

Département d'Automatique, Télécommunication et d'Electronique

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique et informatique industriel

Thème

Etude et contrôle d'un convertisseur DC/DC utilisé dans
un système photovoltaïque

Préparé par :

- KERNOU Brahim
- KHERAZ Tinhinane

Dirigé par :

A. BELKAID

Examiné par :

Mme. CHENNA Amina

M. MENDIL Boubekeur

Année universitaire : 2023/2024

Remerciements

Nous tenons à remercier, tout d'abord, le dieu le plus puissant qui nous a donné la santé, le courage et la patience pour achever ce travail.

Nos plus vifs remerciements s'adressent à notre encadrant, Mr A. BELKAID pour sa patience, son orientation et ses remarques constructives.

Nos remerciements s'adressent également aux membres de jury pour l'honneur qu'ils nous font en participant au jugement de notre travail Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin, pour la réalisation de ce modeste travail.

Dédicaces

À mes parents qui ont toujours veillé à mon bien-être, qui ont toujours cru en moi et qui n'ont jamais cessé de m'encourager à aller de l'avant.

À mon grand frère Mounir et sa femme.

À mon frère Hamza et sa femme.

À ma sœur et son époux.

À ma tante.

À mes neveux Malek, Mohamed , Nesrine , Ayoub , Assia et Chahine

Et surtout à ma petite sœur Chaima.

À toute ma famille qui a toujours été à mes côtés.

BRAHIM

Dédicaces

A mes chers parents IKHLEF et FATIMA pour leurs sacrifices, leurs amours, leurs tendresses et leurs prières pour moi que dieu vous protège du mal et vous donne santé et longue vie je vous aime.

A mon cher mari MEZIANE YANIS qui m'a toujours encouragé et poussé à aller de l'avant.

A mes deux frères ADLAL et RABAH que dieu vous protège que du bonheur.

A mes sœurs Lynda, Kahina, Lydia et Louisa je vous souhaite tous le bonheur du monde je vous aime.

A mes beaux-parents Khali Omar et Khalti Naima je vous souhaite une longue vie .

TINHINANE

Sommaire

Introduction générale	15
Chapitre 1 : Généralité sur les systèmes photovoltaïques.....	17
I.1 Introduction	18
I.2 L'énergie solaire	18
I.3 L'effet photovoltaïque	18
I.4 La cellule photovoltaïque	19
I.4.1 Définition.....	19
I.4.2 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque (PV).....	21
I.4.3 Circuit équivalent et modèle mathématique	22
I.4.4 Paramètres de la cellule photovoltaïque.....	24
I.4.4.1 Courant de court-circuit ICC.....	24
I.4.4.2 Tension en circuit ouvert VCO.....	25
I.4.4.3 Point de puissance maximale Pmax.....	25
I.4.4.4 Facteur de forme FF	26
I.4.4.5 Rendement énergétique η	26
I.5 Les différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïque).....	26
I.5.1 Les cellules monocristallines	27
I.5.2 Les cellules polycristallines	27
I.5.3 Les cellules amorphes.....	27
I.6 Générateur photovoltaïque.....	28
I.6.1 Panneau photovoltaïque.....	28
I.6.2 Caractéristiques électriques d'un panneau solaire.....	28
I.6.3 protections classiques d'un GPV.....	29
I.7-L'influence de l'éclairement et de la température	31
I.7.1-Influence de l'éclairement.....	31
I.7.2-Influence de la température.....	32
I.8. Association des cellules	32
I.8.1 Association des cellules en série.....	32
I.8.2 Association des cellules en parallèle	33
I.2-Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïques	34
Conclusion	35

Chapitre2 : les Convertisseurs DC-DC électroniques et les technique MPPT.....	36
II.1-Introduction.....	37
II.2-La chaine de conversion GPV.....	38
II.2.1-Connexion directe.....	38
II.2.2-Connexion à travers un étage d'adaptation	40
II.3-Les diffirents types deConvertisseur DC-DC	41
II.3.1-Convertisseur Buck	41
II.3.2-Convertisseur Boost	42
II.3.3-Convertisseur Buck-Boost.....	44
II.3 La commande MPPT	46
II.3.1 Les techniques MPPT	46
II.3.1.1 perturbation et observation (P&O).....	46
II.3.1.2 incrémentation de la conductance (INC).....	48
II.3.1.2.1 Les avantages et les inconvénients.....	51
II.3.1.3 Incrémentation de conductance modifiée (MIC).....	51
II.3.1.4 La logique floue.....	51
II.3.1.5 MPPT avec les réseaux de neurones artificiels.....	54
Conclusion.....	56
Chapitre III : Modélisation de batterie et résultat de Simulation de la chaine PV.....	57
III.1 Introduction	58
III.2 Batterie Solaire	58
III.2.1. Définition	58
III.2.2. Constitution d'une batterie	58
III.2.3. Exemples de Batteries	59
III.2.4 Principe de fonctionnement	59
III.3 Caractéristiques d'une batterie solaire	60
III.5 Modélisation de la batterie.....	61
III.6 Simulation de système photovoltaïque avec la commande MPPT et contrôle de charge et déchargé de batterie.....	65
III.7 composition de système	66
III.7.1 Le panneaux photovoltaïque.....	66

III.7.2 Le convertisseur Boost.....	67
III.7.3. Le Convertisseur Bidirectionnel.....	67
III.7.4. Principe de contrôle de batterie.....	68
III.7.5. Modèle de Batterie	68
III.8 Simulation avec la méthode P&O	70
III.8.1 Le principe de fonctionnement de l’algorithme	71
III.9 Résultat de simulation	72
III.10 Analyse des résultats	75
Conclusion.....	77
Conclusion générale.....	78
Bibliographie.....	80

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : conversion de l'énergie solaire en électricité.....	19
Figure I.2 : Structure basique d'une cellule solaire.....	20
Figure I.3 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque (PV).....	21
Figure I.4 : schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	23
Figure I.5 : schéma équivalent simplifié.....	24
Figure I.6 : Différents types de cellules photovoltaïques	27
Figure I.7 : Constitution d'un champ photovoltaïque.....	28
Figure I.8 : Caractéristique courant – tension	29
Figure I.9 : Caractéristique puissance – tension	29
Figure I.10 : Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour.....	30
Figure I .11 : Evolution de la caractéristique (I-V) et (P-V) du module en fonction de l'irradiation.....	31
Figure I .12 : Evolution de la caractéristique (I-V) (P-V) du module en fonction de la température.....	32
Figure. I.13 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de N_s cellules en série.....	33
Figure. I.14 : Caractéristiques résultant d'un groupement de N_p cellules en parallèle.....	34

Chapitre II

Figure II.1 : Principe de base d'un hacheur.....	37
Figure II.2 : Connexion directe GPV-Charge.....	38
Figure II.3 Points de fonctionnement d'un GPV en fonction de la charge	39
Figure II.4 : Etage d'adaptation entre un GPV et une charge.....	40
Figure II.5 : Schéma du convertisseur Buck	41
Figure II.6 : Formes d'ondes du convertisseur Buck (courants à gauche, tension à droite).....	42

Figure II.7 – Schéma du convertisseur Boost.....	42
Figure II.8 : Formes d’ondes du convertisseur BOOST (courants à gauche, tension à droite).....	44
Figure II.9 – Schéma du convertisseur Buck- Boost.....	44
Figure II-10 : Formes d’ondes du convertisseur Buck-Boost (courants à gauche, tension à droite).....	45
Figure II.11 : Le fonctionnement de l’algorithme PO.....	47
Figure II.12 : Organigramme de l’algorithme de P&O.....	48
Figure II.13 : Positionnement du point de fonctionnement.....	50
Figure II.14 . Organigramme de l’algorithme de INC	50
Figure II.15 : Schéma bloc de l’algorithme à base de la logique floue.....	52
Figure II.16 Fonctions d’appartenance des variables d’entrée et de sortie.....	53
Figure II.17 : Principe de MPPT floue.....	54
Figure II.18 la conception fondamentale d’un ANN a deux couches.....	55
CHAPITRE III	
Figure III.1 : Schéma d’une batterie en (a) décharge (b) charge.....	60
Figure III.2 : Modèle électrique équivalent d’une batterie.....	61
Figure III.3 : l’évolution de la tension.....	64
Figure III.4 : Le bloc schématique de SIMULINK du SPV.....	65
Figure III.5 : les paramètres du panneau PV utilisé.....	66
Figure III.6 .les caractéristique de PV	66
Figure III.7 : Le convertisseur Boost	67
Figure III.8 : Convertisseur Bidirectionnel.....	67
Figure III.9 : système de contrôle de batterie.....	68
Figure III.10 : Caractéristiques de Décharge de la Batterie.....	69
Figure III.11 : le programme P&O sous script MATLAB.....	70
Figure III.12 : Profil d’irradiation Variable en Fonction du Temps	72

Figure III.13: tension du panneau PV en fonction des variations d'irradiation	72
Figure III.14: courant du panneau PV en fonction des variations d'irradiation.....	73
Figure III.15: courant de sortie du panneau PV après le convertisseur en fonction des variations d'irradiation.....	73
Figure III.16: tension de sortie du panneau PV après le convertisseur en fonction des variations d'irradiation.....	73
Figure III.17: puissance du panneau PV en fonction des variations d'irradiation.....	74
Figure III.18: courant de batterie	74
Figure III.19: tension de batterie.....	74
Figure III.20: puissance de batterie.....	75
Figure III.21: l'état de charge de batterie	75

Liste d'abréviations

MPPT	Poursuite du Point de Puissance Maximale « Maximum Power Point Tracking »
DC/DC	Convertisseur tension continu /continu
PV	Photovoltaïque
GPV	Générateur photovoltaïque
PO	Perturbation et Observation « Perturb and Observe »
Inc Cond	Incrémentation de la conductance (IC)
FLC	Contrôleur avec la logique floue « Fuzzy Logic Controller »
PN	Positive-Négative
MPP	Point de Puissance Maximale « Maximum Power Point »
PF	Point de Fonctionnement
R	Résistance
f	Fréquence
t	Temps
T	Température
C	Capacité
MIC	Incrémentation de conductance modifiée

Liste des symboles

ΔD	La variation du rapport cyclique
Δe	La variation de l'erreur dans l'algorithme de FLC
ΔI	Variation du courant
ΔP	Variation de la puissance
ΔV	Variation de la tension
D	Le rapport cyclique (α)
e	L'erreur de l'algorithme de FLC (dérivée de la puissance)
G	Ensoleillement
I	Courant photovoltaïque
I_{0d}	Courant traversant la diode dans le circuit équivalent de la cellule PV
I_{ppm}	Courant au PPM (courant optimal)
I_{ph}	Photo courant de la cellule PV
I_s	Courant de sortie de convertisseur
I_{sc}	Courant du court-circuit
k	Constante de Boltzmann ($k = 1,381 \cdot 10^{-23} J/K$)
L	L'inductance de la bobine
ns	Nombre de cellules connectées en série
np	Nombre de cellules connectées en parallèle
P	La puissance photovoltaïque

Pmax	Puissance maximale
q	Charge de l'électron ($q = 1,602 \cdot 10^{-19} C$)
V	Tension photovoltaïque
Ve	Tension d'entrée du convertisseur
Vppm	Tension au PPM (tension optimale)
Voc	Tension du circuit ouvert « Open circuit voltage » (Vcc)
Vs	Tension de sortie du convertisseur
μ	Le degré (fonction) d'appartenance
Rsh	Résistance shunt en parallèle
Rs	Résistance serie
Ipv	Courant fourni par la cellule
Ish	Courant dérivé par la résistance shunt
I ₀	Courant de saturation inverse de la diode
Vpv	Tension aux bornes du GPV
Ipv	Courant fournit par la cellule
Vc	Tension de la cellule
Pmax	Puissance maximale
G	La conductance
dG	L'incrémentation de la conductance
V _L	La tension aux limites de l'inductance
I _L	Courant qui traverse l'inductance

I_{\min}	La valeur minimale du courant
I_{\max}	La valeur maximale du courant
Δi_L	L'ondulation de courant dans l'inductance
Δv_s	L'ondulation de la tension de sortie

INTRODUCTION GENERALE

L'énergie solaire est une source d'énergie propre disponible presque partout dans le monde, tant que le soleil brille. Elle est produite par des cellules photovoltaïques qui captent l'énergie du soleil pour la convertir en électricité. Attrayante pour sa capacité à ne produire aucune pollution, la technologie photovoltaïque a une durée de vie de 20 ans et nécessite peu d'entretien. Ainsi, l'énergie solaire est de plus en plus considérée comme une solution à long terme pour lutter contre le réchauffement climatique.

L'électricité solaire gagne en popularité depuis que les panneaux solaires sont devenus moins chers tout en offrant un rendement acceptable. Parallèlement, la technologie des composants semi-conducteurs de grande puissance a considérablement progressé grâce à l'introduction de composants très performants en termes de rendement et de puissance de fonctionnement.

Une caractéristique importante des panneaux solaires est que la puissance maximale disponible est fournie à un seul point de fonctionnement précis, déterminé par une tension et un courant spécifiques, appelé en anglais Maximum Power Point (MPP). Ce point varie en fonction de l'ensoleillement et de la température des cellules solaires. En raison du coût relativement élevé de cette énergie, il est crucial d'extraire le maximum de watts des panneaux solaires. Cela nécessite un mécanisme de suivi du point de puissance maximale, appelé 'maximum power point tracking' (MPPT), pour générer constamment la puissance maximale.

Notre travail consiste à étudier et réaliser un système photovoltaïque (PV) à base d'un convertisseur DC-DC en utilisant la commande MPPT de type P&O combinée à un contrôle efficace de charge et décharge d'une batterie, ce qui permet de maximiser l'efficacité du système PV sous des conditions d'irradiation variables.

Notre mémoire est composée de trois chapitres :

- Dans le premier Chapitre : Présentation des généralités sur les systèmes photovoltaïques, la construction des cellules photovoltaïques, l'effet

photovoltaïque, le principe de fonctionnement, ainsi que les avantages et inconvénients.

- Dans le deuxième Chapitre : Présentation des différents types de convertisseurs statiques DC-DC les plus courants dans les installations photovoltaïques, ainsi que quelques techniques MPPT les plus utilisées pour la poursuite de la puissance photovoltaïque maximale.
- Dans le troisième Chapitre : Étude de la modélisation d'une batterie et simulation d'un système photovoltaïque avec commande MPPT et contrôle de charge et décharge de la batterie avec MATLAB / SIMULINK.

Nous concluons ce travail par une conclusion générale.

Chapitre I :

Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I.1 Introduction

La conversion photovoltaïque est la production directe d'énergie électrique à partir de la lumière en utilisant des panneaux solaires. Ce processus repose sur l'effet photovoltaïque, un phénomène physique où une force électromotrice est produite lorsque la surface d'une cellule est exposée à la lumière.

Ce chapitre sera consacré aux généralités sur la conversion photovoltaïque, de la cellule aux différentes structures des systèmes photovoltaïques.

I.2 L'énergie solaire

Le soleil est une source inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (KWc/m²) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge.

L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés :

- **L'énergie solaire thermique** : qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux sombres. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.
- **L'énergie solaire photovoltaïque** : qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays où les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon [1].

I.3 Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est la conversion directe de l'énergie solaire en électricité. Le terme « photovoltaïque » souvent abrégé par le singe « PV », à été formé à partir des mots « photo » un mot grec signifiant lumière et « Volta » le nom du physicien italien (Alessandro Volta) qui a inventé la pile électrochimique en 1800. [2]

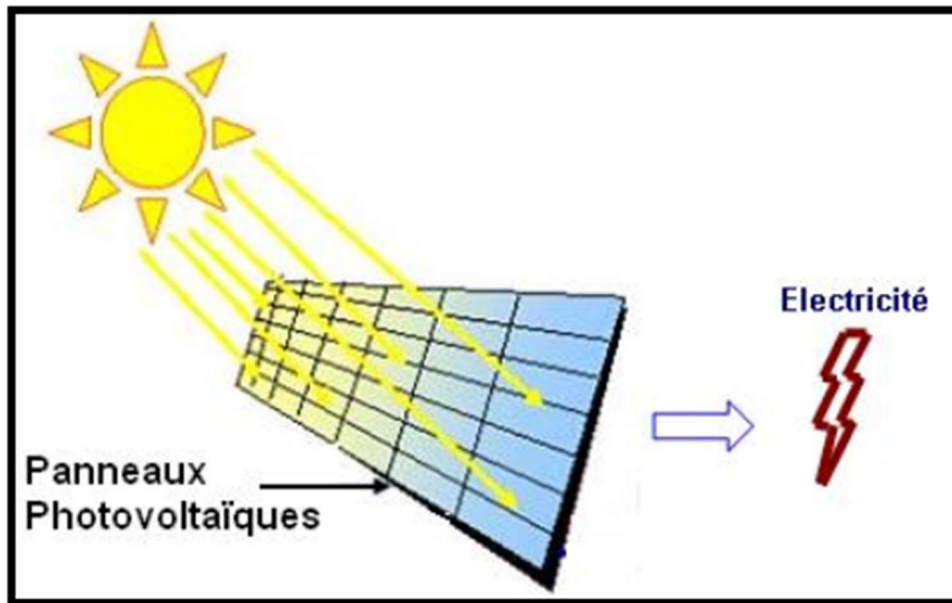


Figure I.1 : conversion de l'énergie solaire en électricité

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil. Les modules photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques à base de silicium ont la capacité de transformer les photons en électrons. La conversion photovoltaïque se produit dans des matériaux semi-conducteurs. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable.

I.4 La Cellule photovoltaïque

I.4.1. Définition

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

Les cellules photovoltaïques sont constituées :

- D'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.

-
- D'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
 - D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode.
 - Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.

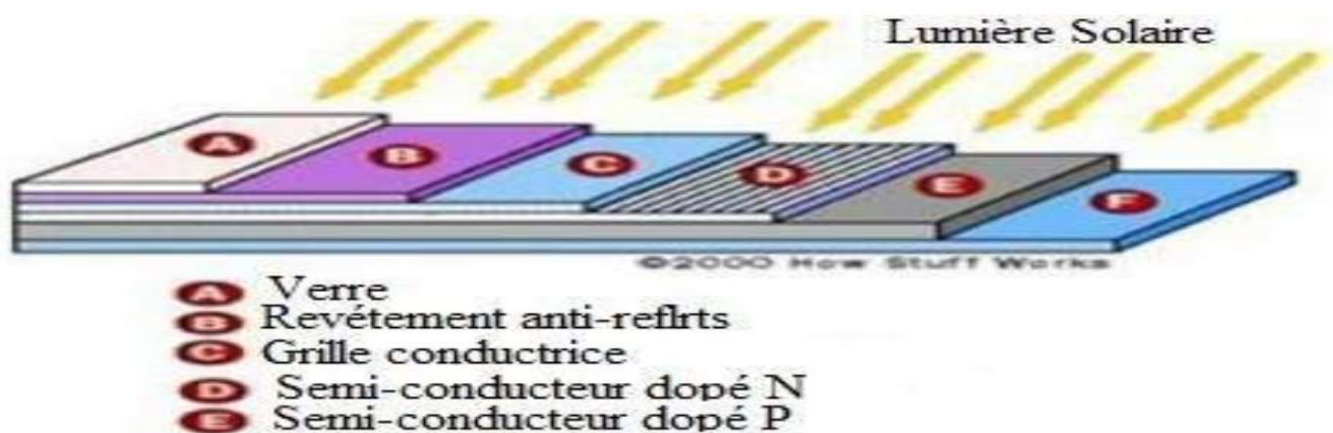


Figure I. 2 : Structure basique d'une cellule solaire.

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. [3].

I.4.3. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque (PV)

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet la conversion directe de l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties séparées par la jonction PN, l'une est dite dopée N présentant un excès d'électrons et l'autre est dite dopée P présentant un déficit en électrons. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement, et la zone initialement dopée P chargée négativement.

Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous vers la zone P. Une jonction (dite PN) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones N et P, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel : le courant électrique circule. [5]

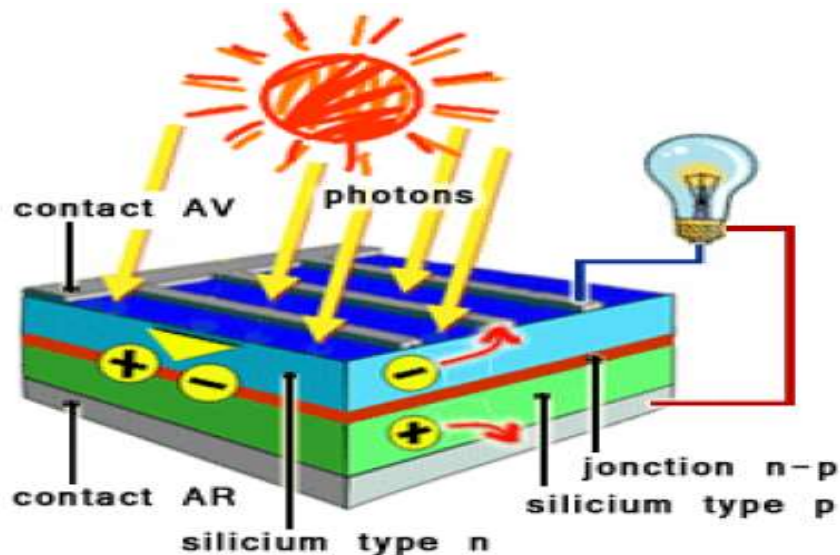


Figure I.3: Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque (PV)

I.4.2 Circuit équivalent et modèle mathématique : [4]

Le modèle mathématique associé à une cellule se trouve à partir de celui d'une jonction PN. On y ajoute le courant I_{ph} , proportionnel à l'éclairement, ainsi qu'un terme modélisant les phénomènes internes.

Le courant I de la cellule s'écrit alors :

$$I = I_{PH} - I_{0d} \cdot \left(e^{\frac{q \cdot (U + R_s \cdot I)}{K \cdot T}} - 1 \right) - \left(\frac{U + R_s \cdot I}{R_{sh}} \right) \quad (I.1)$$

$$I_d = I_{0d} \cdot \left(e^{\frac{q \cdot (U + R_s \cdot I)}{K \cdot T}} - 1 \right) \quad (I.2)$$

Avec :

. I_{ph} : photo courant, ou courant généré par l'éclairement (A)

. I_{0d} : courant de saturation de la diode (A)

. R_s : résistance série

. R_{sh} : résistance shunt

. K : constante de Boltzmann ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$)

. q : charge de l'électron ($q = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C)

. T : température de la cellule (°K)

On peut déduire de cette expression un schéma équivalent, comme le montre la **(figure I.4)**

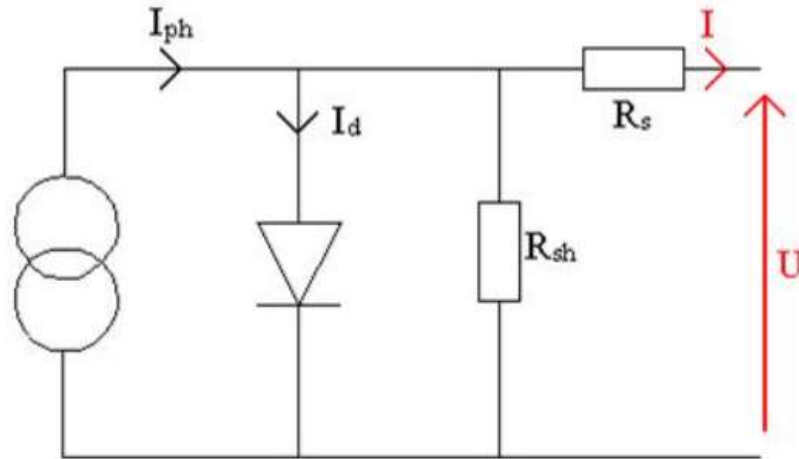


Figure I.4 : schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

- La diode modélise le comportement de la cellule dans l'obscurité. Le générateur de courant modélise le courant I_{ph} généré par un éclairage.

Enfin, les deux résistances modélisent les pertes internes :

- Résistance série R_s : modélise les pertes ohmiques du matériau.
- Résistance shunt R_{sh} : modélise les courants parasites qui traversent la cellule.

Idéalement, on peut négliger R_s et I_d devant U , puis travailler avec un modèle simplifié :

$$I = I_{PH} - I_{0d} \cdot \left(e^{\frac{q \cdot U}{k \cdot T}} - 1 \right) - \frac{U}{R_{sh}} \quad (I.3)$$

Comme la résistance shunt est beaucoup plus élevée que la résistance série, on peut encore négliger le courant dévié dans R_{sh} .

On obtient :

$$I = I_{ph} - I_{0d} \cdot \left(e^{\frac{q \cdot U}{k \cdot T}} - 1 \right) \quad (I.4)$$

Le schéma équivalent de (la figure I.5) correspondant est celui de la cellule idéale :

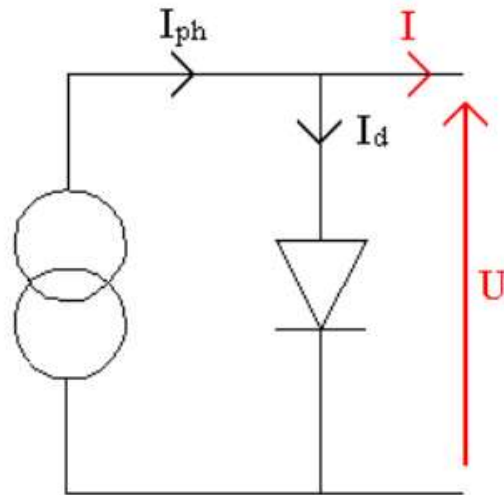


Figure I.5: schéma équivalent simplifié

I.4.4. Paramètres de la cellule photovoltaïque. [6]

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique. Les plus usuels sont les suivantes :

I.4.4.1. Courant de court-circuit (I_{cc})

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle.

Dans le cas idéal (R_s nulle et R_{sh} infinie), ce courant se confond avec le photo-courant I_{ph} dans le cas contraire, en annulant la tension V on obtient :

$$I_{CC} = I_{ph} - I_{od} \cdot \left(e^{\left(q \cdot \frac{R_s \cdot I_{CC}}{n \cdot k \cdot T} \right)} - 1 \right) - \left(\frac{R_s \cdot I_{CC}}{R_{sh}} \right) \quad (I.5)$$

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

$$I_{od} \cdot \left(e^{\left(q \cdot \frac{R_s \cdot I_{CC}}{n \cdot k \cdot T} \right)} - 1 \right) \text{ Devant } I_{ph}. \quad (I.6)$$

L'expression approchée du courant de court-circuit est alors :

$$I_{cc} = \frac{I_{ph}}{1 + \frac{R_s}{R_{sh}}} \quad (I.7)$$

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

I.4.4.2. Tension en circuit ouvert VCO :

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). [6]

$$0 = I_{ph} - I_{od} \cdot \left(e^{\left(q \cdot \frac{V_{PV}}{n \cdot k \cdot T} \right)} - 1 \right) - \left(\frac{V_{PV}}{R_{sh}} \right) \quad (I.8)$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure

$$V_{CO} = V_{th} \cdot \ln \left[\frac{I_{ph}}{I_{od}} + 1 \right] \quad (I.9)$$

I.4.4.3 Point de puissance maximale Pmax:[7]

L'utilisation optimale d'une photopile consiste à faire fonctionner une charge sous la tension maximale et à un courant maximal. En effet, suivant la formule $P=V.I$, pour que P soit maximal : il faut être dans les conditions où le produit $V.I$ est maximale, c'est le point de charge idéal de la photopile, ou point de puissance maximale P_m .

I.4.4.4. Facteur de forme FF :

Le facteur de forme représente l'efficacité de la cellule, il peut nous renseigner sur le vieillissement de la cellule. C'est le rapport entre la puissance maximale que peut fournir une cellule et la puissance qu'il est théoriquement possible d'obtenir (puissance optimale).

$$FF = \frac{P_{\max}}{I_{CC} \cdot V_{CO}} = \frac{I_{\text{opt}} \cdot V_{\text{opt}}}{I_{CC} \cdot V_{CO}} \quad (\text{I.10})$$

I.4.4.5. Rendement énergétique η :

Le rendement de conversion d'énergie est le rapport de la puissance générée et de la puissance du rayonnement solaire incident P_i .

On appelle rendement rapport de la puissance maximale fournie (P_{\max}) sur la puissance du rayonnement solaire incident (P_i) :

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_i} = \frac{I_{\text{opt}} \cdot V_{\text{opt}}}{\Phi \cdot S} \quad (\text{I.11})$$

Avec :

S : Surface de la cellule solaire

Φ : Flux incident.

I.5 Les différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïques)

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par a un rendement et un coût qui lui sont propres.

Cependant, quel que soit le type, le rendement reste assez faible : entre 8 et 23 % de l'énergie que les cellules reçoivent. Actuellement, il existe trois principaux types de cellules [8] :

I.5.1 Les cellules monocristallines : Elles ont le meilleur rendement (de 12 à 18% voir jusqu'à 24.7 % en laboratoire). Cependant, elles coûtent trop chers due à leur fabrication complexe.

I.5.2 Les cellules poly cristallines : Leur conception est plus facile et leur coût de fabrication est moins important. Cependant leur rendement est plus faible : de 11% à 15% jusqu'à 19.8% en laboratoire).

I.5.3 Les cellules amorphes : Elles ont un faible rendement (5% à 8%, 13% en laboratoire), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé.

Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres. L'avantage de ce dernier type est le fonctionnement avec un éclairage faible (même par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment) [8]. Voir (la figure I.6)



Figure I.6 : Différents types de cellules photovoltaïques

I.6 Générateur photovoltaïque [9]

Un générateur photovoltaïque (GPV) est l'association de plusieurs cellules en série et/ou en parallèle. L'association en série des cellules permet l'addition des tensions, par contre l'association en parallèle additionne les courants. L'association série-parallèle permet donc d'atteindre des courants et des tensions désirées afin d'alimenter des charges de grande puissance.

I.6.1 panneau photovoltaïque [5]

Un panneau solaire est un générateur électrique de courant continu constitué d'un ensemble de cellules reliées entre elles, et qui sert de module de base pour les installations photovoltaïques.

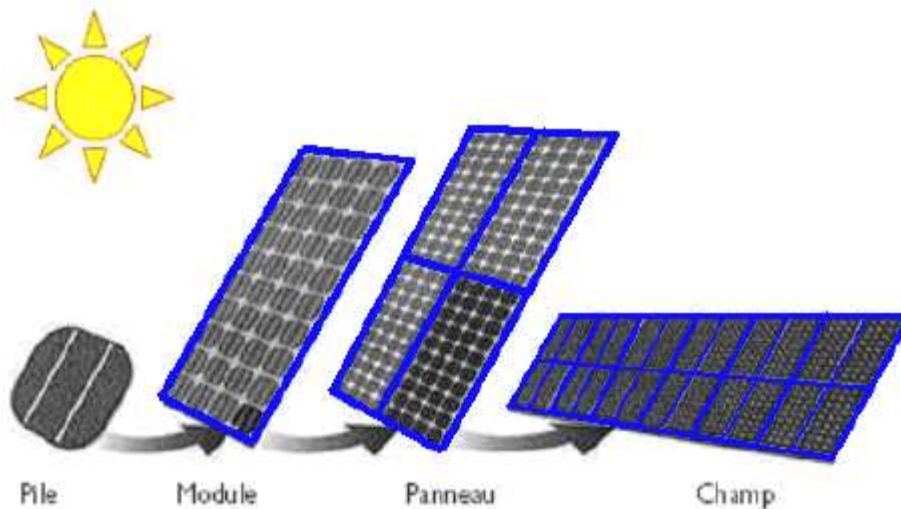


Figure I.7 : Constitution d'un champ photovoltaïque

I.6.2 Caractéristiques électriques d'un panneau solaire : [9]

Un panneau s est connu par deux caractéristiques, la première est la caractéristique I-V non linéaire et possède un seul point optimal qui se trouve au genou de la courbe (I_{ppm}, V_{ppm}), la deuxième est la caractéristique P-V non linéaire aussi et possède un point maximal unique qui se trouve au sommet de la courbe (P_{ppm}, V_{ppm}).

Les Figure I.8 et Figure I.9 présentent respectivement les caractéristiques courant-tension et puissance-tension sous les conditions standard de test ($G=1000\text{w}/\text{m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$).

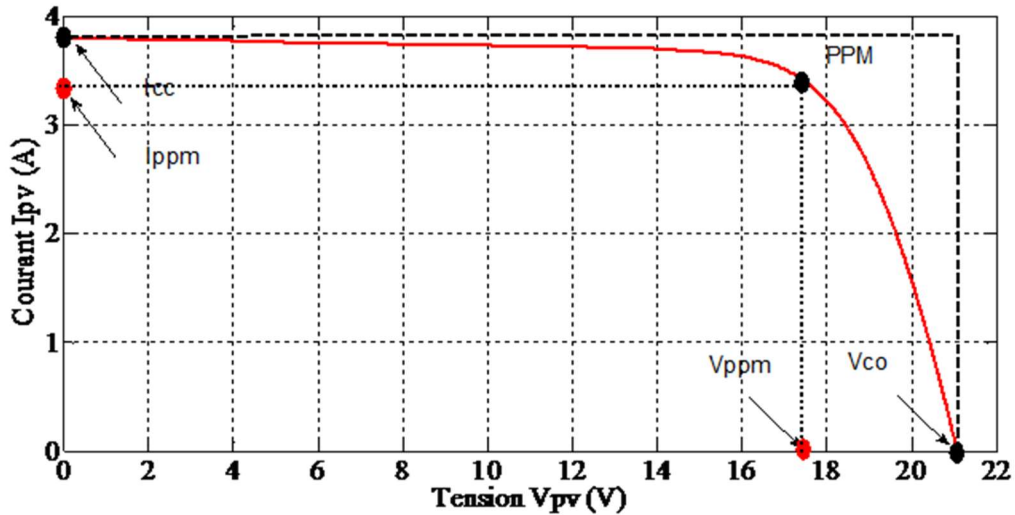


Figure I.8 : Caractéristique courant – tension

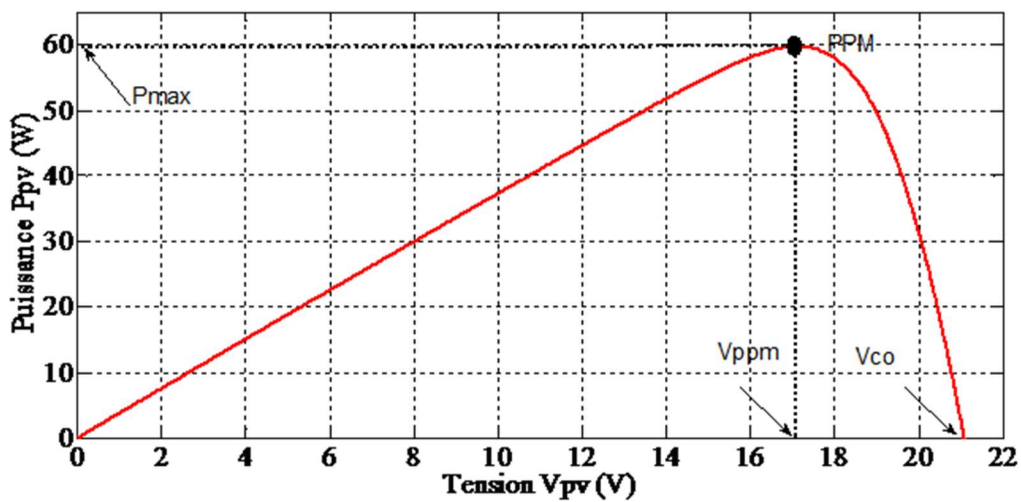


Figure I.9: Caractéristique puissance – tension

I.6.3. Protections classiques d'un GPV :

Lorsque nous concevons un panneau photovoltaïque, nous devons assurer la protection électrique de ce panneau afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leur fonctionnement en cas d'ombrage.

Pour cela, deux types de protections sont classiquement utilisées dans les installations actuelles.

-
- La diode anti-retour empêchant un courant négatif dans les PV. 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 (effet d'ombrage) évitant ainsi l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées. [10]

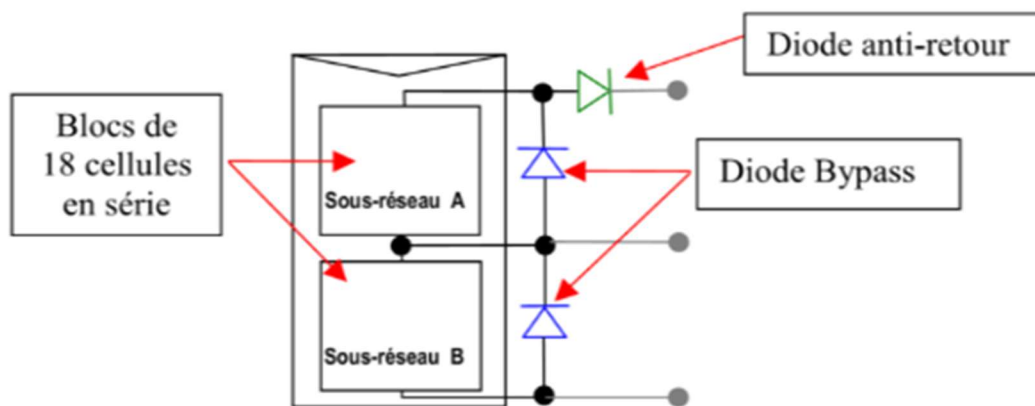


Figure I.10: Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour

I.7 Influence de l'éclairement et de la température : [11]

Les caractéristiques d'un panneau dépendent de l'éclairement et de la température. Selon la technologie du générateur photovoltaïque, les variations des paramètres seront différentes.

I.7.1. Influence de l'éclairement :

Le courant varie directement avec le rayonnement lumineux (la relation est proportionnelle), la tension reste relativement constante.

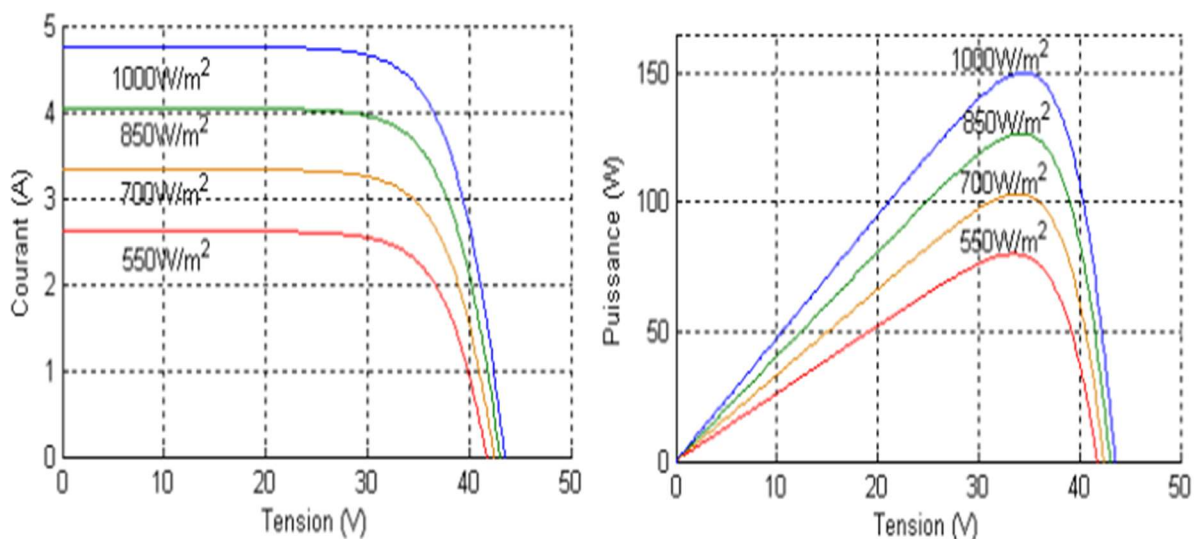


Figure I.11 : Evolution de la caractéristique (I-V) et (P-V) du module en fonction de l'irradiation

On remarque dans la figure (Figure I.11) que le courant optimal est très sensible à l'éclairement. Par contre la tension optimale varie très peu avec l'éclairement.

I.7.2. Influence de la température :

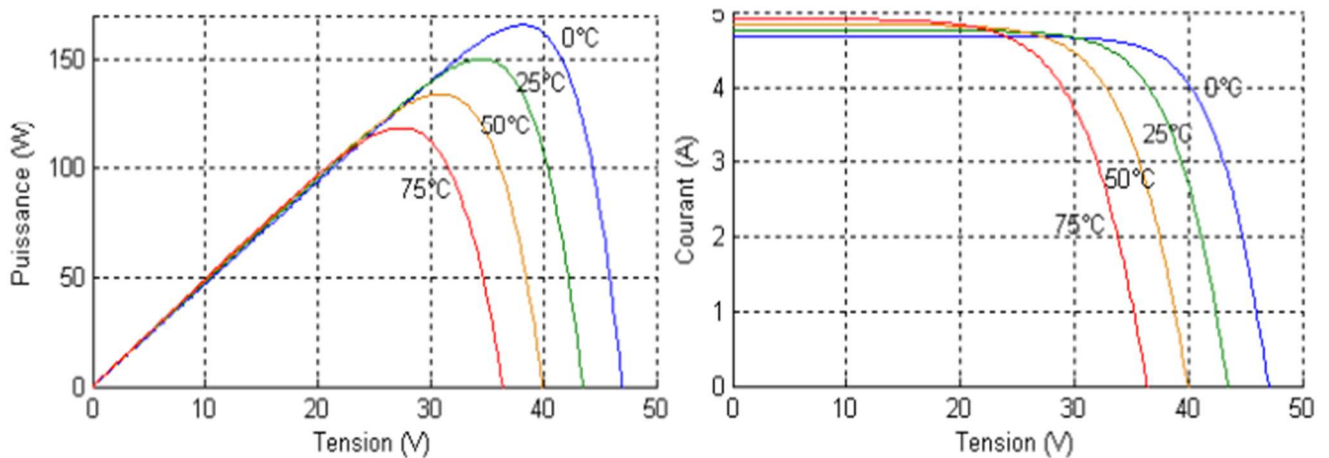


Figure I .12 : Evolution de la caractéristique (I-V) (P-V) du module en fonction de la température

Quand la température diminue, la tension à vide augmente, mais le courant de court-circuit diminue dans des proportions moindres (Figure.I.12).

La diminution du courant de saturation est la principale cause de la chute de courant à basse température. Aussi, on considère en première approximation que le fonctionnement optimal du générateur PV correspond sensiblement à un fonctionnement à tension optimale constante.

I.8. Association des cellules [12].

I.8.1 Association des cellules en série

Si les cellules en série, il permet de connecter un nombre de cellules en série pour augmenter la tension du générateur photovoltaïque.

L'équation (12) résume les caractéristiques électriques d'une association série de N_s cellules.

$$V_{co} = N_s \cdot V_{co} \quad (I.12)$$

Avec :

- V_{co} : la tension du circuit ouvert.
- N_s : Nombres de cellules.

L'association série permet ainsi d'augmenter la tension de l'ensemble et donc d'accroître la puissance de l'ensemble. Les panneaux commerciaux constitués de cellules de première génération sont habituellement réalisés en associant 36 cellules en série.

($V_{co} \cdot N_s = 0.6V \cdot 36 = 21.6V$) afin d'obtenir une tension optimale du panneau V_{op} proche de celle d'une tension de batterie de 12V [12].

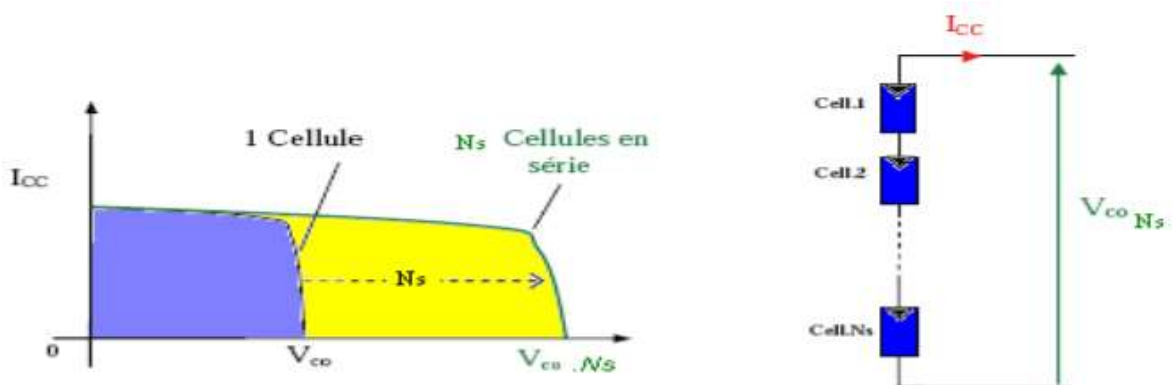


Figure. I.13 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de N_s cellules en série

I.8.2 Association de cellules en parallèle

En revanche, la combinaison en parallèle de N_p cellules est possible et permet d'augmenter le rendement que produit ainsi le générateur. Dans un groupe de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique issue de ce groupe est obtenue par l'addition des courants, (Figure I-14).

L'équation (13) quant à elle résume les caractéristiques électriques de l'association en tandem de N_p cellules. [12]

$$I_{cc} = N_p \cdot I_{cc} \quad (I.13)$$

Avec :

- N_p : Nombre de cellules
- I_{cc} (A) : Le courant de court-circuit

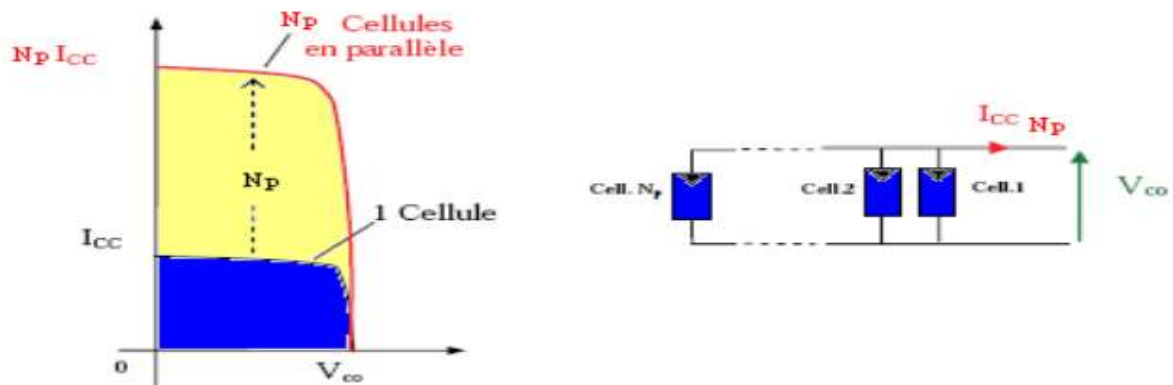


Figure. I.14 : Caractéristiques résultant d'un groupement de N_p cellules en parallèle

I.9. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque [13]

Parmi les avantages de l'énergie photovoltaïque, nous pouvons citer :

- Sa gratuité.
- Pas de pollution.
- Elle a une structure fixe.
- Sa flexibilité (dimensionnement selon les besoins, modularité).
- L'installation ne produit aucun bruit.

Elle possède aussi quelques inconvénients comme :

- Le coût élevé de l'installation.
- Le rendement relativement bas.
- La puissance est réduite lorsque les conditions climatiques sont défavorables (Nuages).

-
- Le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire pour une installation autonome et polluante.

Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons rappelé ce qu'est une énergie solaire en générale. Nous essayé de montrer que l'énergie photovoltaïque est l'énergie la plus intéressante car elle est disponible avec un immense potentiel. Ce potentiel favorise sons utilisation pour l'alimentation électrique, en particulier les sites isolés dans les diverses régions mondiales. Nous avons aussi détaillé le principe de la cellule photovoltaïque afin de mieux comprendre l'ensemble du mécanisme de conversion en énergie électrique.

Chapitre II : Les Convertisseurs DC-DC électroniques et les techniques MPPT

II.1 Introduction

L'énergie issue d'un système photovoltaïque n'est pas automatiquement adaptée à la charge. Donc, un étage d'adaptation, comprenant un ou plusieurs convertisseurs statiques, permet de transformer les grandeurs électriques continues en grandeurs adaptées à celle-ci. En générale, cet étage est contrôlé par une MPPT qui permet de faire fonctionner le générateur photovoltaïque de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance.

Les convertisseurs DC-DC sont des dispositifs électroniques fondamentaux dans le domaine de l'électronique de puissance. Leur rôle principal est de convertir une tension continue (DC) d'un niveau à un autre, en maintenant la même forme d'onde. Cette conversion est cruciale dans de nombreuses applications où des niveaux de tension différents sont nécessaires pour alimenter des dispositifs électriques et électroniques.

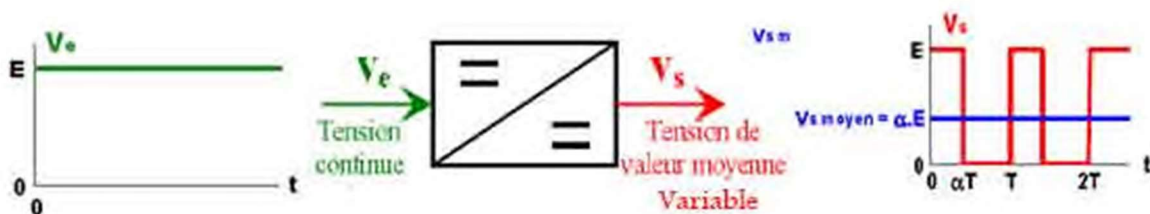


Figure II.1 : Principe de base d'un hacheur

Nous présenterons dans ce chapitre les différents types des convertisseurs statiques (DC-DC) qu'on peut utiliser dans le système photovoltaïque. Premièrement, on commence par la chaîne de conversion GPV et les différentes manières de connexion et ensuite les convertisseurs (DC-DC) et ses différents types, et la présentation de quelques méthodes MPPT basées sur réaction de puissance, comme l'algorithme de méthode de perturbation et observation, la méthode d'incrément de l'inductance, la logique floue et MPPT avec les réseaux de neurones artificiels.

II.2. La chaîne de conversion GPV

Nous pouvons coupler le générateur photovoltaïque à sa charge de plusieurs manières. La manière la plus simple consiste en le couplage direct en ajoutant une simple diode dite diode anti-retour pour éviter le courant inverse. Une autre manière plus sophistiquée existe et consiste en l'ajout des convertisseurs statiques pouvant intégrer des lois de commande très complexes entre la source et la charge.

II.2.1. Connexion directe

La connexion directe du panneau solaire photovoltaïque à une charge est le principe de fonctionnement le moins cher et le plus répandu. Le point de fonctionnement du (GPV) dépend de l'impédance de la charge à laquelle il est connecté, il résulte de l'intersection entre la caractéristique (I-V) du (GPV) et la caractéristique I-V de la charge. En plus, pour éviter la circulation d'un courant négatif vers le GPV, une diode anti-retour doit être placée comme le montre la figure II.2 [14]

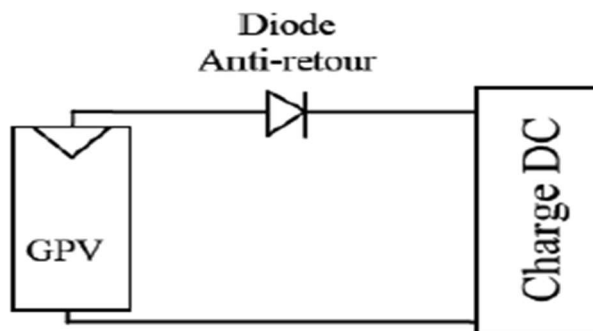


Figure II.2 : Connexion directe GPV-Charge

Cette configuration n'offre aucun type de limitation et/ou de réglage de la tension de la charge. Le transfert de la puissance maximale disponible aux bornes du GPV vers la charge n'est pas donc garanti, comme l'illustre la figure (II.3)

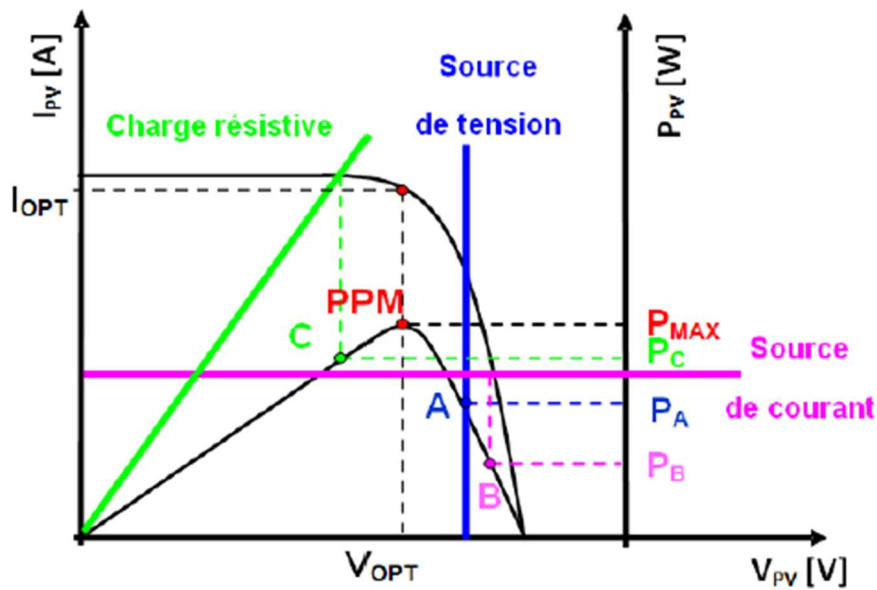


Figure II.3 Points de fonctionnement d'un GPV en fonction de la charge en connexion directe.

D'après la Figure II.3 trois types de charges peuvent être connectées directement à un GPV :

- une charge de type source de tension continue,
- une charge de type source de courant continue,
- une charge purement résistive. [14]

Pour les points de fonctionnement A, B et C, la puissance fournie par le générateur est respectivement P_A , P_B et P_C de valeurs inférieures à la puissance maximale P_{MAX} . La différence de puissance sera donc perdue et dissipée dans le générateur sous forme de chaleur.

D'autre part, certains types de charges ont besoin d'une source de tension alternative, or le GPV fournit un courant continu, la connexion directe est donc impossible dans ce cas.

L'utilisation de la connexion directe est donc limitée, vu les pertes de production qu'elle entraîne et les limites de ses applications à des récepteurs fonctionnant en courant continu. [14]

II.2.2-Connexion à travers un étage d'adaptation

Dans le couplage direct, on peut trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur PV et celle réellement transférée à la charge. Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible, on utilise un étage d'adaptation comme interface entre le GPV et la charge comme décrit dans la figure II-4. [9]

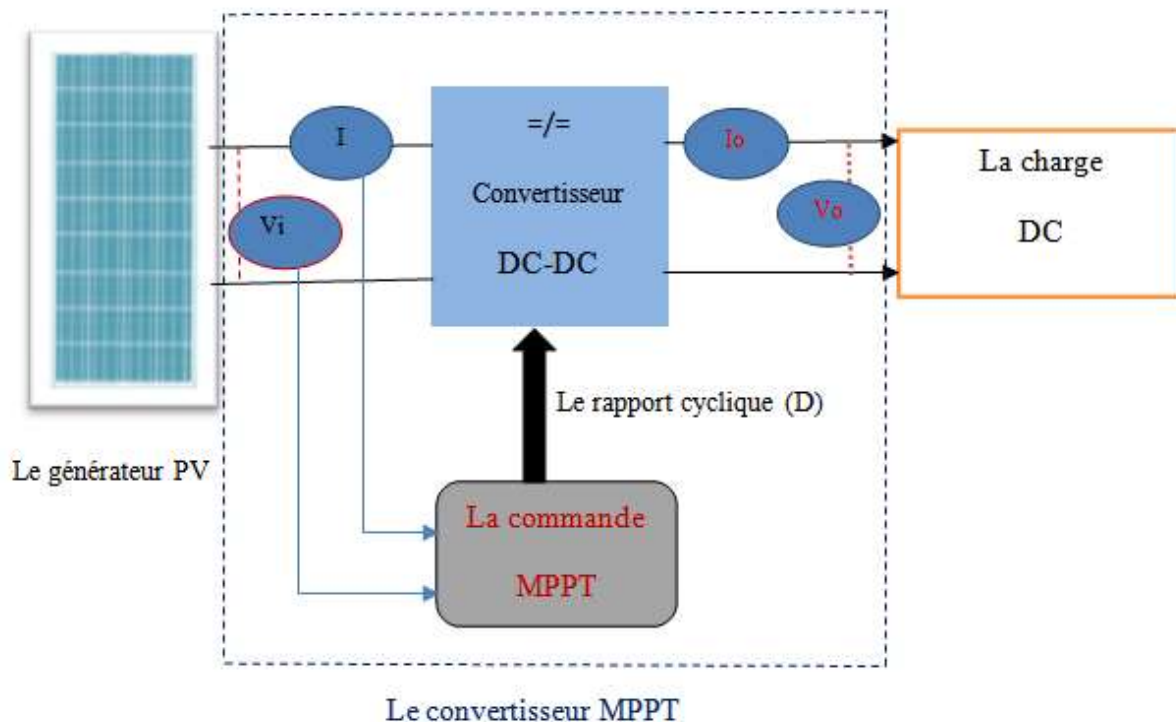


Figure II.4: Etage d'adaptation entre un GPV et une charge.

L'étage d'adaptation d'impédance est soit :

- Un convertisseur DC/DC si la charge est de type continu, on s'intéresse juste aux hacheurs sans isolation galvanique qui sont dépourvus de transformateur tels que :
 - Hacheur dévolteur ou abaisseur de tension (Buck).
 - Hacheur survolteur ou élévateur de tension (Boost).
 - Hacheur abaisseur-élévateur de tension (Buck-Boost).

Ou d'un convertisseur à deux étages (DC/DC + DC/AC) si la charge est de type alternatif. [9]

II.3-les différents types de convertisseurs DC-DC:

Le rôle du convertisseur DC-DC est de faire l'adaptation entre le GPV et une charge DC pour avoir un transfert de puissance maximal. Le point de fonctionnement est donc maintenu au voisinage du PPM quelles que soient les conditions de fonctionnement (ensoleillement, température, variation de charge, etc.). [15]

II.2.1 Convertisseur Buck

Un convertisseur dévolteur Buck, élément appelé régulateur à découpage Buck ; est un dispositif DC-DC qui abaisse la tension d'entrée pour produire une tension de sortie plus basse.

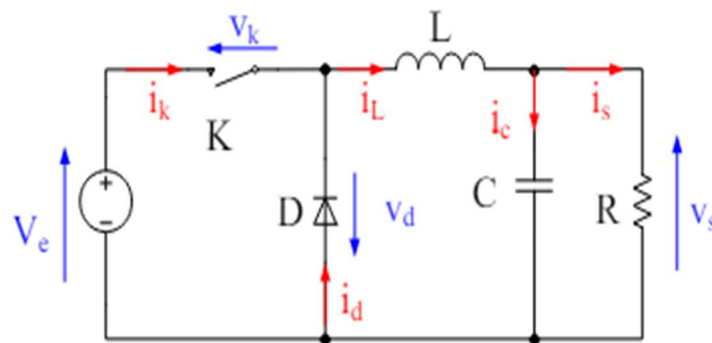


Figure II.5 : Schéma du convertisseur Buck

- **Principe de fonctionnement**

α : le rapport cyclique des impulsions qui commandent l'interrupteur.

T_e : étant la période des impulsions.

- Pendant la durée $[0, \alpha T_e]$ l'interrupteur est fermé,

L'interrupteur est commandé à la fréquence de découpage $f_e = 1/T$ de la source V_e fournit de l'énergie à la charge et à l'inductance.

- Pendant le temps $t \in [\alpha T_e, T_e]$ l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D . La tension à ses bornes est donc nulle.

Les chronogrammes (tracés dans le cas idéal) de la Figure II.6 sont tracés dans le cas d'une conduction continue. [15]

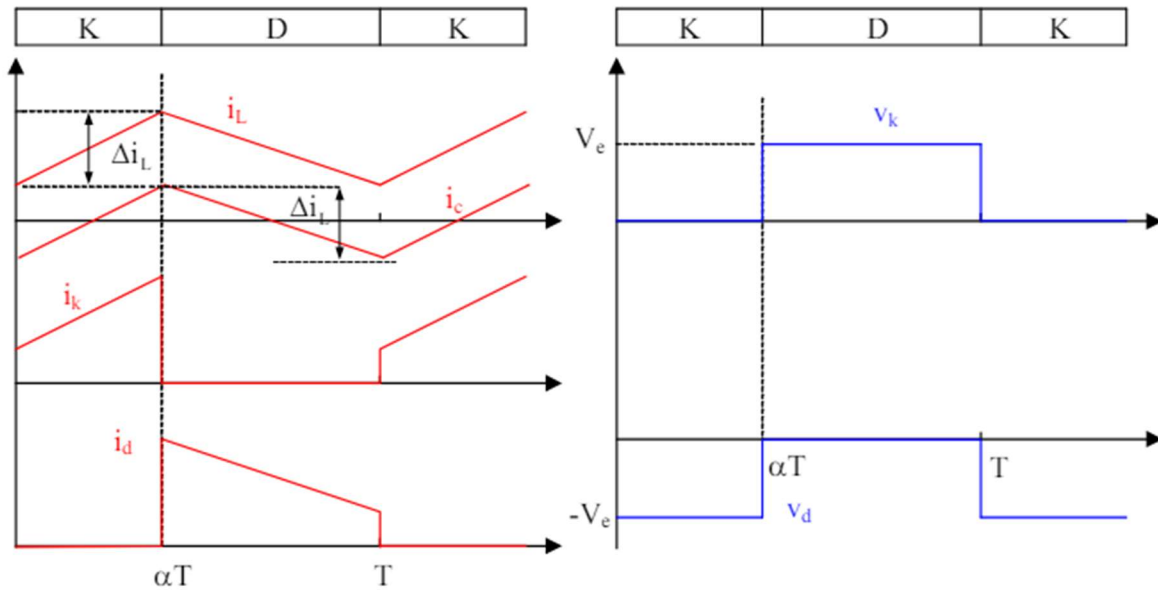


Figure II.6 : Formes d’ondes du convertisseur Buck (courants à gauche, tension à droite)

II.2.2 Convertisseur Boost

Le convertisseur Boost, également connu sous le nom d’hacheur sur élévateur, est un dispositif conçu pour augmenter la tension d’entre continue à un niveau beaucoup plus élevé en sortie. Il prend une tension continue d’entrée et fournit une tension continue de sortie un niveau supérieure. [16]

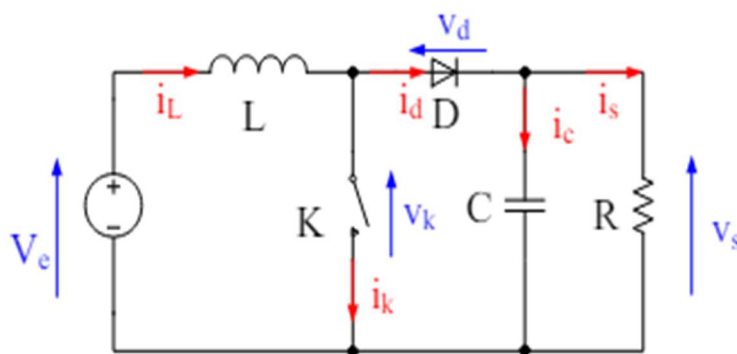


Figure II.7– Schéma du convertisseur Boost

- **L'analyse de circuit :**

Dans ce schéma, l'interrupteur K est insère en série entre la tension d'entre continue V_e et l'inductance L ceci applique que la diode D fonctionne alternativement avec l'interrupteur.

- Pendant l'intervalle de temps $[0, \alpha T]$ ou K est fermée et D bloquée, le courant I_L travers l'inductance augmenter de manière linéaire. Pendant cette phase, l'énergie est stockée dans l'inductance L

L'équation de courant de l'inductance est donnée comme suite :

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{U_L}{L} = \frac{V_e}{L} \quad (\text{II.14})$$

- Dans la phase $[\alpha T, T]$ lorsque l'interrupteur k est ouvert et la diode D est passant l'inductance se trouve en série avec la source de tension, augmente la tension total cela entraine un transfert d'énergie stocke dans l'inductance vers la capacité.

Nous étudierons, ici le mode conduction continu pour déduire le rapport entre l'entrée et la sortie en fonction du rapport cyclique : **[16]**

$$\langle UL \rangle_T = \frac{1}{T} \int_0^T UL dt = 0 \quad (\text{II.15})$$

$$\frac{1}{T} \left[\int_0^{\alpha T} V_e dt + \int_{\alpha T}^T (V_e - V) dt \right] = 0 \quad (\text{II.16})$$

$$\frac{1}{T} [(V_e)(\alpha T - 0) + (V_e - V)(T - \alpha T)] = 0 \quad (\text{II.17})$$

$$V_e - V(1 - \alpha) = 0 \quad (\text{II.18})$$

Le rapport cyclique est alors de cette forme :

$$M(\alpha) = \frac{V}{V_e} = \frac{1}{1 - \alpha} \quad (\text{II.19})$$

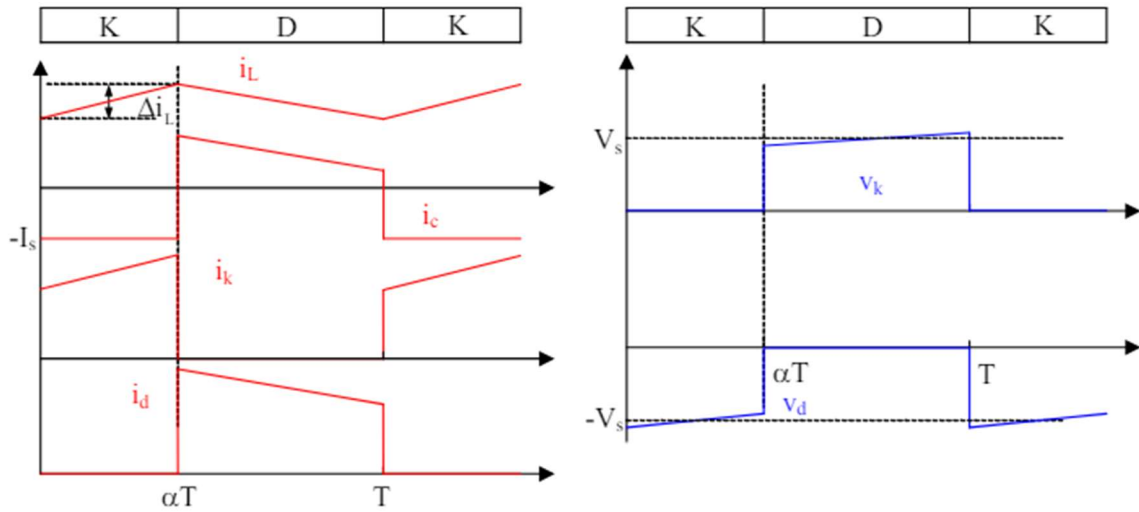


Figure II.8 : Formes d'ondes du convertisseur BOOST (courants à gauche, tension à droite)

II.2.3 Convertisseur Buck-Boost

Un convertisseur Buck-Boost est un circuit électronique qui combine les fonctionnalités des convertisseurs Buck et Boost. Il peut abaisser ou élever une tension électrique en fonction de besoins, ce qui fait un dispositif polyvalent pour réguler la tension. [16]

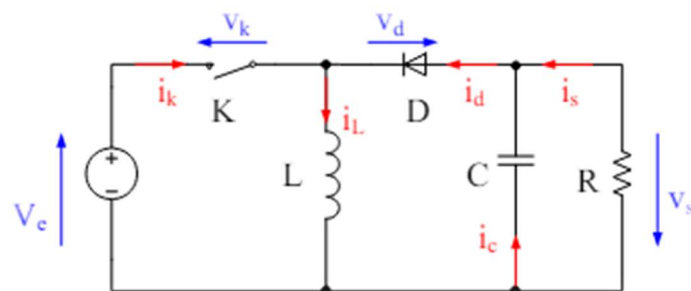


Figure II.9– Schéma du convertisseur Buck- Boost

À la fin de l'état passant, le courant I_L augmenté de :

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_e}{L} \quad (\text{II.20})$$

L'Etat bloqué, on a :

$$U_L = -V \quad (\text{II.21})$$

En régime permanent la valeur moyenne de la bobine L est nulle :

$$\langle U_L \rangle_T = \frac{1}{T} \int_0^T U_L dt = \frac{1}{T} \left[\int_0^{\alpha T} V_e dt + \int_{\alpha T}^T (-V) dt \right] = 0 \quad (\text{II.22})$$

$$\frac{1}{T} [(V_e)(\alpha T - 0) + (-V)(T - \alpha T)] = V_e \alpha - V(1 - \alpha) = 0 \quad (\text{II.23})$$

Le rapporte cyclique (α) obtenue est :

$$M(\alpha) = \frac{V}{V_e} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (\text{II.24})$$

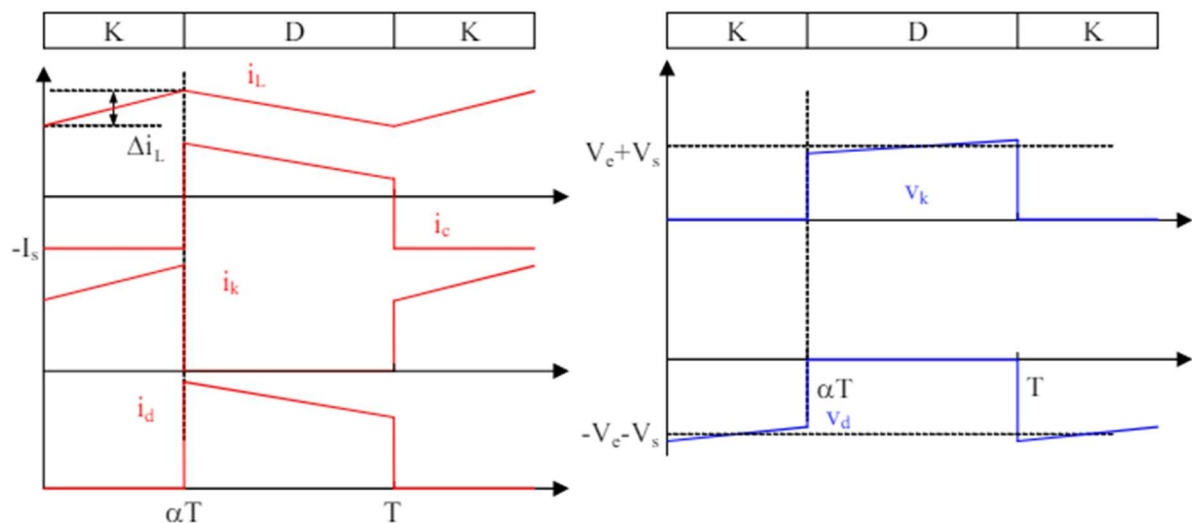


Figure II-10 : Formes d'ondes du convertisseur Buck-Boost (courants à gauche, tension à droite)

II.3 La Commande MPPT

La commande MPPT (maximum power point tracking) est cruciale pour optimiser le fonctionnement des systèmes photovoltaïques, elle vise à maximiser la puissance extraite des panneaux solaires en ajustant automatiquement le rapport cyclique α .

Ce rapport cyclique est modifié pour trouver et maintenir le point de puissance maximale (MPP) du panneau PV, même lorsque les conditions d'ensoleillement et de température changent.

II.3.1 Les techniques MPPT

Le régulateur MPPT permet d'optimiser le rendement des panneaux solaires jusqu'à 30% : pour un panneau photovoltaïque donné, les batteries recevront 30% d'électricité en plus par rapport à un régulateur solaire classique [13]

II.3.1.1 Perturbation et Observation (P&O) : [13]

Elle consiste à perturber le système en modifiant le rapport cyclique α , ce qui provoque une augmentation ou une diminution de la tension à chaque instant k , les variations de puissance et de tension sont observées et comparées à celles de l'instant précédent ($k-1$) si la puissance augmente, cela indique une approche de MPP et la perturbation continue dans la même direction, si la puissance diminue, cela indique un éloignement de MPP et la direction de la perturbation est inversée. Ce cycle permet d'ajuster constamment la tension pour maximiser la puissance délivrée par PV.

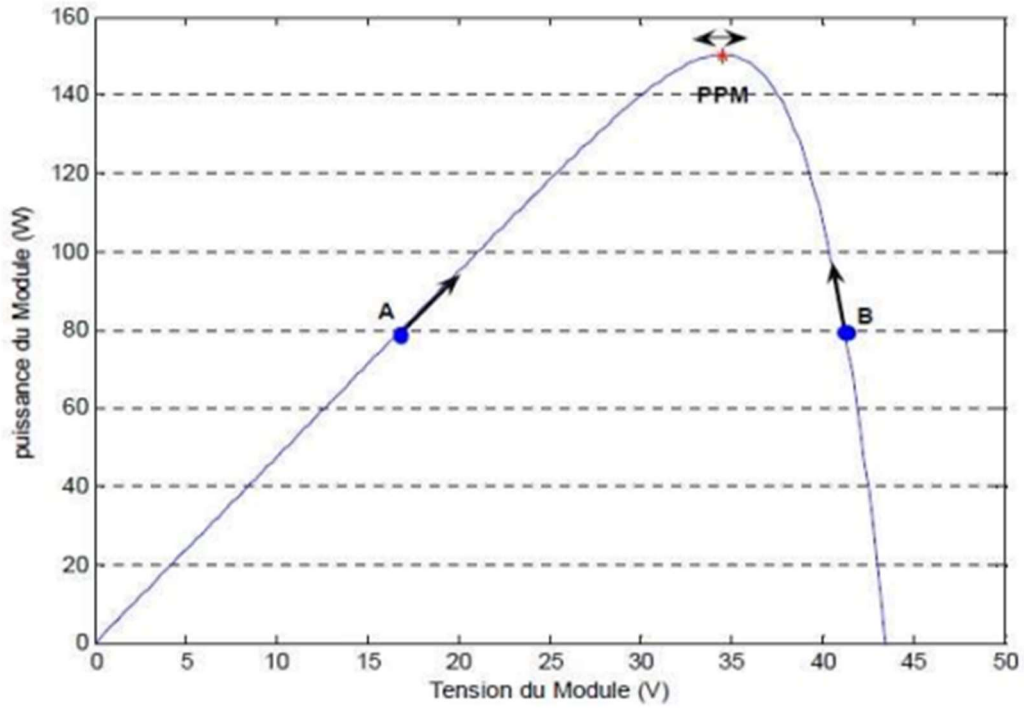


Figure II.11: Le fonctionnement de l'algorithme PO

L'algorithme peut être représenté mathématiquement par l'expression : **[16]**

$$V(K) = V(K - 1) + \Delta V \cdot \text{sign}\left(\frac{dP}{dV} \mid v = v_n - 1\right) \quad (\text{II.25})$$

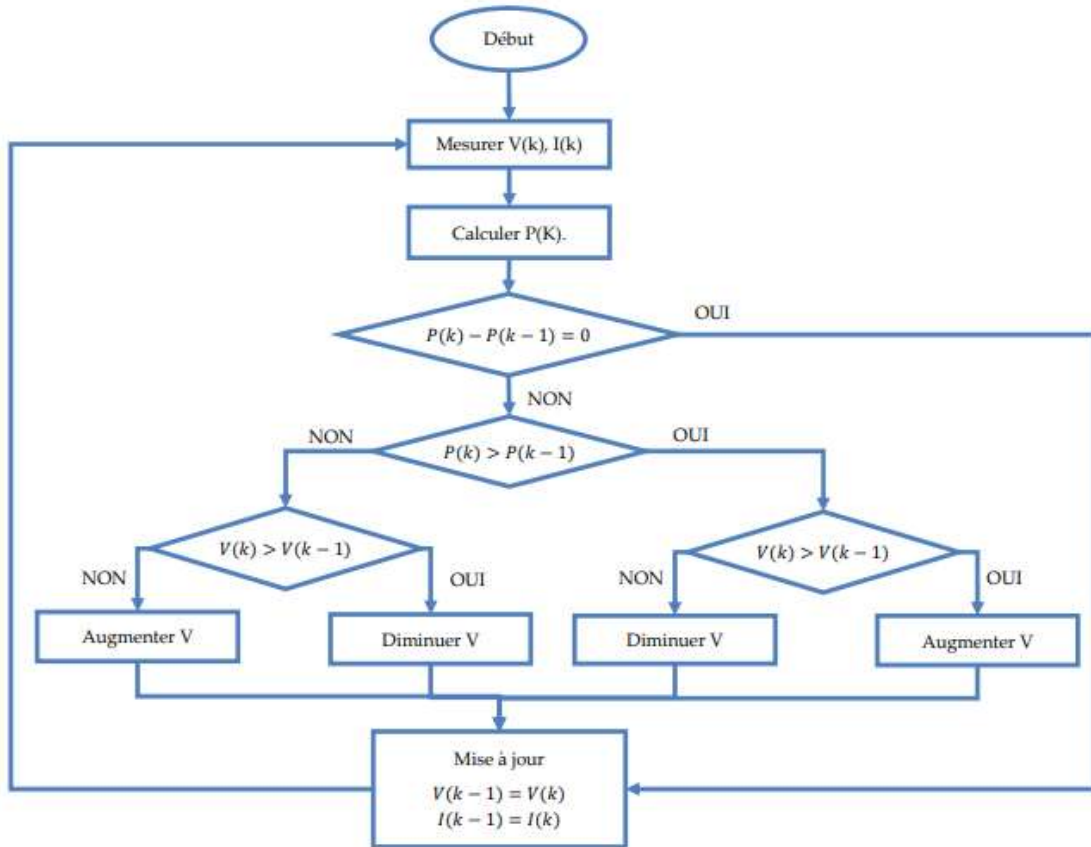


Figure II.12: Organigramme de l’algorithme de P&O

II.3.1.2 Incrémentation de la conductance (INC) : [16]

Il s’agit là d’une technique de suivi du point de puissance maximale (MPP) des systèmes photovoltaïques, elle repose sur l’analyse de la variation de la conductance du générateur photovoltaïque (GPV), définie comme le rapport entre le courant (i) et la tension (v) du GPV

$$G = \frac{i}{v} \quad (\text{II.26})$$

Son algorithme utilise la variation de la puissance du module photovoltaïque (P_{pv}) en fonction de la tension (V_{pv}) pour déterminer la position du point de fonctionnement par rapport au MPP en compare ces variations, l’algorithme ajuste continuellement le

point de fonctionnement pour atteindre le MPP, maximisant ainsi la puissance extraite du module (PV)

Si $dP/dV > 0$, le point de fonctionnement est à gauche de MPPT.

Si $dP/dV = 0$, le point de fonctionnement est sur le MPPT.

Si $dP/dV < 0$, le point de fonctionnement est à droite de MPPT

En réécrivant l'équation de la dérivée de la puissance (dP/dV) peut être décrit par l'équation suivante :

$$\frac{dp}{dv} = \frac{d(v \cdot i)}{dv} \quad (\text{II.27})$$

Cette équation selon la règle du produit peut être réécrite :

$$\frac{dp}{dv} = i \frac{dv}{dv} + v \frac{di}{dv} = i + v \frac{di}{dv} = 0 \quad (\text{II.28})$$

$$\frac{di}{dv} = -\frac{i}{v} \quad (\text{II.29})$$

Donc:

Si $di/dv > -i/v$, le PF est à gauche de MPPT.

Si $di/dv = -i/v$, le PF est sur le MPPT.

Si $di/dv < -i/v$, le PF est à droite de MPPT.

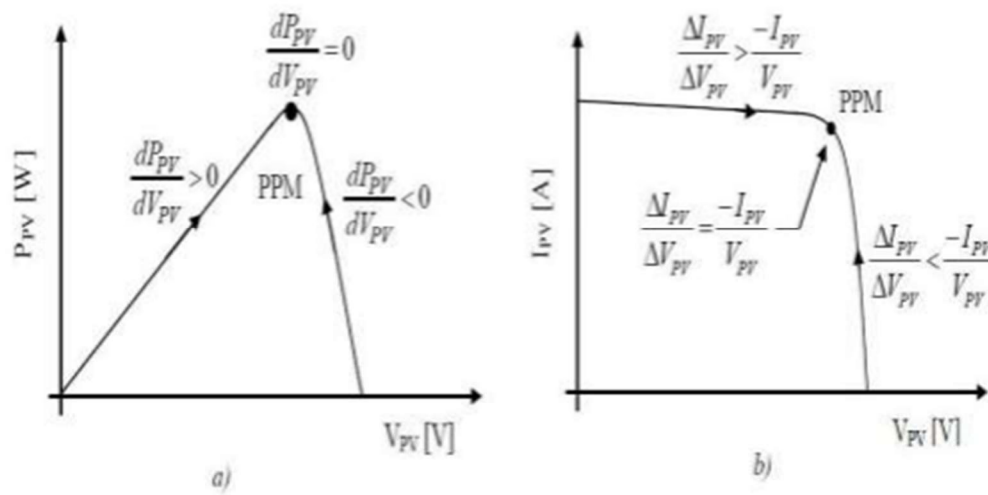


Figure II.13: Positionnement du point de fonctionnement

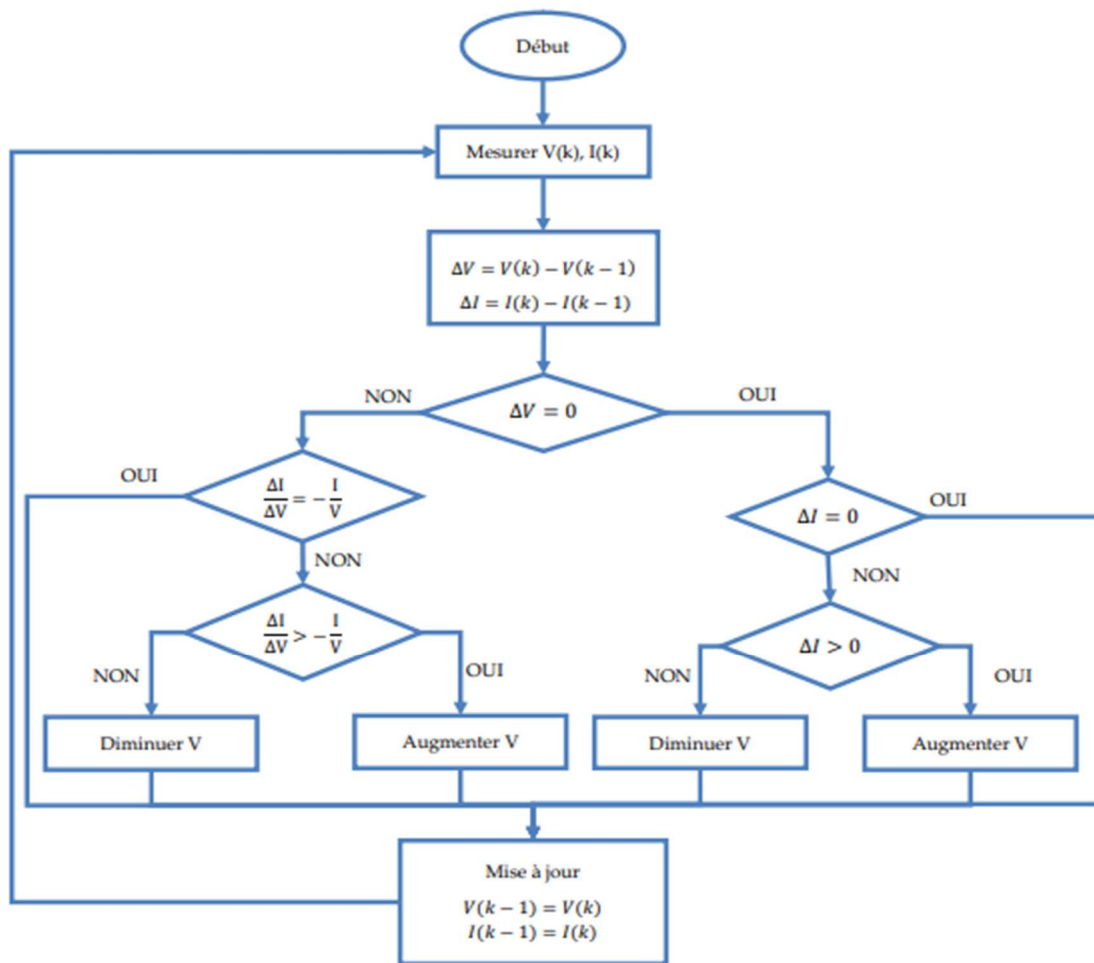


Figure II.14. Organigramme de l'algorithme de INC

Les avantages et les inconvénients. [17]

- Avantage :

- Structure de régulation simple.
- Nombre des paramètres mesurés réduit.

- Inconvénients :

- Dépassement du point maximum optimal en cas de changement rapide des conditions atmosphériques

II.3.1.3 Incrémentation de conductance modifiée (MIC) :

La technique INC conventionnelle a été améliorée par Fangrui en introduisant le calcul du pas d'incrément/décément, ce qui a permis d'optimiser la recherche du point de puissance maximale. Toutefois, cette technique est aussi basée sur le fait de satisfaire l'équation $dP/dV = 0$ pour atteindre le point de puissance maximale, ce qui n'est pas toujours accompli en conditions réelles. [18]

II.3.1.4 La logique floue

La commande floue est classée parmi les plus utilisées grâce à l'évolution des microcontrôleurs. Elle se distingue par sa capacité à fonctionner avec des entrées peu précises, en décomposant les variations des variables réelles en variables linguistiques avec des fonctions d'appartenance pour chaque variable, cette approche est idéale pour l'optimisation du point de puissance maximale (MPP) elle s'appuie sur deux critères d'entrée observés en temps réel : l'écart (E) par rapport à la valeur cibles ($E=0$) et la variation de l'erreur (CE), qui indiquent le sens et la vitesse de convergence la sortie de cette analyse, une variation du rapport cyclique, ajuste le convertisseur statique pour atteindre et maintenir le MPP. [16]

Les deux entrées de contrôleur sont définies par les équations suivantes :

$$E(k) = \frac{P(k) - P(k - 1)}{V(k) - V(k - 1)} \quad (\text{II.30})$$

$$\Delta E(k) = E(k) - E(k - 1) \quad (\text{II.31})$$

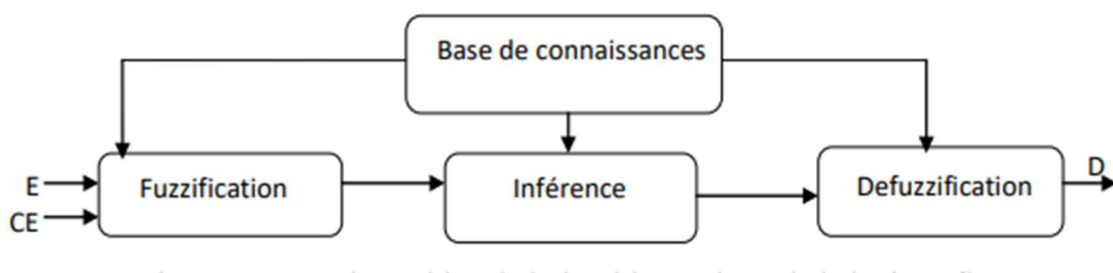


Figure II.15: Schéma bloc de l'algorithme à base de la logique floue

La commande floue pour le suivi du point de puissance maximale (MPP) dans les systèmes photovoltaïques passe par trois étapes :

- **Fuzzification** : cette étape consiste à convertir les variables réelles en variables floues les variables floues peuvent prendre cinq valeurs :

NB : Negative Big (grand negative)

NS : Negative Small (petit negative)

ZE : Zero

PS : Positive Small (petit positive)

PB : Positive Big (grand positive)

- **Inférence** : cette étape établit une relation logique entre les entrées et la sortie à travers des règles d'appartenance. Ces règles formulées en utilisant la méthode

de Mamdani, suivent une structure du type IF AND ...THEN pour déterminer la réponse appropriée en fonction des valeurs.

- **Defuzzification** : enfin, cette étape converti la sortie floue en une valeur réelle la méthode du centroïde est utilisé pour calculer la variation de sortie ($\Delta\alpha$), considérée comme le barycentre de la fonction d'appartenance floue résultante.

Ces étapes permettent d'ajuster le convertisseur statique de manière optimale pour atteindre et maintenir le MPP. La structure de base de la commande logique floue est illustrée dans la Figure II.15

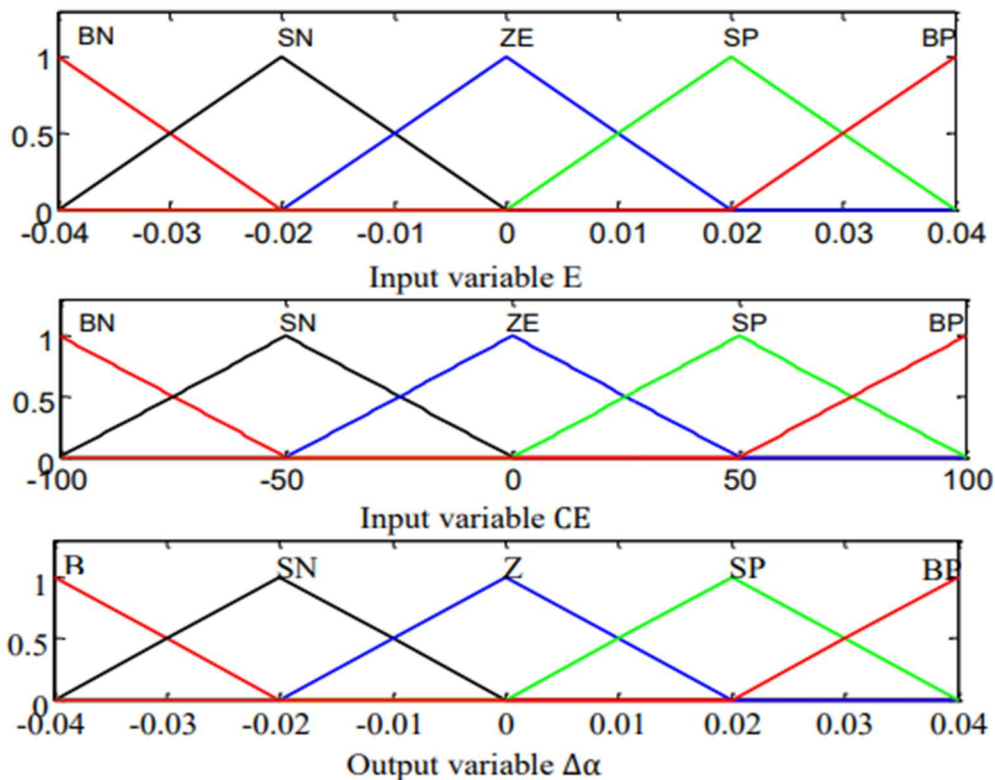


Figure II.16 : Fonctions d'appartenance des variables d'entrée et de sortie

- "Si E est BP et CE est ZE Alors $\Delta\alpha$ est BN".

Ce qui veut dire que :

"Si le point de fonctionnement est loin du point de puissance maximale (PPM) vers le côté gauche, et le changement de la pente de la courbe $P = (V)$ est environ Zéro.

Alors il faut diminuer le rapport cyclique $\Delta\alpha$ largement". [16]

La figure suivante montre le principe de MPPT avec la logique floue :

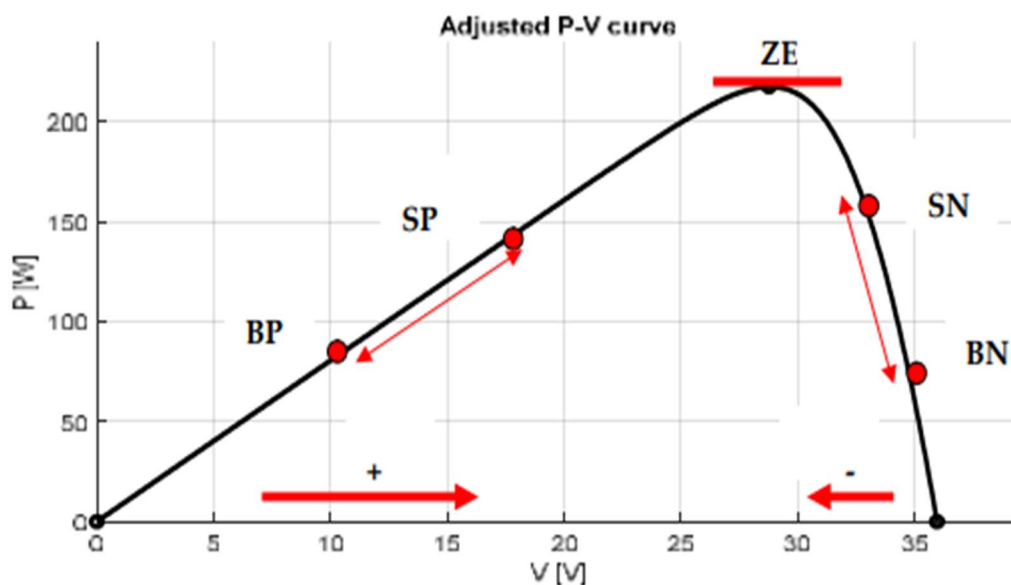


Figure II.17: Principe de MPPT floue

II.3.1.5. MPPT avec les réseaux de neurones artificiels

Les réseaux de neurones, artificiels souvent appelés ANN (artificiel neural networks : en anglais) sont une forme spécifique d'algorithme d'apprentissage automatique qui tente de reproduire la fonction et la structure des réseaux neuronaux biologique présente dans le cerveau humain. Ils sont conçus pour relier divers paramètres à des points de données particuliers sans nécessiter d'équations mathématiques ou de bases mathématiques complexes. [19]

L'idée derrière ce processus est de collecter un ensemble d'entrées et leurs sorties correspondants, puis d'enseigner à ANN comment les traiter comme une boîte noire. À ce moment-là, il doit être capable de prédire une sortie désire à partir d'un ensemble différent d'entrées qui n'ont pas contribué pendant la phase d'apprentissage. Cette

capacité de prédictions a inspiré l'utilisation des ANN dans différents domaines et suggère des solutions de nombreux problèmes, ce qui a inspiré un nombre significatif de chercheurs à travailler sur ANN avec des techniques MPPT. [20]

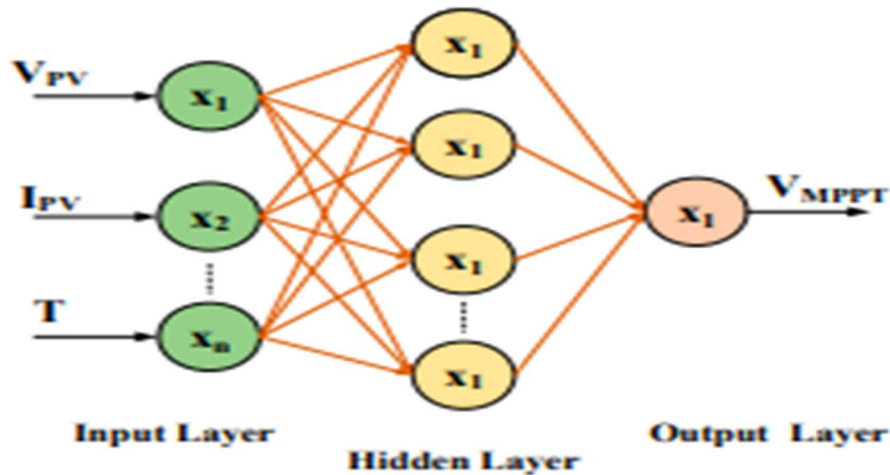


Figure II.18 la conception fondamentale d'un ANN a deux couches

L'efficacité des réseaux de neurones artificiels dans l'identification des systèmes et les contrôles adaptatifs les rend bien adaptés aux applications des systèmes photovoltaïques, en particulier dans la recherche du point de puissance maximale, un réseau de neurones perceptuels à plusieurs couches formées par l'algorithme d'apprentissage par retro propagation est la technique la plus utilisée dans les applications d'ingénierie.

Un premier réseau multicouche a été développé pour estimer le courant et la tension optimaux au point de puissance maximale (MPP) en tenant compte de la variation de l'irradiation et de la température ambiante, et un deuxième réseau multicouche pour estimer le cycle périodique qui ajuste le commutateur du convertisseur DC-DC. [21]

Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, nous avons étudié la chaîne de conversion GPV. Les convertisseurs DC-DC et plusieurs techniques de suivi du point de puissance maximale utilisées dans les systèmes photovoltaïques. Les convertisseurs DC-DC sont essentiels pour ajuster les niveaux de tension et de courant, maximisant ainsi l'efficacité énergétique des panneaux solaires.

Chapitre III : Modélisation de batterie et résultat de Simulation de la chaine PV

III.1.Introduction

Dans ce chapitre, nous étudions la batterie et simulons un système photovoltaïque intégrant la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) de type « Perturbation et Observation » (P&O). De plus, nous explorons le contrôle bidirectionnel de charge et décharge de la batterie.

La commande MPPT P&O est utilisée pour maximiser la puissance extraite des panneaux solaires en ajustant continuellement la tension et le courant afin de suivre le point de puissance maximale. Le contrôle bidirectionnel permet à la batterie de stocker l'excédent d'énergie et de fournir de l'énergie lorsque la production solaire est insuffisante, assurant ainsi une gestion efficace de l'énergie.

L'objectif de ce chapitre est de démontrer comment cette combinaison technologique améliore l'efficacité, la stabilité et la flexibilité du système photovoltaïque, même sous des conditions d'irradiation variables.

III.2. Batterie Solaire :

III.2.1. Définition :

Une installation photovoltaïque autonome (dite aussi site isolé) comporte une ou plusieurs batteries pour stocker l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques. Ces batteries spécifiques sont appelées "batterie à décharge lente" (ou pour simplifier batterie solaire). Ces batteries sont conçues pour restituer un courant stable pendant de longues périodes en conservant leurs aptitudes à la recharge, et ceci à un grand nombre de reprises (cycles), on parle de batteries stationnaires ou à décharge lente. [22]

III.2.2. Constitution d'une batterie :

Une batterie solaire comporte des électrodes positives et négatives composées d'alliages dissemblables plongées dans un électrolyte (acide). L'ensemble est encapsulé dans un bac scellé ou muni d'un bouchon de remplissage et d'un évent. Les réactions d'oxydoréduction, qui gouvernent le fonctionnement d'une batterie sont réversibles, dans la mesure où celle-ci n'a pas été longtemps ni complètement déchargée, ni trop surchargée. Un fonctionnement prolongé dans l'un ou l'autre de ces états aboutirait à la

destruction des capacités de la batterie. Il existe des batteries solaires fonctionnant en 2 Volts, 6 Volts ou 12 Volts (tension nominale), dont la capacité (en Ampères heure) est inversement proportionnelle à la tension : les batteries ayant la capacité de stockage la plus élevée sont les batteries 2V. Ces batteries sont différenciées par la géométrie des plaques positives (planes ou tubulaires) et par la forme de l'électrolyte (liquide, gel). [22]

III.2.3. Exemples de Batteries [23]

- **Les batteries au Lithium-ion (Li-ion)** : elles sont devenues très populaires pour une utilisation dans les téléphones portables, les ordinateurs portables et même les voitures électriques. Elles ont une densité d'énergie élevée et sont plus légères que les batteries au plomb.
- **Les batteries au Lithium-polymère (Li-Po)** : elles sont similaires aux batteries au Lithium-ion mais ont une forme plus plate et peuvent être moulées dans différentes formes.
- **Les batteries au sodium-ion (Na-ion)** : elles sont en développement pour une utilisation dans les voitures électriques et les systèmes de stockage d'énergie renouvelable. Elles sont moins chères que les batteries au Lithium-ion et peuvent être plus écologiques.
- **Les batteries au graphène** : elles sont en cours de développement et pourraient éventuellement fournir une densité d'énergie encore plus élevée que les batteries au Lithium-ion. Elles sont également plus durables et plus légères.

III.2.4 Principe de fonctionnement

Lorsque les électrodes d'une batterie sont connectées à travers une résistance, les électrons peuvent circuler de l'électrode négative vers l'électrode positive, ce qui déclenche des Réactions d'oxydation et de réduction. En mode de décharge, l'électrode négative subit une Réaction d'oxydation tandis que l'électrode positive subit une réaction de réduction. Les ions Nécessaires pour équilibrer ces réactions se déplacent à travers l'électrolyte. Ces processus Génèrent un courant électrique disponible pour alimenter des appareils externes. Les réactions D'oxydoréduction impliquent deux

couples oxydo-réducteurs, notés Red-/Ox- et Red+/Ox+ La réaction globale pendant la décharge est $\text{Red}^- + \text{Ox}^+ \rightarrow \text{Ox}^- + \text{Red}^+$. En mode de charge, Ces réactions sont forcées dans le sens inverse. Ainsi, la batterie stocke l'énergie électrique Sous forme chimique pendant la charge et la convertit en énergie Électrique pendant la Décharge. Ce système permet donc de stocker et de fournir de l'énergie de manière réversible.

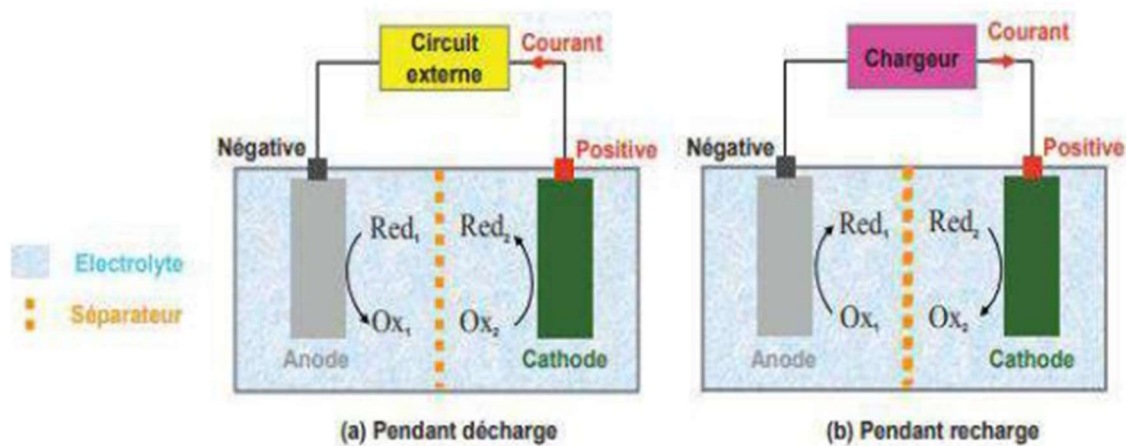


Figure III.1 : Schéma d'une batterie en (a) décharge (b) charge

III.3 Caractéristiques d'une batterie solaire : [22]

Les systèmes photovoltaïques exigent habituellement des batteries qui peuvent être chargées pendant le jour et déchargées durant la nuit. Ces batteries doivent fonctionner ainsi pendant des années, sans marquer d'anomalie ou de dysfonctionnement pour pouvoir satisfaire la demande des jours où il n'y a que peu ou pas de soleil. Dans un système photovoltaïque, la batterie remplit trois fonctions importantes :

- 1- **Autonomie** : nombre de jours pendant lesquels la batterie doit fournir la puissance requise sans être recharger et ne pas avoir subi de dommage.
- 2- **Courant de surcharge** : une batterie permet de fournir un courant de Surcharge pendant quelques instants ; c'est à dire un courant plus élevé que celui que peut fournir le champ PV.
- 3- **État de charge (SOC)** : la quantité de charge, en pourcentage de la capacité initiale, qui reste accumulée dans la batterie

4- Stabilisation de la tension : une batterie permet de fournir une tension constante, en éliminant les écarts de tension du champ PV et en permettant aux appareils un fonctionnement à une tension optimisée.

- Les propriétés électriques suivantes sont généralement employées pour caractériser une batterie :

1- Sa capacité : La capacité d'une batterie représente la quantité de courant qui peut être extraite d'une électrode via l'électrolyte et matériaux actifs des électrodes sur une charge. Elle est exprimée en Ampère heure (1Ah=3600 Coulomb) ou en wattheure Wh (1Wh = 3600 Joule). La capacité de batterie dépend de plusieurs facteurs. Elle est déterminée sous des conditions de décharge fixée, habituellement à courant constant ($C=I.t$) avec t : le temps de décharge au bout de laquelle la tension atteint une certaine valeur prédéfinie. En pratique, cette capacité dépend du courant, du temps de décharge ainsi que de la température.

2-Sa tension : la Figure III.3 reprend l'évolution de la tension durant la charge d'un élément de batterie plomb acide. La charge théorique d'une batterie au plomb s'effectue donc en trois phases. [22]

III.5 Modélisation de la batterie : [18]

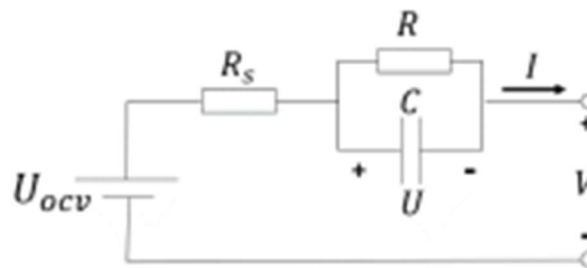


Figure III.2: Modèle électrique équivalent d'une batterie

Les équations électriques définissant ce modèle sont les suivantes :

$$V = U_{OCV} - R_s \cdot I - U \quad (\text{III.32})$$

$$\dot{U} = -\frac{1}{RC} U + \frac{1}{C} I \quad (\text{III.33})$$

Avec

U_{ocv} : la tension du circuit ouvert

V : la tension de sortie de la batterie

U : la tension aux bornes de la capacité.

Dans le fonctionnement normal de la batterie (entre 10 % et 90 % de SOC), la tension du Circuit ouvert évolue linéairement en fonction de l'état de charge de la batterie qui peut être écrite sous la forme :

$$U_{ocv} = aSOC + b \quad (\text{III.34})$$

De ce fait, nous définissons le vecteur d'état qui inclut l'état de charge et la tension aux bornes de la capacité comme variables d'état :

$$X(t) = \begin{pmatrix} SOC(t) \\ U(t) \end{pmatrix} \quad (\text{III.35})$$

L'expression de l'état de charge d'une batterie à un instant t

$$SOC(t) = SOC_0 - \frac{\int_{t_0}^t I dt}{Q_0} \quad (\text{III.36})$$

Où SOC_0 est l'état de charge initiale, Q_0 est la capacité réelle de la batterie et I est le courant mesuré durant le mode de charge ou décharge de la batterie

En dérivant l'équation (36) on obtient :

$$\text{SOC}'(t) = - \frac{I}{Q0} \quad (\text{III.37})$$

Et on peut écrire à partir de l'équation (33) et (37) :

$$\begin{bmatrix} \text{SOC}'(t) \\ \dot{U} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{SOC} \\ U \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{Q0} \\ \frac{1}{C} \end{bmatrix} \cdot I \quad (\text{III.38})$$

En remplaçant l'équation (34) dans (32) on obtient :

$$V = [a \quad -1] \cdot \begin{bmatrix} \text{SOC} \\ U \end{bmatrix} - R_s I + b \quad (\text{III.39})$$

En final le modelé global est :

$$dx = [A] \cdot x + [B] \cdot I \quad (\text{III.40})$$

$$V = [C] \cdot x + [D] \cdot I + b \quad (\text{III.41})$$

Avec

$$[A] = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix}, [B] = \begin{bmatrix} -\frac{1}{Q0} \\ \frac{1}{C} \end{bmatrix}, [C] = [a \quad -1], [D] = -R_s, \quad (\text{III.42})$$

$$x = \begin{bmatrix} \text{SOC} \\ U \end{bmatrix}$$

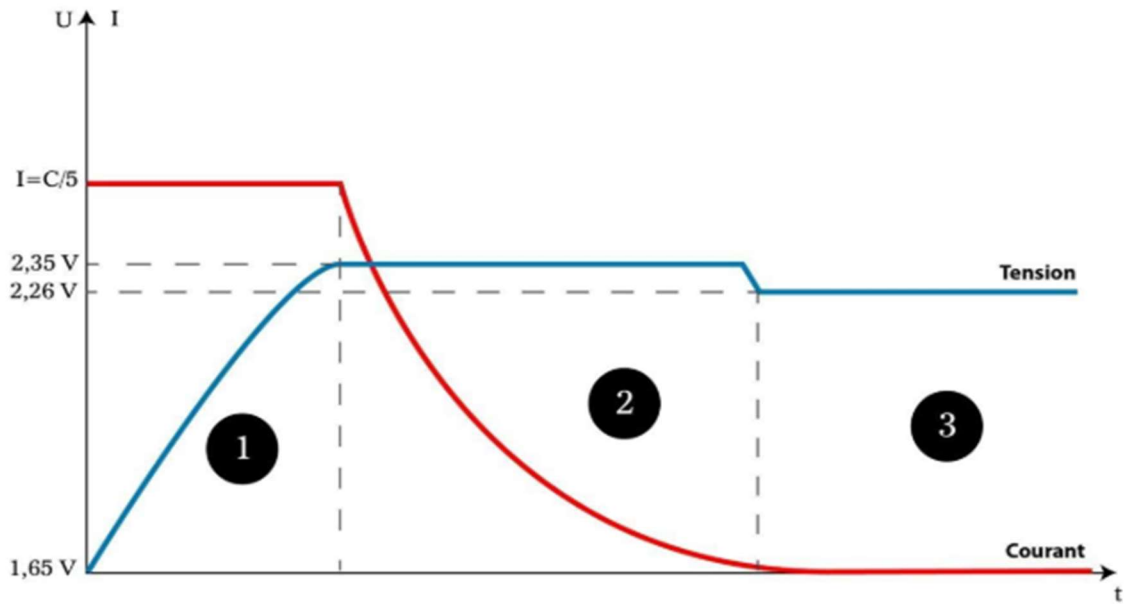


Figure III.3 : l'évolution de la tension

III.6 Simulation de système photovoltaïque avec la commande MPPT et contrôle de charge et déchargé de batterie

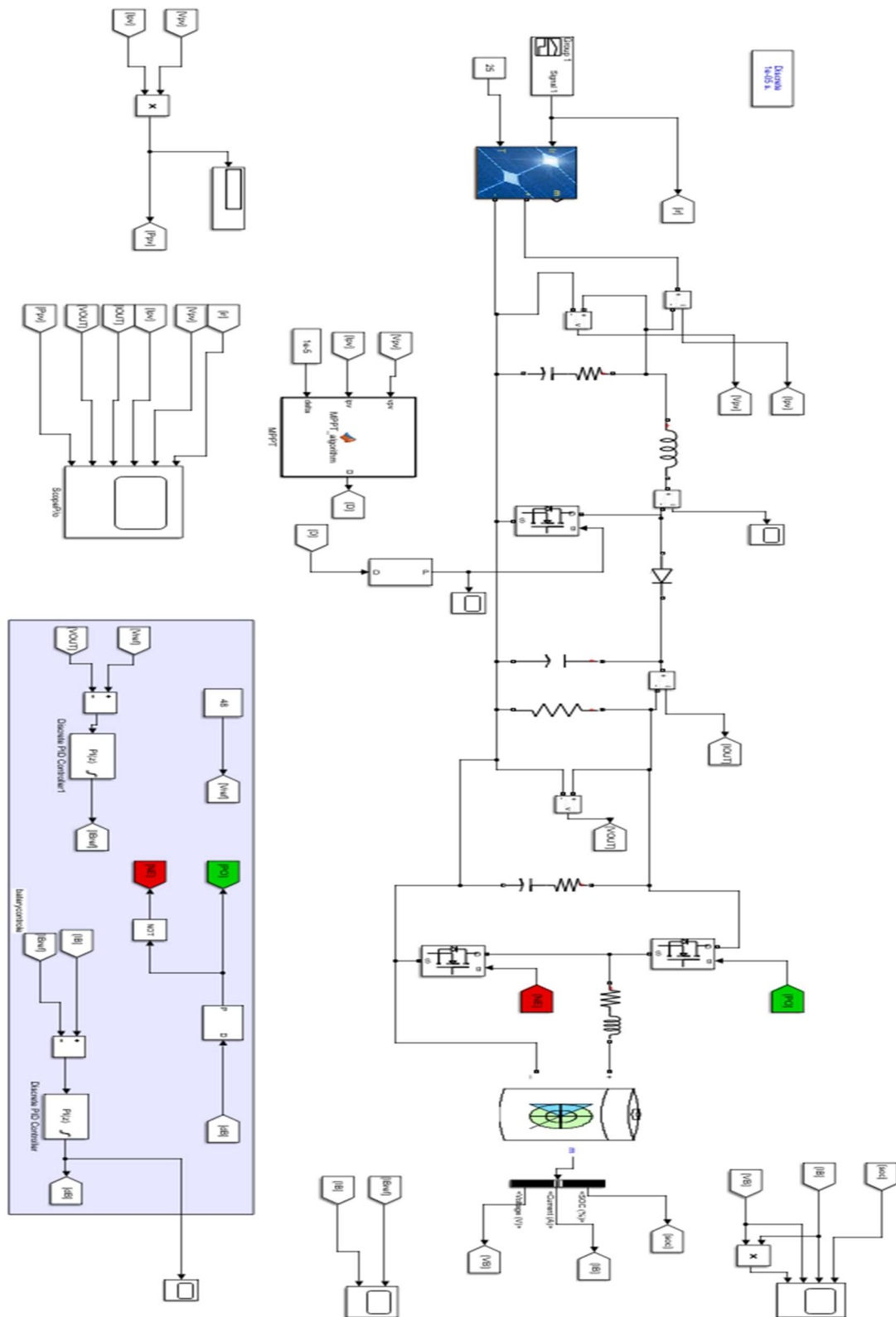


Figure III.4 : Le bloc schématique de SIMULINK du SPV

III.7 composition de système :

III.7.1 Le panneaux photovoltaïque

Block Parameters: PV Array

PV array (mask) (link)

Implements a PV array built of strings of PV modules connected in parallel. Each string consists of modules connected in series. Allows modeling of a variety of preset PV modules available from NREL System Advisor Model (Jan. 2014) as well as user-defined PV module.

Input 1 = Sun irradiance, in W/m2, and input 2 = Cell temperature, in deg.C.

Parameters **Advanced**

Array data

Parallel strings

Series-connected modules per string

Module data

Module:

Maximum Power (W) Cells per module (Ncell)

Open circuit voltage Voc (V) Short-circuit current Isc (A)

Voltage at maximum power point Vmp (V) Current at maximum power point Imp (A)

Temperature coefficient of Voc (%/deg.C) Temperature coefficient of Isc (%/deg.C)

Figure III.5 : les paramètres du panneau PV utilisé

- Les caractéristiques de la tension V_{pv} et le courant I_{pv} sont montrés dans la Figure III.6

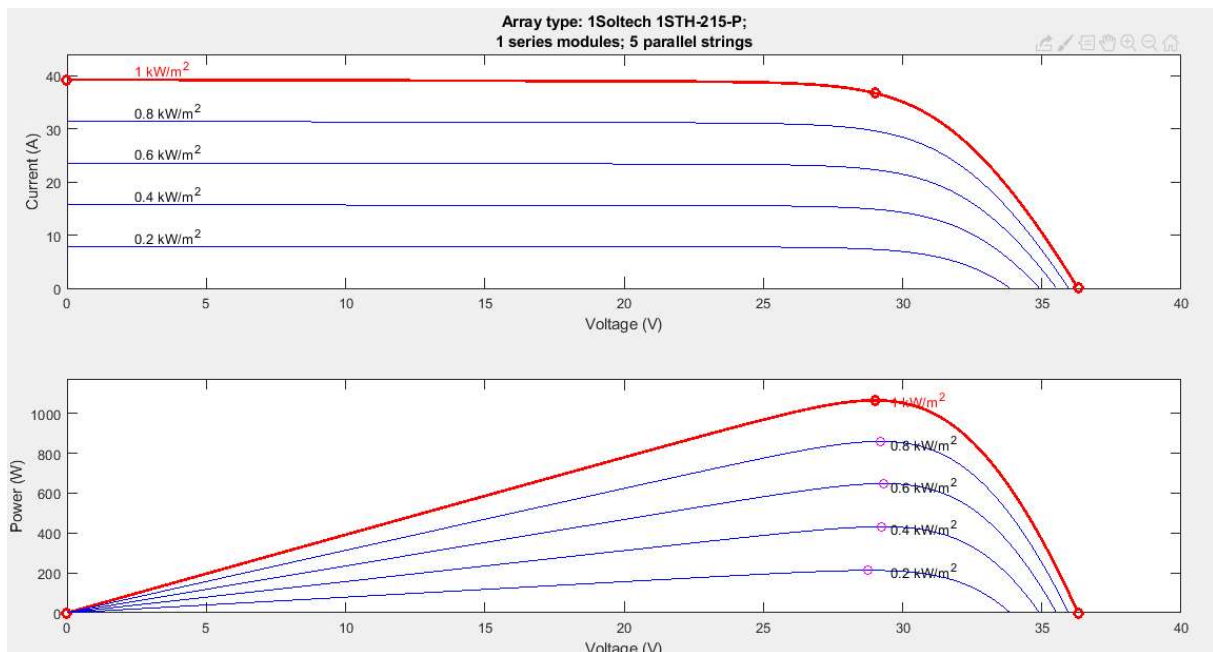


Figure III.6.les caractéristique de PV

III.7.2 Le convertisseur Boost :

Dans notre simulation on utilise le convertisseur qui est un élévateur de tension

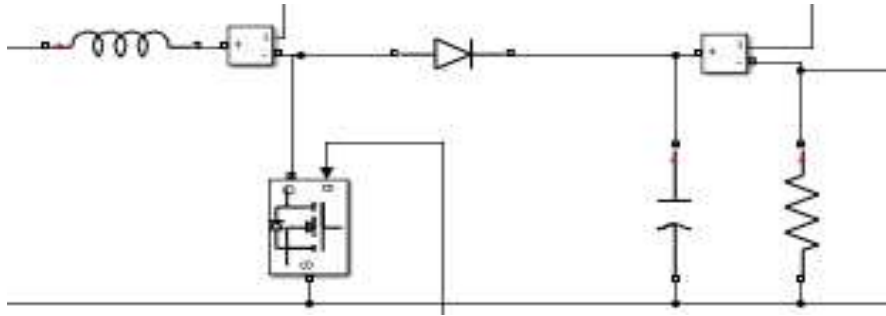


Figure III.7: Le convertisseur Boost

La puissance PV est de 1000 W, la tension PV est de 29 V, la tension à la sortie du convertisseur Boost est de 48 V, et la fréquence de commutation du convertisseur Boost est de 5000 Hz. La valeur de l'inductance est de 5 mH, la valeur du condensateur d'entrée est de 100 μ F, et la valeur du condensateur de sortie est de 3300 μ F et la résistance de sortie est de 6 ohms.

III.7.3. Le Convertisseur Bidirectionnel

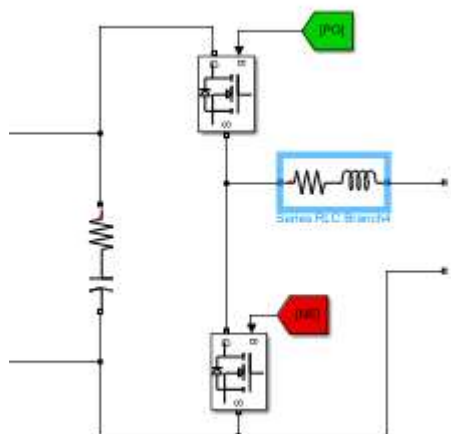


Figure III.8: Convertisseur Bidirectionnel

Le convertisseur bidirectionnel est connecté à la batterie et au système global. Il permet de contrôler la charge et la décharge de la batterie en fonction du courant de référence et du courant mesuré de la batterie grâce un PI (Proportionnel-Intégral).

III.7.4. Principe de contrôle de batterie

- 1- On mesure la tension de sortie actuelle du hacheur BOOST (V_{out}) comparée à la tension de référence (V_{ref}) grâce au PI et Génère un courant de référence (I_{ref})
- 2- On mesure le courant de la batterie ($I_{battery}$) et comparé au courant de référence (I_{ref}) et le PI traite cette erreur pour ajuster le signal de commande du convertisseur bidirectionnel.

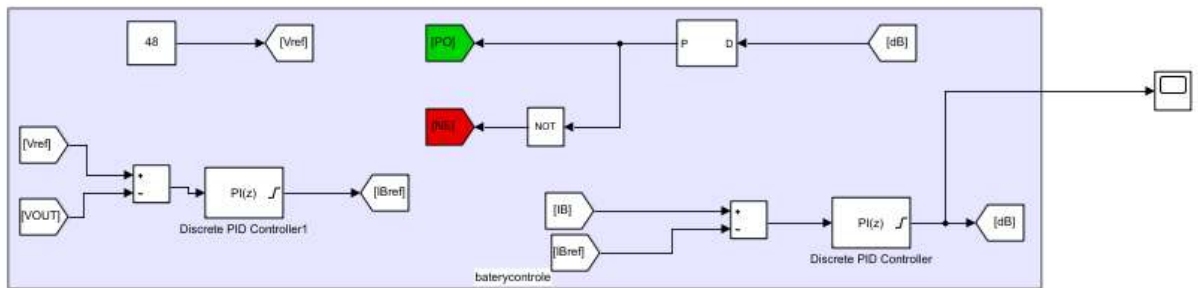


Figure III.9: système de contrôle de batterie

III.7.5. Modelé de Batterie

Les batteries sont des éléments importants de tout système photovoltaïque autonome. Comme différents types de batteries sont disponibles sur le marché, les batteries au lithium-ion sont les plus couramment utilisées dans les véhicules électriques (VE) en raison de leur grande densité énergétique et de leur fonctionnement stable et longue durée. [24]

Sa tension nominale est 24 (V) et sa capacité nominale est 50 (Ah), son état de charge initial (SOC initial) est 50 % et le Temps de Réponse de la Batterie est de 30 s.

Les caractéristiques de décharge de la batterie sont montrées dans la figure III.29.

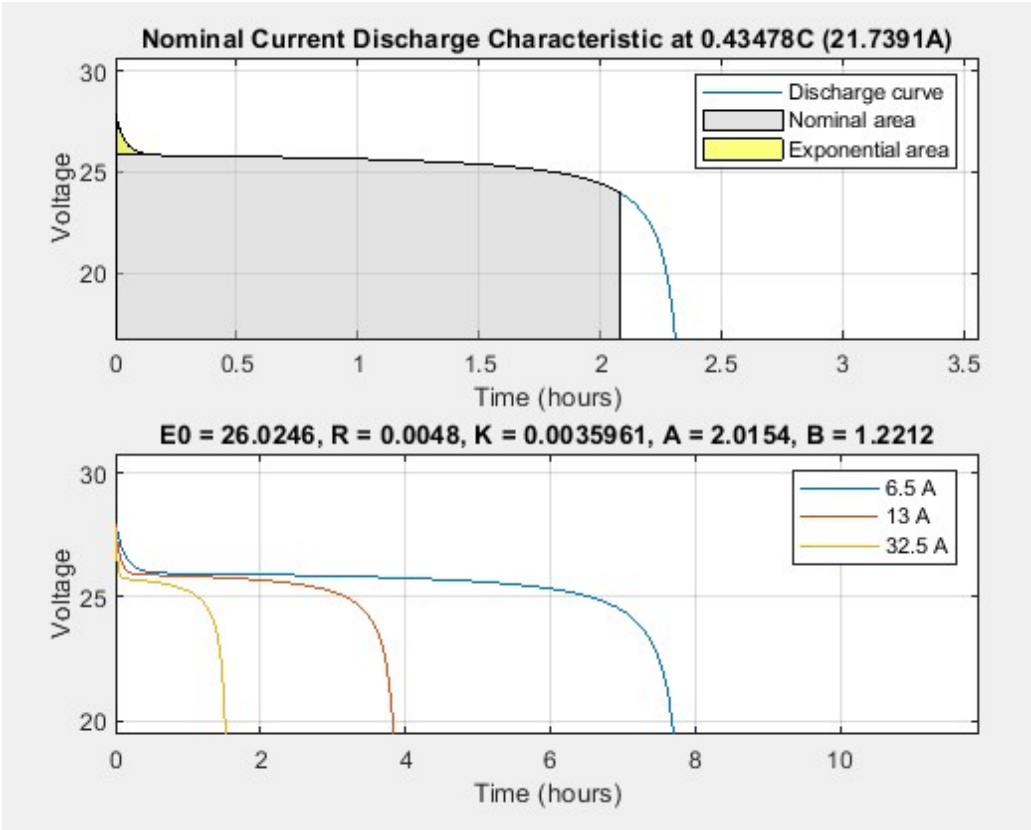


Figure III.10: Caractéristiques de Décharge de la Batterie

III.8 Simulation avec la méthode P&O :

```
function D = MPPT_algorithm(vpv,ipv,delta)
dinit = 0.1;
dmin=0;
dmax=0.85;
persistent Vold Pold dold;
if isempty(Vold)
    Vold=0;
    Pold=0;
    dold=dinit;
end
P= vpv*ipv;
dV= vpv - Vold;
dP= P - Pold;
if dP ~= 0
    if dP < 0
        if dV < 0
            D = dold - delta;
        else
            D = dold + delta;
        end
    else
        if dV < 0
            D = dold + delta;
        else
            D = dold - delta;
        end
    end
end
else
    D = dold;
end
if D >= dmax
    D=dmax;
elseif D<dmin
    D=dmin;
end
dold=D;
Vold=vpv;
Pold=P;
```

Figure III.11: le programme P&O sous script MATLAB.

III.8.1 Le principe de fonctionnement de l'algorithme

Ce code est un exemple d'algorithme MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui utilise une méthode perturber-observer pour ajuster dynamiquement le rapport cyclique d'un convertisseur DC-DC afin de maximiser la puissance de sortie d'un panneau solaire.

Voici comment fonctionne cet algorithme :

- 1. Initialisation des variables :** on initialise les variables persistantes V_{old} , P_{old} , et d_{old} qui stockent respectivement la tension et la puissance du panneau solaire lors de la précédente itération, et d_{old} stocke le rapport cyclique précédent.
- 2. Calcul de la puissance actuelle :** La puissance actuelle (P) est calculée en multipliant la tension (v_{pv}) par le courant (i_{pv}).
- 3. Calcul des variations de tension et de puissance :** Les variations de tension (dV) et de puissance (dP) par rapport aux valeurs précédentes sont calculées.
- 4. Ajustement du rapport cyclique :** En fonction des variations de puissance et de tension, le rapport cyclique (D) est ajusté pour suivre le point de puissance maximale (PPM). Si la puissance augmente, le rapport cyclique est augmenté, et vice versa.
- 5. Limitation du rapport cyclique :** Le rapport cyclique est ensuite vérifié pour s'assurer qu'il reste dans les limites spécifiées (d_{min} et d_{max}).
- 6. Mise à jour des valeurs précédentes :** Les valeurs précédentes de tension, de puissance et de rapport cyclique sont mises à jour pour la prochaine itération.

Cet algorithme permet d'optimiser continuellement le fonctionnement du système photovoltaïque en ajustant le rapport cyclique du convertisseur pour maximiser la puissance de sortie du panneau solaire, même en présence de variations des conditions environnementales.

III.9 Résultat de simulation

Les résultats de simulation d'un système photovoltaïque utilisant la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) de type « Perturbation et Observation » (P&O) en intégrant le contrôle de charge et de décharge de la batterie sous des conditions d'irradiation variables avec une température fixe de 25°C, sont représentés par les figures ci-dessous :

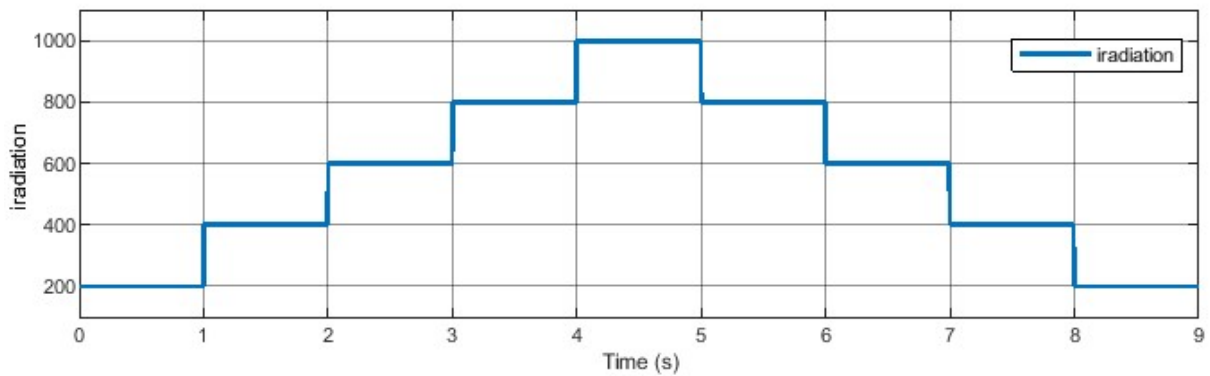


Figure III.12: Profil d'irradiation Variable en Fonction du Temps

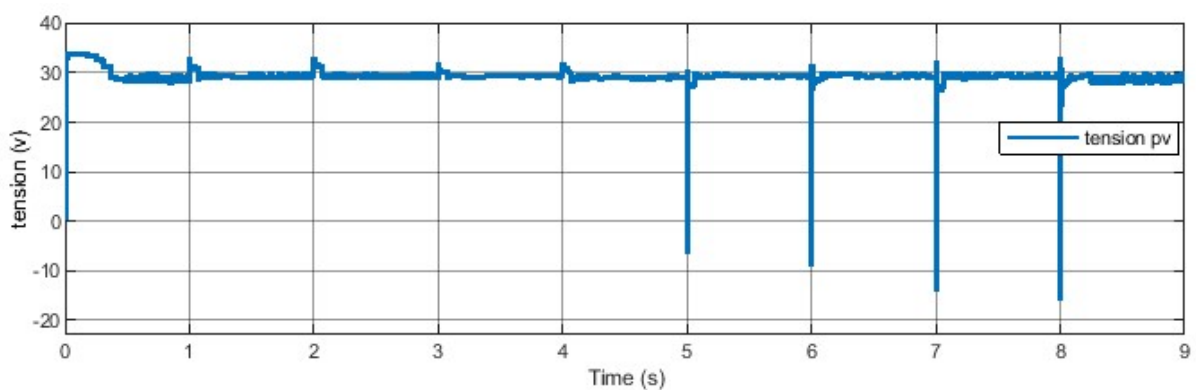


Figure III.13: tension du panneau PV en fonction des variations d'irradiation

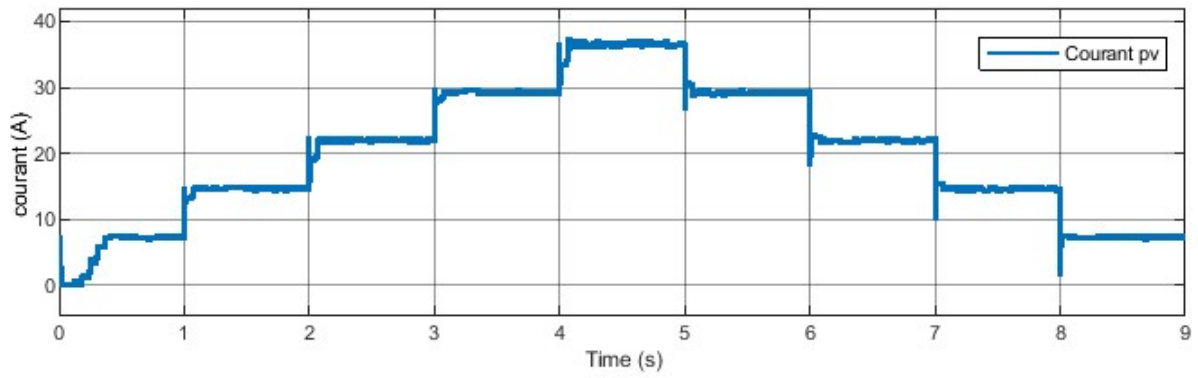


Figure III.14: courant du panneau PV en fonction des variations d'irradiation

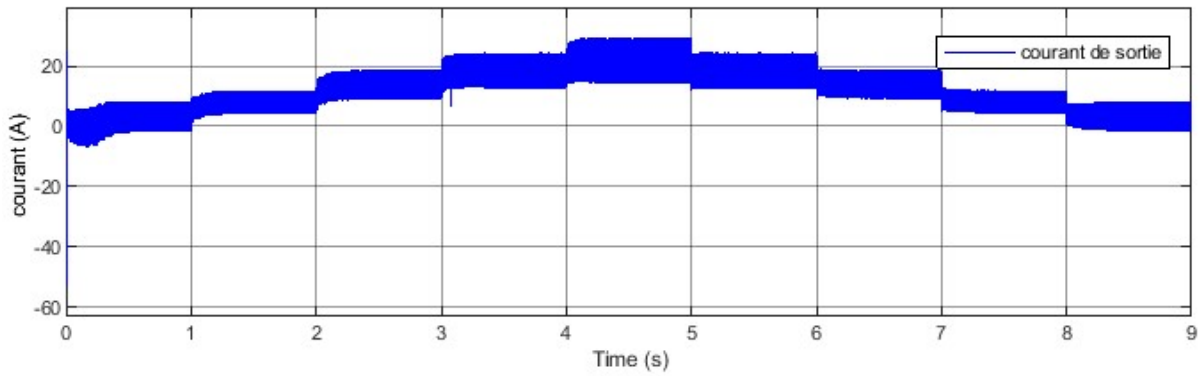


Figure III.15: courant de sortie du panneau PV après le convertisseur en fonction des variations d'irradiation

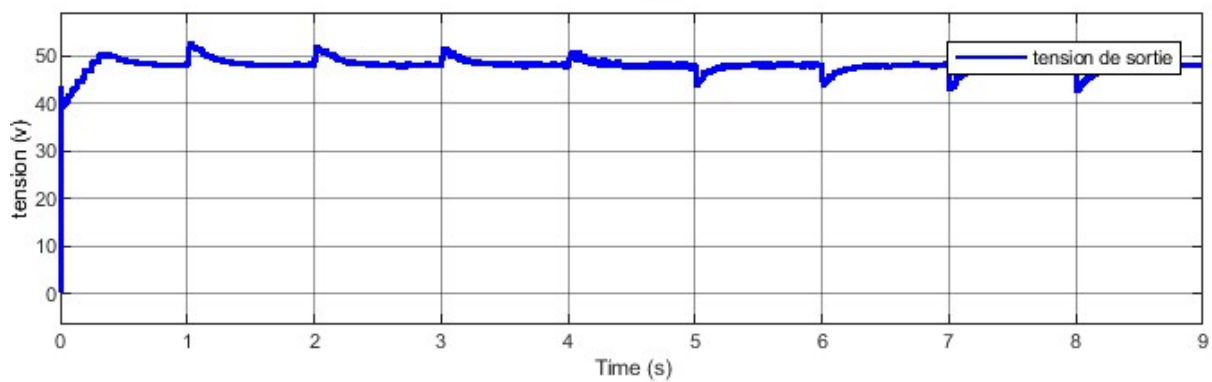


Figure III.16: tension de sortie du panneau PV après le convertisseur en fonction des variations d'irradiation

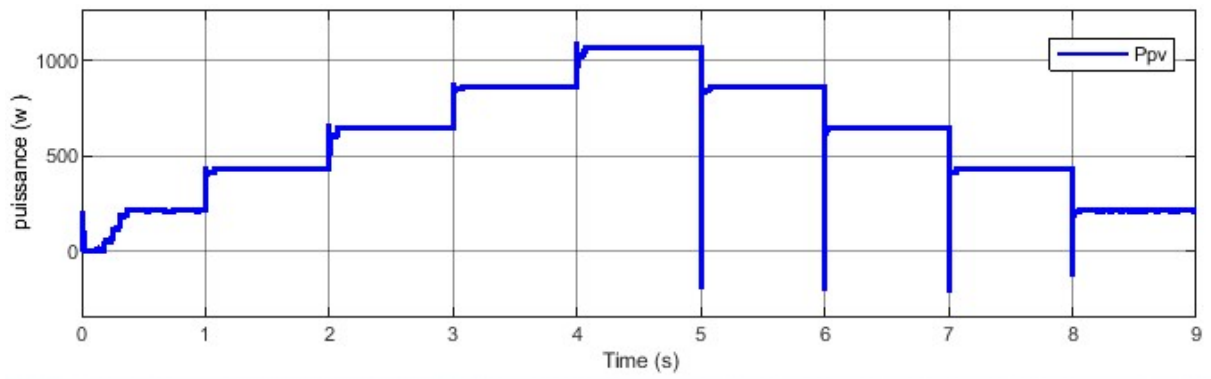


Figure III.17: puissance du panneau PV en fonction des variations d'irradiation

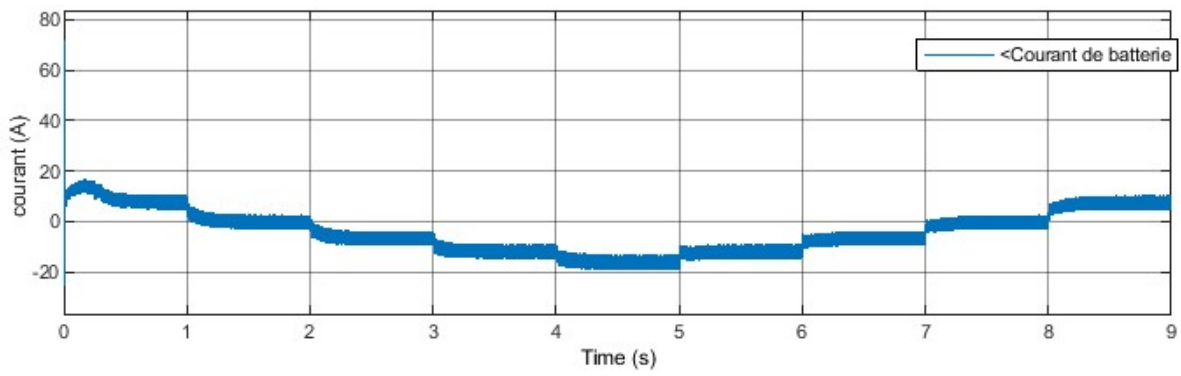


Figure III.18: courant de batterie

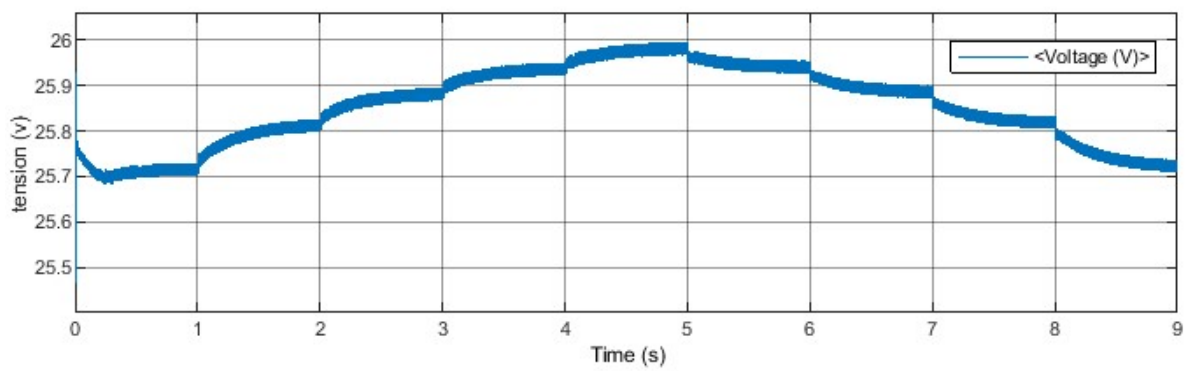


Figure III.19: tension de batterie

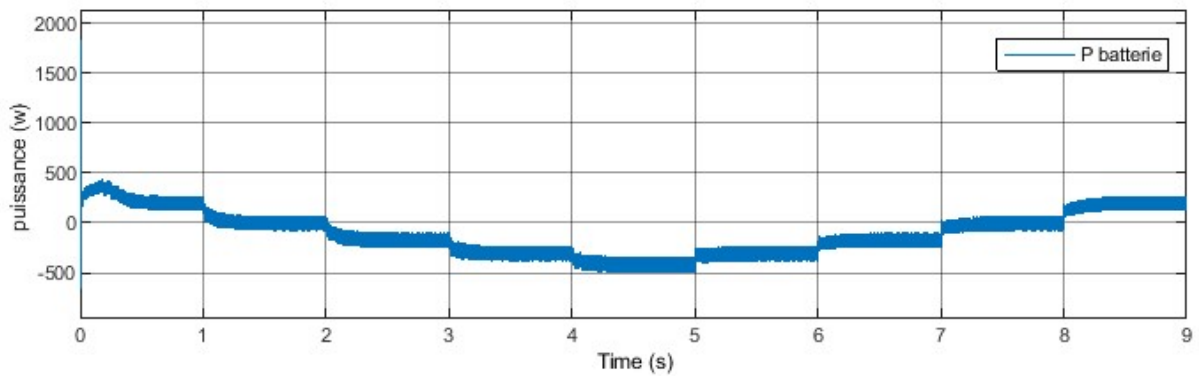


Figure III.20: puissance de batterie

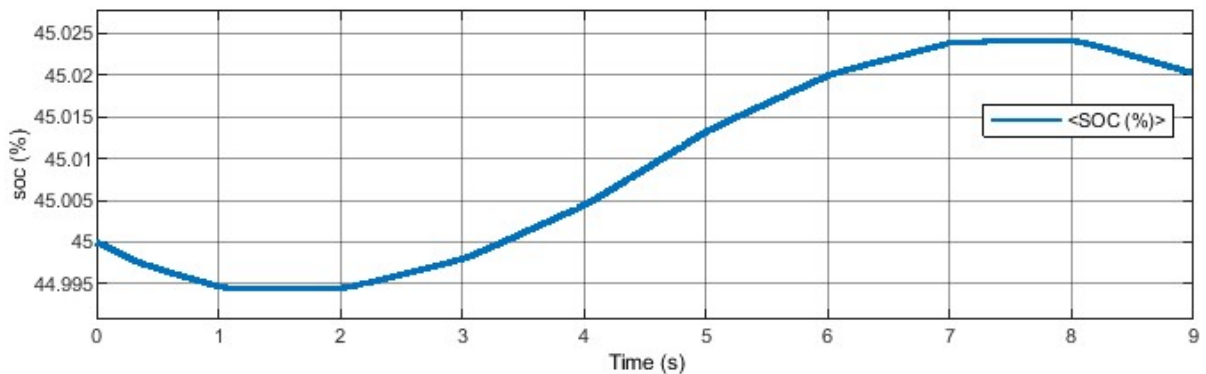


Figure III.21: l'état de charge de batterie

III.10 Analyse des résultats :

Les résultats détaillés illustrent la capacité remarquable du système à s'adapter aux fluctuations des conditions atmosphériques tout en optimisant la production et l'utilisation de l'énergie solaire. La Figure 12 montre une irradiation solaire fluctuant entre des paliers successifs, atteignant un maximum de 1000 W/m^2 à 4 secondes avant de diminuer progressivement. Ces variations mettent à l'épreuve la capacité du système à ajuster sa production pour maintenir une efficacité optimale.

Dans la Figure 13, malgré des oscillations significatives avec des pics négatifs, la tension des panneaux solaires (PV) reste globalement stable autour de 30V. Cela

témoigne de l'efficacité du contrôleur MPPT à maintenir le point de puissance maximale malgré les changements d'irradiation. De même, le courant PV dans la Figure 14 suit fidèlement les fluctuations d'irradiation, confirmant que le MPPT fonctionne efficacement pour maximiser la production d'énergie photovoltaïque.

Les Figures 15 et 16 montrent respectivement la stabilité du courant de sortie et de la tension de sortie du système, avec des variations minimales en réponse aux changements d'irradiation. Cela indique une régulation efficace du système pour maintenir une sortie stable malgré les fluctuations de l'entrée.

La Figure 17 détaille la puissance générée par les panneaux solaires, montrant une augmentation linéaire avec l'irradiation et des étapes claires correspondant aux niveaux d'irradiation. Cette réponse dynamique en puissance souligne l'efficacité du système PV et de l'algorithme MPPT dans la maximisation de la production d'énergie solaire.

En ce qui concerne la batterie, la Figure 21 présente l'état de charge (SOC) en pourcentage, montrant des augmentations lors des périodes d'irradiation élevée et des diminutions pendant les périodes d'irradiation réduite. Le contrôleur PID optimise la charge en ajustant le courant et la tension pour préserver la batterie contre les surcharges et les décharges profondes, assurant ainsi sa durabilité, comme illustré dans les Figures 18 et 19 qui détaillent le courant de batterie et la tension de batterie respectivement.

En conclusion, ces résultats démontrent la robustesse du système dans l'adaptation aux conditions variables tout en maintenant une efficacité optimale de production et d'utilisation de l'énergie solaire, grâce à une combinaison efficace de contrôle MPPT et de gestion de batterie

Conclusion

La simulation a confirmé que l'intégration de la commande MPPT P&O avec un contrôle de charge et de décharge de la batterie utilisant des régulateurs PI maximise l'efficacité, la stabilité et la fiabilité du système photovoltaïque. Cette approche permet d'optimiser la production et l'utilisation de l'énergie solaire, garantissant une alimentation énergétique stable et performante même en présence des conditions atmosphériques variables. Ces résultats soulignent l'importance des régulateurs PI et des algorithmes avancés de gestion de l'énergie pour une utilisation durable et efficace des ressources photovoltaïques dans des applications réelles.

Conclusion générale

Notre projet visait à étudier la commande MPPT dans un système photovoltaïque afin d'optimiser le point de fonctionnement maximal du panneau solaire tout en gérant efficacement la charge et la décharge d'une batterie. Ce système comprend un générateur photovoltaïque, un convertisseur DC-DC boost pour ajuster la tension et un système de commande MPPT pour contrôler ce convertisseur. En outre, il est connecté à un convertisseur bidirectionnel qui gère la charge et la décharge de la batterie.

Dans notre étude approfondie, nous avons examiné en détail les composants essentiels d'un système photovoltaïque. Nous avons débuté par la cellule photovoltaïque (PV) elle-même, en étudiant différents modèles décrivant son comportement sous l'influence de variations environnementales telles que l'irradiation solaire et la température. Nous avons ensuite porté notre attention sur le convertisseur DC-DC, un élément crucial qui adapte la tension entre le panneau solaire en tant que source et la charge, telle qu'une batterie.

En parallèle, nous avons exploré une variété de stratégies et d'algorithmes, notamment la méthode de perturbation et observation, largement documentée dans la littérature scientifique pour sa capacité à optimiser le point de puissance maximale d'un système photovoltaïque. Cette approche nous a permis de mieux comprendre comment maximiser l'efficacité énergétique du système.

En outre, nous avons étudié les batteries, en examinant différents types et en modélisant leur comportement de charge et de décharge via un convertisseur bidirectionnel

La présentation de notre modèle nous a facilité la création d'un schéma SIMULINK détaillé pour notre système photovoltaïque. Les simulations ont été réalisées à une température constante de 25°C et sous des conditions d'éclairement solaire variables.

Nous avons utilisé la méthode de perturbation et observation pour optimiser le point de puissance maximale du panneau solaire.

Ce travail peut être amélioré dans l'avenir. Voici quelques perspectives de recherche:

- Amélioration des algorithmes MPPT

-intégration de technologies émergentes : Investiguer l'incorporation de technologies émergentes telles que les systèmes de stockage avancés, les capteurs intelligents pour la surveillance environnementale et les dispositifs de gestion de la charge plus efficaces.

-Étude de cas pratiques et validations expérimentales : Conduire des études de cas approfondies et des validations expérimentales sur le terrain pour évaluer les performances des systèmes améliorés dans des conditions réelles.

Références bibliographiques

[1] **M.N. Mchalikh et CH. Hmada**, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau », Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah–Ouargla, 2013.

[2] Ressources naturelles du Canada, Les systèmes photovoltaïques (guide de l'acheteur), division de l'énergie renouvelable et électrique, n°M92-28/2001F, Ottawa, Canada, 2002.

[3] **M.Belhadj**, « Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome », Mémoire de Magister, Centre Universitaire de Bechar, 2007-2008.

[4] <https://sites.uclouvain.be/elec/FR/realisations/EnergiesRenouvelables/FiliereSolaire/PanneauxPhotovoltaïques/Cellule/Modele.htm> vue le 19/05/2024

[5] **S. Belaid**, Cours Energie Solaire Photovoltaïque. Université A. MIRA de BEJAIA, Année universitaire, 2014/2015.

[6] **N. Zehri**, « Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque », ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE, **Juin 2015**

[7] **F. Hananou**, « Modélisation et simulation d'un système Photovoltaïque », Mémoire master, Université Kasdi Merbah Ouargla, **2013/2014**

[8] **B. Flèche, D. Delagnes**, « Energie solaire photovoltaïque », juin 07, STI ELT Approche générale.

[9] **W.Tidjet**, « Contribution à l'optimisation de l'étage de conversion d'un système photovoltaïque », Mémoire de master, Université de Bejaia, 2021/2022.

[10] http://elearning.univ-biskra.dz/moodle2020/pluginfile.php/298293/mod_resource/content/1/Chapitre%202_CS.pdf consulté le 19/05/2024

[11] **W.Bensaci**, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT », Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah-Ouargla, 2011/2012.

[12] **O. GADRI, S. YAICHI**, « Etude et optimisation du fonctionnement d'un Système photovoltaïque », Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah-Ouargla, 2021/2022

[13] **C. Tigrine, O. Ait Ouali**, « Etude et simulation des techniques MPPT d'un Système photovoltaïque », Mémoire de master, Université de Bejaia, 2018/2019

[14] **S.Abouda**, « contribution a la commande des systèmes photovoltaïques: application aux systèmes de pompage», Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne et de l'Université de Sfax, 2015.

[15] **A. Necib, A. Djellal**, «Modélisation et Commande d'un Convertisseur Buck via les Modèles Flous de type Takagi-Sugeno », Mémoire de master, Université Larbi Tébessi – Tébessa, 2021.

[16] **M. Nasri, K. Hammoudi** , «Techniques MPPT pour système photovoltaïque sous des conditions », Mémoire de master, Université de Bejaia, 2021/2022.

[17] **R. Ghernoug, M. Sadallah , N. Dhou**, «Commande MPPT par la logique floue pour les systèmes Photovoltaïques », Mémoire de master, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued, 2021/2022.

[18] **H.doubabi**, « contribution à l'amélioration de l'efficacité d'une chaine de conversion photovoltaïque», Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne,2021.

[19] :**M. Tahmid Hussain et al**, «An Evaluation of ANN Algorithm Performance for MPPT Energy Harvesting in Solar PV Systems », Sustainability 2023, 15, 11144.
<https://doi.org/10.3390/su151411144>

[20] **N. Ghedhab et al**, « Maximum Power Point tracking for a stand-alone photovoltaic system using Artificial Neural Network » E3S Web of Conferences 152, 01007 (2020) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015201007> PEEE 2019.

[21] **A. Fousseyni et al**, « Application of Artificial Neural Networks for Maximal Power Point Tracking » HAL Id: hal-03222538 <https://univ-paris8.hal.science/hal-03222538>
Submitted on 10 May 2021 .

[22] **N. Oualami, N. Souilamas**, IFEG, ETB, DPF/ laboratoire ENR. (Filiale du groupe SONELGAZ Spa), 2017.

[23] : **N. Mamour ,A. Khemici**, « Estimation de l'état de charge de la batterie lithium-ion », Mémoire de master, Université Larbi Tébessi-Tebessa, 2022 / 2023.

[24]: **B. Surbhi et al**, « Design and Development of Standalone Solar Photovoltaic Battery System with Adaptive Sliding Mode Controller», Departement of Electrical Engineering, Tula's Institute, Dehradun, India, 26.02.2020.

Résumé :

Dans le cadre du développement durable, la technologie photovoltaïque a montré un potentiel significatif en tant que source d'énergie renouvelable. Ce mémoire se concentre sur l'optimisation des performances et l'efficacité des systèmes photovoltaïques. L'objectif est d'optimiser le point de fonctionnement maximal des panneaux solaires tout en gérant efficacement la charge et la décharge d'une batterie. Le système étudié comprend un générateur photovoltaïque, un convertisseur DC-DC boost pour ajuster la tension, et un système de commande MPPT pour contrôler ce convertisseur. En outre, il est connecté à un convertisseur bidirectionnel qui gère la charge et la décharge de la batterie, garantissant ainsi une gestion énergétique optimale.

Abstract:

In the context of sustainable development, photovoltaic technology has demonstrated significant potential as a renewable energy source. This thesis focuses on optimizing the performance and efficiency of photovoltaic systems. The objective is to maximize the operating point of solar panels while efficiently managing the charging and discharging of a battery. The system studied includes a photovoltaic generator, a DC-DC boost converter to adjust the voltage, and an MPPT control system to regulate this converter. Additionally, it is connected to a bidirectional converter that manages the charging and discharging of the battery, thus ensuring optimal energy management.