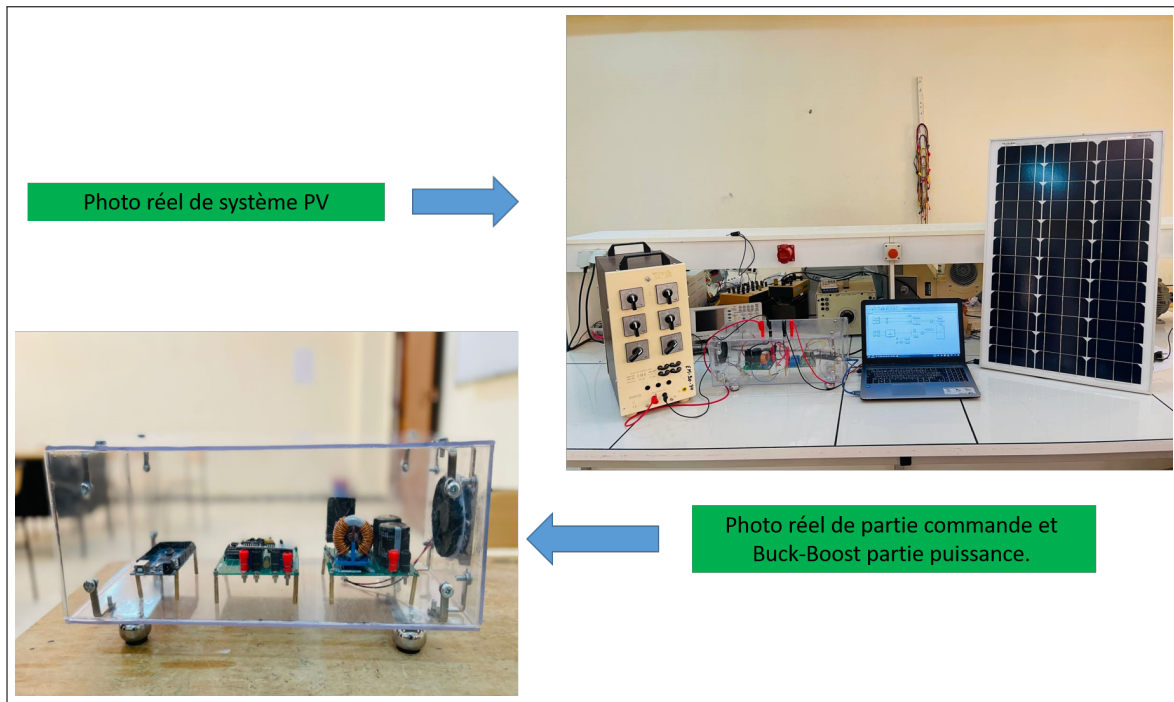


FIGURE 4.16 – Banque d’essais réel de système photovoltaïque.

4.4.1 Schéma Matlab/Simulink du pratique de système photovoltaïque

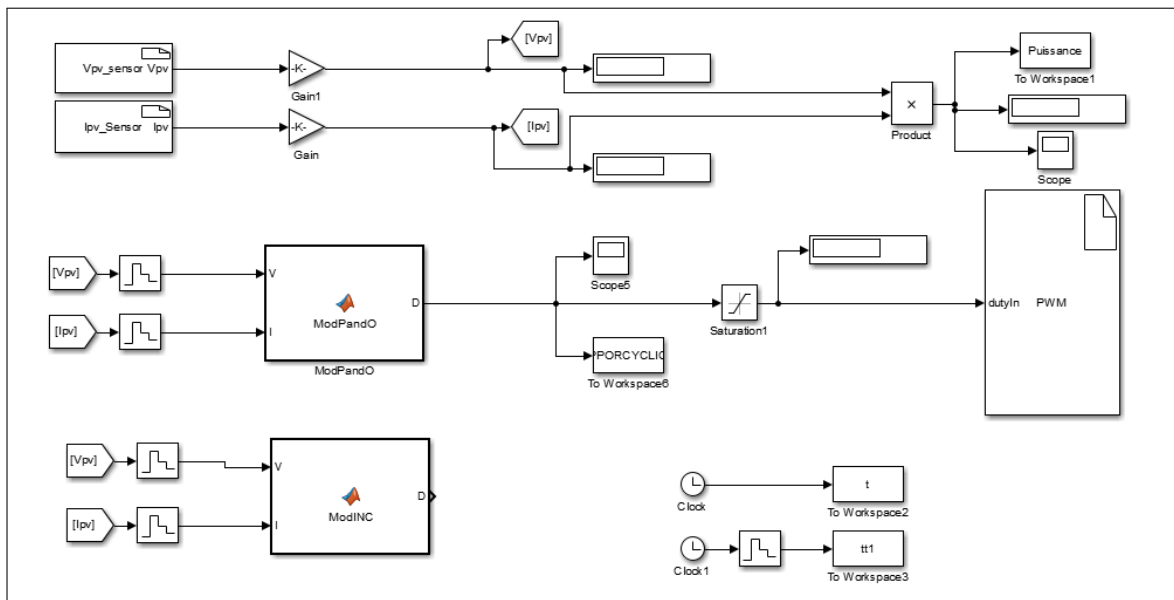


FIGURE 4.17 – Schéma Matlab/Simulink du pratique de système photovoltaïque.

4.4.2 Résultats pratiques

a) Journée ensoleillée

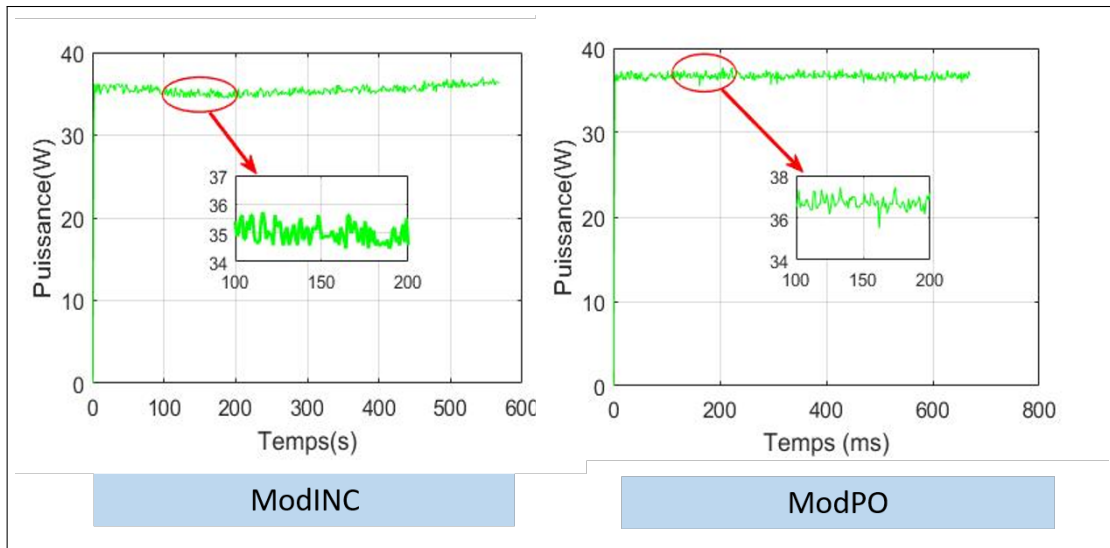


FIGURE 4.18 – Résultat pratique des algorithmes utilisée.

b) Journée nuageuse

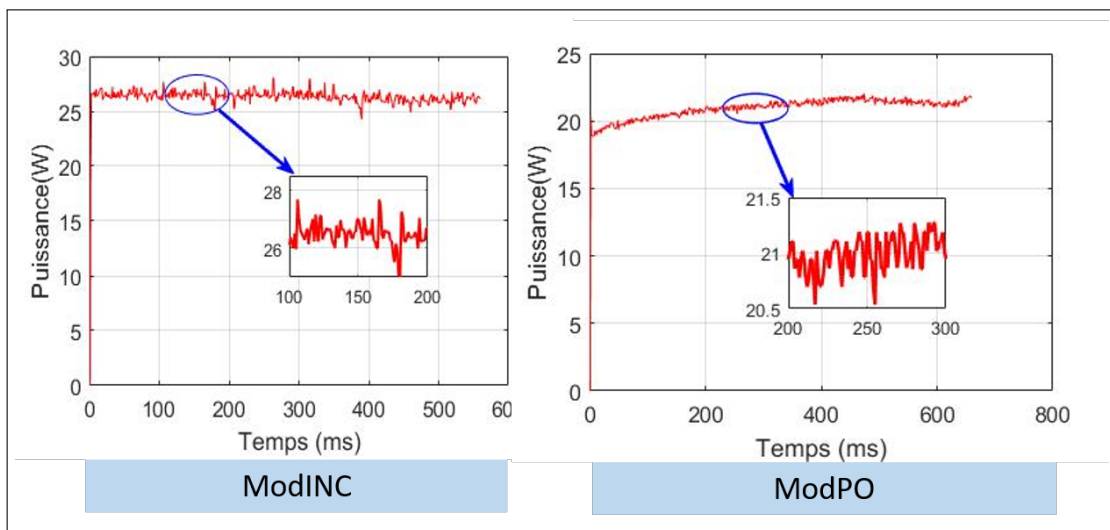


FIGURE 4.19 – Résultat pratique des algorithmes utilisée.

c) Panneau ombragé

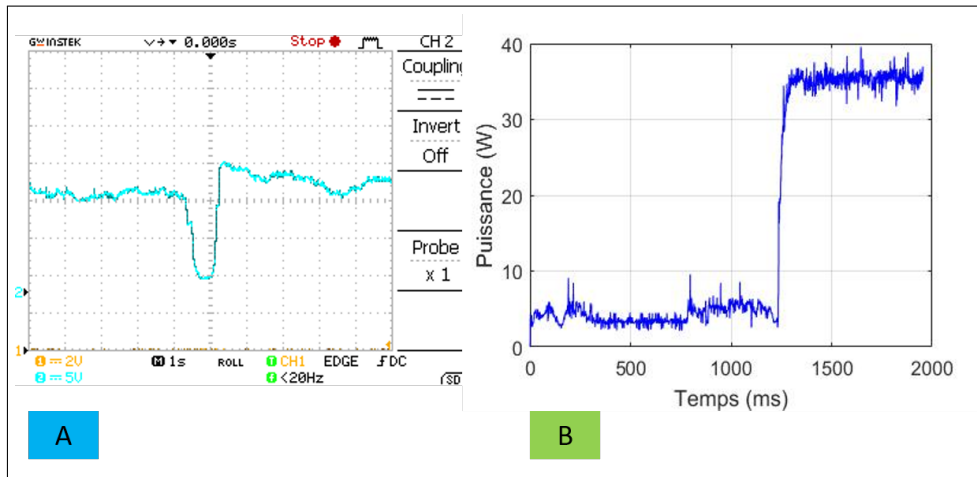


FIGURE 4.20 – (A) résultat pratique du tension de sortie de convertisseur (B) Résultat pratique de puissance PV.

d) Signaux de commande PWM

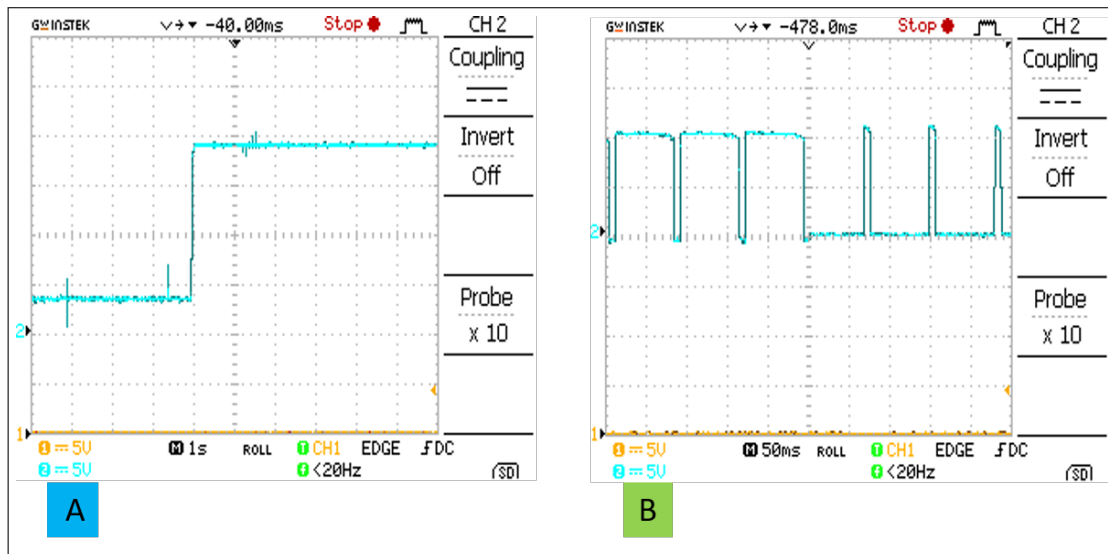


FIGURE 4.21 – (A) Le changement de tension de sortie par controle de constante de PWM [0.9;0.1] (B) Signal de PWM transféré de controle au convertisseur .

4.5 Discussion générale de résultats

Les résultats de la simulation montrent que les algorithmes PO et CS ont en général une performance efficace par rapport aux autres techniques en termes de suivi du point de puissance maximale(MPPT).

la simulation et les travaux expérimentaux ont montré que l'algorithme utilisé fonctionne avec précision et plus rapidement lors du changement de niveau d'irradiance solaire, Où l'implémentation matérielle, un convertisseur buck-boost et un microcontrôleur Arduino MEGA, est appliquée en tant que contrôleur de suivi du point de puissance maximal(MPPT).

4.6 Conclusion

Ce chapitre est consacré à l'installation et la simulation sous matlab/simulink d'un Système PV, nous avons contrôlé le système par différents types d'algorithmes MPPT, il peut être conclu qu'avec les algorithmes MPPT proposés, le panneau PV peut fournir le maximum la puissance comme indiqué dans les résultats expérimentaux à la fois PO et INC a des résultats proches Cependant, il a la capacité de réduire la tension perturbée lorsque le MPP a été reconnu. Cette action préserve directement une puissance de sortie plus stable par rapport à MPPT conventionnel où la puissance de sortie fluctue autour de MPP.

Tel que par l'analyse de notre méthode, possède un grand espace de clés et une sécurité de haute niveau. Ainsi l'analyse prouve la sécurité et l'efficacité.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le travail présenté dans cette thèse porte sur la simulation, et l'implémentation d'un système photovoltaïque fonctionnant avec un convertisseur BUCK- BOOST. Ce convertisseur a l'avantage d'être un amplificateur de tension qui permet à ce système de s'adapter aux changements de temps et de extraire la puissance maximale disponible pour la charge. La simulation et les résultats expérimentaux ont démontré l'intérêt d'un dispositif de recherche de puissance maximale.

Les algorithmes, PO et INC sont décidés à être implémentés dans une carte Arduino Mega2560, afin de suivre le point de fonctionnement à la puissance maximale de le panneau photovoltaïque.

D'après la simulation et les résultats expérimentaux, on peut conclure qu'avec le proposant algorithmes, le panneau PV peut fournir la puissance maximale.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] J. Royer, T. Djiako, and E. Schiler, “B. sadasy.,” *Le pompage photovoltaïque*, université d’Ottawa, 1998.
- [2] A. BOUKARI, M. OULED ABD SALAM, S. MANSOURI *et al.*, “L’impact des énergies renouvelables sur l’environnement,” Ph.D. dissertation, Université Ahmed Draia-ADRAR, 2017.
- [3] M. Dahbi, “Etude et optimisation d’une installation hybride pv-eolienne,” Ph.D. dissertation, Thèse de Doctorat, Université de Bechar, 2007.
- [4] M. Hanine, A. Kebir, S. Makhloufi *et al.*, “Etude et simulation d’un étage mppt pour un générateur photovoltaïque à base d’un kit arduino,” Ph.D. dissertation, Université Ahmed Draia-ADRAR, 2017.
- [5] W. BENSACI, “Modélisation et simulation d’un système photovoltaïque adapté par une commande mppt,” *Thème de Master, Université Kasdi Merbah–Ouargla*, 2012.
- [6] P. Würfel and U. Würfel, *Physics of solar cells : from basic principles to advanced concepts*. John Wiley & Sons, 2016.
- [7] S. Makhloufi, “Contribution à l’optimisation des installations photovoltaïques par des commandes intelligentes,” Ph.D. dissertation, Université de Batna 2, 2013.
- [8] M. El Bahammaoui, R. Masmoudi *et al.*, “Commande mppt de pas variable pour améliorer les performances des systèmes pv statiques et dynamiques,” Ph.D. dissertation, universite Ahmed Draia-ADRAR, 2020.
- [9] L. Castañer, S. Bermejo, T. Markvart, and K. Fragaki, “Energy production by a pv array,” in *Practical Handbook of Photovoltaics*. Elsevier, 2003, pp. 517–529.

- [10] D. Y. Goswami, F. Kreith, and J. F. Kreider, *Principles of solar engineering*. CRC Press, 2000.
- [11] Q. Kou, S. Klein, and W. Beckman, “A method for estimating the long-term performance of direct-coupled pv pumping systems,” *Solar Energy*, vol. 64, no. 1-3, pp. 33–40, 1998.
- [12] —, “A method for estimating the long-term performance of direct-coupled pv pumping systems,” *Solar Energy*, vol. 64, no. 1-3, pp. 33–40, 1998.
- [13] M. Arrouf, “Optimisation de l’ensemble onduleur, moteur et pompe branché sur un générateur photovoltaïque,” 2007.
- [14] A. ZEMOURI, “Etude expérimentale d’un convertisseur dc/dc contrôlé par une commande robuste,” Ph.D. dissertation, Université de Batna 2, 2014.
- [15] J.-P. Colinge, “Physique des dispositifs semi-conducteurs,” 1996.
- [16] E. Babaei and M. E. S. Mahmoodieh, “Systematical method of designing the elements of the cuk converter,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 55, pp. 351–361, 2014.
- [17] J. Enrique, E. Duran, M. Sidrach-de Cardona, and J. Andujar, “Theoretical assessment of the maximum power point tracking efficiency of photovoltaic facilities with different converter topologies,” *Solar Energy*, vol. 81, no. 1, pp. 31–38, 2007.
- [18] J. D. Irwin, *Control in power electronics : selected problems*. Elsevier, 2002.
- [19] R. M’HAMMEDI, C. BEN AMRANI, B. ATAÏLLAH *et al.*, “Étude techno-économique d’un système photovoltaïque (maison solaire) sur le site d’adrar,” Ph.D. dissertation, UNIVERSITE AHMED DRAIA-ADRAR, 2020.
- [20] R. Andoulsi, “Etude d’une classe de systèmes photovoltaïques par une approche bond graph : modélisation, analyse et commande,” Ph.D. dissertation, Lille 1, 2001.
- [21] L. Abbassen, “Etude de la connexion au réseau électrique d’une centrale photovoltaïque,” Ph.D. dissertation, Université Mouloud Mammeri, 2011.
- [22] G. I. Barket, “Poursuite du point de puissance maximale mppt d’un système photovoltaïque sous les conditions psc basée sur l’algorithme pso.”
- [23] B. Huang, “Convertisseur continu-continu à rapport de transformation élevé pour applications pile à combustible,” Ph.D. dissertation, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2009.
- [24] F. Slama, “Modélisation d’un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique,” Ph.D. dissertation, 2018.

- [25] B. Khalil and T. Ayyoub, "Modélisation et simulation d'un système pv adapté par une commande mppt basée sur un mode glissant." 2021.
- [26] S. Diaf, "Intégration des systèmes à sources renouvelables d'énergie pour la production décentralisée d'électricité en site isolé," Ph.D. dissertation, Alger, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, 2009.
- [27] A. B. Learreta, C. Alonso, and C. Cabal, "Réalisation de commandes mppt numériques," *Report. Tarragona, Spain : Rovira i Virgili University*, p. 3, 2006.
- [28] C. Cabal, "Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque," Ph.D. dissertation, Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2008.
- [29] K. Kassmi, M. Hamdaoui, and F. Olivié, "Conception et modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande mppt analogique," *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 10, no. 4, pp. 451–462, 2007.
- [30] T. Mrabti, M. El Ouariachi, K. Kassmi, F. Olivié, and F. Bagui, "Conception, modélisation et réalisation d'un système photovoltaïque de moyenne puissance," *Journal of Renewable Energies*, vol. 11, no. 4, pp. 567–575, 2008.
- [31] A. C. Pastor, "Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques," Ph.D. dissertation, INSA de Toulouse, 2006.
- [32] A. Chermitti, O. Boukli-Hacene, and B. Mohamed, "Improvement of the " perturb and observe" mppt algorithm in a photovoltaic system under rapidly changing climatic conditions," *International Journal of Computer Applications*, vol. 56, no. 12, 2012.
- [33] A. Ouabarab, "Résolution de problèmes d'optimisation combinatoire par des métaheuristiques inspirées de la nature : Recherche du coucou via les vols de lévy," 2015.
- [34] A. Gherboudj, "Méthodes de résolution de problèmes difficiles académiques," *Université de Constantine2*, 2013.
- [35] A. A. Ghassami, S. M. Sadeghzadeh, and A. Soleimani, "A high performance maximum power point tracker for pv systems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 53, pp. 237–243, 2013.
- [36] N. Altin and S. Ozdemir, "Three-phase three-level grid interactive inverter with fuzzy logic based maximum power point tracking controller," *Energy Conversion and Management*, vol. 69, pp. 17–26, 2013.
- [37] K. Tsang and W. L. Chan, "Model based rapid maximum power point tracking for photovoltaic systems," *Energy conversion and management*, vol. 70, pp. 83–89, 2013.

- [38] C. Sakthigokulrajan and K. Ravi, “Retracted : Combined role of derived array configurations and mpso based mppt in improving the energy yield under partial shading conditions,” 2017.
- [39] J. Shi, W. Zhang, Y. Zhang, F. Xue, and T. Yang, “Mppt for pv systems based on a dormant pso algorithm,” *Electric Power Systems Research*, vol. 123, pp. 100–107, 2015.
- [40] S. Lyden and M. Haque, “Maximum power point tracking techniques for photovoltaic systems : A comprehensive review and comparative analysis,” *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 52, pp. 1504–1518, 2015.
- [41] S. Fatiha, “Implémentation d’un régulateur de type trois pour convertisseur dc-dc sur dsp,” Ph.D. dissertation, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M’SILA, 2017.
- [42] A. Cid Pastor, “Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques,” Ph.D. dissertation, Toulouse, INSA, 2006.