



جامعة بجاية
Tasdawit n'Bgayet
Université de Béjaïa

UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA-BEJAÏA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
Département de Génie Electrique



Mémoire de Fin d'Etude

PRESENTÉ PAR :

TEBBAL Sayed abderraouf

TAOUINET Abderrezak

Pour l'obtention du diplôme de **MASTER**

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Électrotechnique industrielle

Thème :

Amélioration des performances d'un générateur photovoltaïque par l'optimisation de puissance

Encadré par :

- Dr. TAMALUZT Salah
- Mr. ABAD Lahlou

Année Universitaire :

2023-2024.

Remerciements

Nous remercions Dieu le tout puissant pour ce qu'il nous a tant donné comme volonté, santé et surtout patience, pour pouvoir, durant toutes ces longues années d'études d'arriver là où nous sommes aujourd'hui et de concrétiser tous nos efforts par ce modeste travail. Nous tenons en premier lieu à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur Docteur tamaluzt Salah, pour avoir d'abord proposée ce thème, et pour ses conseils, son aide pour faire avancer notre travail. Nous remercions Abad lahlou Pour l'aider à obtenir des résultats et nous remercions aussi tous les enseignants et les responsables du département d'électrotechnique de l'université de Bejaïa pour leurs aides et leurs encouragements. Nous tenons enfin à remercions vivement toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Dédicace

Mon parcours universitaire a pris fin après un long voyage de fatigue et de difficultés et ici je termine mes recherches de fin d'études avec vigueur.

Je dédie cette note, qui est le fruit d'un chemin long et ardu, à tous ceux qui ont été crédités de ma carrière et m'ont aidé même avec le moindre peu :

- ❖ À mes très chers parents, source de vie, d'amour et d'affection.*
- ❖ À mes chers Sœurs et leurs enfants, source de joie et de bonheur.*
- ❖ À mes chères amis CHARAF, KHITRO, SAMY, LYES, ANIS, MAHREZ...*
- ❖ A ma chère FARAH*
- ❖ À tous les amis que le destin m'a réunis dans ma carrière scolaire.*
- ❖ À tous les enseignants qui m'ont enseigné depuis le début de mes Études jusqu'à la fin de ma note de fin d'études.*

Merci à vous tous.

Tebbal sayed abderraouf

Dédicace

Je dédie ce travail, qui est le fruit d'un chemin long et de sacrifice, à tous ceux qui ont foie en moi et tous ce qui m'ont aidé et encouragé. À mes très chers parents, À mes chers frères et sceurs, À tous les amis que le destin nous a réunis dans ma carrière scolaire. À tous les enseignants qui m'ont enseigné depuis le début de mes études jusqu'à la fin de cette année

Merci à vous tous.

Taouinet.abderrezak

Liste des symboles

Liste des symboles

- A** : facteur d'idéalité de la diode.
- G** : Ensoleillement instantané mesuré pendant la journée.
- G_{stc}** : Ensoleillement dans les conditions standard.
- I** : Courant délivré par la cellule solaire.
- I_{ph}** : Le photo-courant.
- I_{cc}** : Courant de court-circuit.
- I_{max}** : Courant maximum.
- I_s** : Courant de saturation de la diode.
- I_{Rsh}** : Courant parcourue la résistance R_{sh}.
- K** : Constante de Boltzmann.
- N_s** : Nombre de cellules connectées en série.
- N_p** : Nombre de cellules connectés en parallèle.
- PV** : Photovoltaïque.
- Q** : Charge d'électron.
- R_s** : Résistance série.
- R_{sh}** : Résistance shunt.
- T** : Température de la cellule.
- T_{stc}** : Température dans les conditions standard.
- V_{co}** : Tension de circuit-ouvert.
- v_d** : Tension aux bornes de la diode.
- V_{max}** : Tension maximale.
- P_{max}** : Puissance maximale.
- I_{max}** : Courant maximum.
- I_{mpp}** : Courant au point de puissance maximum.
- V_{mpp}** : Tension au point de puissance maximum.
- I_{sc}** : Courant de court-circuit de la cellule.
- I_d** : Courant de polarisation d'une diode.
- I_{pv}** : Tension du GPV.
- C** : Condensateur.
- D** : Diode.

K : Interrupteur à semi-conducteur contrôlable.

L : Inductance de la bobine.

ΔV : Variation de la tension.

D : Rapport cyclique.

ΔD : Variation de rapport cyclique.

ΔI : Variation du courant.

$P(t)$: Puissance actuelle.

$P(t-1)$: Puissance précédente.

ΔP : Variation de la puissance.

$V(t)$: Tension actuelle.

$D(t+1)_i$: Le rapport cyclique de la particule i à l'instant $(t+1)$.

$D(t)_i$: Le rapport cyclique de la particule i à l'instant (t) .

$\Delta D(t+1)_i$: La variation du rapport cyclique de la particule i à l'instant $(t+1)$.

$\Delta D(t)_i$: La variation du rapport cyclique de la particule i à l'instant (t) .

D_{best} : Le meilleur rapport cyclique de la particule i .

D_{g_best} : Le meilleur rapport cyclique global (de toutes les particules de l'essaim).

dP : Variation de puissance.

dV : Variation de la tension.

D_{min} : Rapport cyclique minimum.

D_{max} : Rapport cyclique maximum.

D_i : Rapport cyclique i .

Liste des abréviations

Listes d'abréviations

DC-AC : Convertisseur tension continue-alternative.

DC-DC : Convertisseur tension continue-continue.

FLC : Logique Floue.

GPV : Générateur photovoltaïque.

MPP : Maximum Power Point.

MPPT : Maximum power point tracking.

PPM : Point de puissance maximum

PV : Photovoltaïque.

PSO : Particule Swarm Optimization.

P&O: Perturb and observe.

STC: Standard Test Conditions.

Sommaire

SOMMAIRE

Remerciements

Dédicace

Listes des symboles

Listes d'abréviations

Introduction générale.....1

Chapitre I : 1

État de l'art de système photovoltaïque 1

I.1	Introduction.....	3
I.2	Historique.....	3
I.3	Sources d'énergies renouvelables	4
I.4	Energie photovoltaïque.....	4
I.4.1	Conversion photovoltaïque	4
I.4.2	Cellule photovoltaïque	5
I.5	Module photovoltaïque	10
I.5.1	Étude de positionnement.....	10
I.5.2	Types des systèmes photovoltaïques.....	11
I.6	Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	14
I.7	Conclusion :	15

Chapitre II : 1

Modélisation d'un système photovoltaïque 1

II.1	Introduction.....	17
II.2	Modélisation et simulation de la cellule photovoltaïque.....	17
II.3	Modélisation d'un modèle photovoltaïque à une diode	19
II.3.1	Caractéristique Courant-tension (I_{pv} - V_{pv}) Puissance-Tension(P_{pv} - V_{pv}) dans les conditions Standard 21	
II.3.2	Types de connexions	21
II.4	Convertisseurs DC/DC	24
II.5	Types des convertisseur DC/DC.....	25
II.6	Control de Convertisseur DC/DC	31
II.7	Techniques de MPPT.....	32
II.7.1	Techniques MPPT dans le cas d'un éclairement uniforme.....	32
II.7.2	Algorithme Perturbation & Observation (P&O).....	32
II.7.3	Technique à Base de la Logique Floue (FLC)	35

II.8	Techniques MPPT dans le cas d'un ombrage partiel	39
II.8.1	Technique d'optimisation d'essaim de particules (PSO)	39
II.9	Conclusion	44
	Chapitre III :	1
	Les défis face aux systèmes photovoltaïques	1
III.1	Introduction.....	49
III.2	Variation des conditions climatiques.....	49
III.2.1	L'éclairement Solaire	49
III.2.3	L'ombrage partiel	50
III.3	Les défauts de mismatch.....	51
III.4	Défauts électriques	52
III.4.1	Modules court-circuités.....	53
III.4.2	Défaut de connection line to line.....	54
III.5	L'optimisation de puissance durant les différents défis :.....	55
III.6	Conclusion	58
	Chapitre IV :	1
	Résultats et discussions	1
IV.1	Introduction.....	60
IV.2	Comparaison entre la technique PO et la logique flou	60
IV.3	Evaluation de la technique PSO	62
IV.4	Comparaison entre TCT et SP en cas d'un défaut de résistances R_s et R_p	68
IV.5	Conclusion	69
	Conclusion générale.....	71

Liste des figures

LISTE DE FIGURES

Figure I.1 :Jonction P-N d'une cellule photovoltaïque5

Figure I.2 : Construction de la cellule photovoltaïque6

Figure I.3 : Répartition spectrale du rayonnement solaire [6] 7

Figure I.4: principe de fonctionnement d'une cellule solaire8

Figure I.5 : Silicium Monocrystalline.8

Figure I.6: Silicium Polycrystalline.....9

Figure I.7: Silicium Amorphe.9

Figure. I.8 : Cellule photovoltaïque, le module et le champ PV 10

Figure. I.9 :Les différents valeurs d'éclairéments dans le monde 11

Figure I.10 : Systèmes photovoltaïque connectés au réseau 12

Figure I.11 : Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes. [9] 12

Figure I.12 : Schéma d'un système autonome avec stockage..... 13

Figure I.13 : Configuration du système hybride à bus continu [9]..... 14

Figure II.1 : Circuit équivalent simplifié d'une cellule solaire..... 18

Figure II.2 : Schéma équivalent du modèle à une diode. 18

Figure II.3 : Modèle Matlab/Simulink20

Figure II.4 : Caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ et $P_{pv}=f(V_{pv})$ dans les conditions : $G_{Stc}=1000W/m^2$, $T_{Stc}=25^{\circ}C$21

Figure II.5 : Association des modules en série21

Figure II.6:Caractéristique résultante d'un groupement en série d'une cellule identique22

Figure II.7: Association des modules en parallèle.....22

Figure II.8: Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de deux cellules identique23

Figure II.9: Association mixte des modules23

Figure II.10: Caractéristique d'un groupement mixte.....24

Figure. II.11 : Symbole d'un convertisseur DC-DC.25

Figure II.12 :Schéma de principe d'un convertisseur Buck25

Figure II.13 : Schéma équivalent du hacheur série quand $T \in \{ 0, \alpha T_s \}$ 26

Figure II.14 : Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Buck.27

Figure II.15 :Schéma de principe d'un convertisseur Boost27

Figure II.16 : Schéma équivalent du hacheur survolteur quand $t \in [0; \alpha.TS]$ 28

Figure II.17: équivalent d'un hacheur survolteur lorsque $t \in [\alpha.TS , TS]$28

Figure II.18 : Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Boost.....	29
Figure II.19 :Convertisseur Buck-Boost	29
Figure II.20 :Circuit équivalent d'un Buck-Boost lorsque $t \in [0, \alpha TS]$	30
Figure II.21 : équivalent d'un Buck-Boost lorsque $t \in [\alpha TS, TS]$	30
Figure II.22 : Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Buck-Boost	31
Figure II.23:Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque	32
Figure II. 24: Principe de la technique P&O.....	33
Figure II.25: organigramme de la technique Pertub & Observe (P&O).	34
Figure II. 26: Structure générale d'un régulateur floue.....	35
Figure II. 27: Fonctions d'appartenances de la variable d'entrée E	36
Figure II. 28: Fonctions d'appartenances de la variable d'entrée CE	37
Figure II. 29: Fonctions d'appartenances de la variable de la sortie D	37
Figure II. 30: Principe de MPPT à Base de la Logique Floue	38
Figure II.31 : Stratégie de déplacement d'une particule	40
Figure II.32: Organigramme de la technique d'optimisation d'essaim de particules (PSO)	43
Figure III.1 : Effet de l'éclairement sur les caractéristiques du système PV.....	50
Figure III.2: effet de la température sur les caractéristiques du système PV.....	50
Figure III.3 : importance des diodes bypass.	51
Figure III.4 : exemple d'un défaut de mismatch.....	52
Figure III.5: Effet des résistances internes sur le courant de sortie d'un système PV.	52
Figure III.6 champ photovoltaïque avec des modules court-circuités avec diodes de protection	53
Figure III.7 : caractéristique d'un système avec un défaut de court-circuit avec diodes	54
Figure III.8 : line to line connexion.....	54
Figure III.9 : caractéristique d'un système avec un défaut line to line avec diodes	55
Figure III.10 : connexion SP (1), connexion TCT (2).....	56
Figure III.11 : caractéristique V, P d'un champ avec la configuration SP et TCT	57
Figure III.12 : caractéristique V, P d'un champ avec la configuration SP et TCT	57
Figure III.13: caractéristique V,P d'un champ avec la configuration SP et TCT.....	58
Figure IV.1 : caractéristique de puissance avec optimisation.....	60
Figure IV.2 : le point de puissance maximale avec PO et logique floue	61
Figure IV-3: caractéristique V-P panneau partialement ombré	62
Figure IV.4 :Caractéristique puissance en fonction du temps	63

Figure IV.5 : Caractéristique rapport cyclique en fonction du temps	63
Figure IV.6 : caractéristique V-P du champ dont des panneaux ombrés	64
Figure IV.6 : Caractéristique Puissance en fonction du temps	65
Figure IV.7 :Caractéristique du rapport cyclique en fonction du temps	65
Figure IV.8 : caractéristique V-P du champ avec un défaut LT	66
Figure IV.9 :Caractéristique puissance en fonction du temps	66
Figure IV.10 :Caractéristiques du rapport cyclique en fonction du temps	67
Figure IV.11 : caractéristique V-P du champ avec un défaut LG	67
Figure IV.12: Caractéristiques puissance en fonction de temps.....	68
Figure IV.13 :Caractéristique du rapport cyclique en fonction du temps	68

Liste des tableaux

LISTE DE TABLEAUX

Tableau II.1 : Caractéristiques du panneau utilisé.....	19
Tableau II.2 : Principe la technique P&O	33
Tableau II.3 : Matrice d'inférences	38
Tableau IV.1 :Tableau Comparatif entre P&O et FLC	62
Tableau IV.2 : Comparaison entre les configurations SP et TCT	69

Introduction générale

Introduction générale

La production d'énergie a un défi majeur pour les années à venir, avec une augmentation continue des besoins énergétiques dans les sociétés industrialisées et en développement. Une grande partie de l'énergie mondiale provient actuellement de sources fossiles telles que le charbon, le gaz naturel, le pétrole et l'uranium, dont la régénération est très lente à l'échelle humaine. Cette dépendance entraîne un risque imminent d'épuisement des ressources, aggravé par une demande croissante qui dépasse déjà l'offre, provoquant des fluctuations significatives des prix mondiaux du pétrole.

La consommation mondiale d'électricité, étroitement liée à l'industrie, au transport et aux communications, repose largement sur ces ressources non renouvelables. Face à cette réalité, les énergies renouvelables comme l'hydroélectricité, la géothermie, l'énergie éolienne, la biomasse et l'énergie photovoltaïque (PV) deviennent progressivement des alternatives compétitives en termes de coût et de performance de production. Toutefois, leurs systèmes de conversion énergétique souffrent souvent d'un manque d'optimisation, les rendant encore relativement coûteux et présentant des déficiences en termes de rendement et de fiabilité.

Malgré les progrès des recherches prouvant la viabilité des énergies renouvelables comme le PV et l'éolien, il persiste encore des réticences à grande échelle, tant pour la production industrielle que pour les installations résidentielles. L'énergie photovoltaïque, bien connue depuis des années pour sa capacité à générer de l'électricité sans émissions de gaz à effet de serre, représente une solution attrayante en remplacement ou en complément des sources conventionnelles d'approvisionnement électrique.

La lumière solaire, disponible partout et de manière quasi-inépuisable, permet une exploitation universelle de l'énergie photovoltaïque, que ce soit en milieu urbain ou rural, dans des zones isolées ou densément peuplées. De plus, cette forme d'énergie peut être produite de manière décentralisée, directement là où elle est consommée, rendant l'électricité solaire accessible à une large part de la population mondiale.

L'objectif de ce mémoire est d'étudier et d'analyser les défauts des systèmes photovoltaïques (PV) en utilisant MATLAB/Simulink. Notre recherche vise à optimiser ces systèmes durant les différents obstacles.

L'organisation de notre mémoire comprend quatre chapitres :

- Dans le premier chapitre, nous avons présenté généralité sur les systèmes Photovoltaïques et construction des cellules photovoltaïques et l'effet photovoltaïque et principe de fonctionnement. Les avantages et inconvénients
- Dans le deuxième chapitre, on étudie une Modélisation et simulation par MATLAB SIMULINK de chaque élément du système PV réalisé et aussi les types convertisseurs statiques(DC-DC) et utilisés les méthodes de la commande MPPT.
- Dans le troisième chapitre, se concentre sur la simulation et la comparaison des différentes techniques de (MPPT) dans deux scénarios distincts : les conditions standard et les conditions d'ombrage partiel.
- Dans le quatrième chapitre, nous présentons les résultats expérimentaux obtenus ainsi que les discussions qui en découlent

Nous terminerons ce travail par une conclusion générale.

Chapitre I :

État de l'art de système photovoltaïque

I.1 Introduction

L'énergie photovoltaïque, générée à partir du rayonnement solaire, constitue une source d'énergie renouvelable majeure. Au cours des dernières années, elle a suscité un intérêt croissant en raison de son potentiel à contribuer de manière significative à la transition énergétique

Il est possible de produire trois types d'énergies à partir du rayonnement solaire : l'énergie calorifique via les installations solaires thermiques, comme les chauffe-eaux et les climatiseurs solaires ; l'énergie électrique avec les installations solaires photovoltaïques et l'énergie thermique concentrée pour la production d'électricité à l'aide de systèmes thermodynamiques.

Parmi ces technologies, l'énergie solaire photovoltaïque se distingue par sa capacité à convertir directement le rayonnement solaire en électricité. Cette méthode constitue une source d'énergie renouvelable majeure. Au cours des dernières années, elle a suscité un intérêt croissant en raison de son potentiel à contribuer de manière significative à la transition énergétique mondiale. Les avancées technologiques et la réduction des coûts ont rendu les installations photovoltaïques de plus en plus attractives, tant pour les petites installations domestiques que pour les vastes parcs solaires. [1]

Dans ce chapitre, nous allons présenter une vue d'ensemble des systèmes photovoltaïques. Nous aborderons un peu d'histoire pour comprendre leur évolution, expliquerons le principe de fonctionnement, détaillerons les différentes parties qui les composent, et explorerons les modes d'utilisation actuels de cette technologie prometteuse.

I.2 Historique

L'effet photovoltaïque permet de transformer l'énergie solaire en électricité. Le mot "photovoltaïque" vient du mot grec "photos" (lumière) et de "volta" nom du physicien italien qui découvrit la pile électrique.

- 1839 : C'est le savant français Alexandre-Edmond Becquerel (1820-1891) le premier qui mit en évidence les effets électriques que produisent les rayons solaires dans une pile constituée par des électrodes de platine et de cuivre oxydé plongeant dans une solution électrolytique acide. Il le décrit dans un "Mémoire" sur les effets chimiques et électriques produits sous l'influence de la lumière solaire.
- 1873 : L'ingénieur américain Willoughby Smith découvre les propriétés photosensibles du sélénium
- 1877 : W.G. Adams et R.E. Day expliquent l'effet photovoltaïque du silicium.
- 1883 : Charles Frits construit la première cellule en silicium et en or. Elle atteint un rendement d'environ 1%.
- 1905 : Albert Einstein publie sur un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière. Cet article lui vaudra le prix Nobel de physique en 1922.
- 1911 : Wilhelm Ostwald, prix Nobel de chimie en 1909, « en reconnaissance de ses travaux sur la catalyse et pour ses recherches touchant les principes fondamentaux gouvernant l'équilibre chimique et les vitesses de réaction ».
- 1918 : Le scientifique polonais Jan Czochralski développe un procédé pour créer du silicium monocristallin.
- 1939 : L'ingénieur américain Russel Ohl (1898-1987) découvre la jonction P-N.
- 1954 : Les chercheurs américains Gerald Pearson, Darryl Chapin et Calvin Fuller mettent

Au point une cellule photovoltaïque en silicium pour les laboratoires Bell.

- 1955 : Des chercheurs américains (Chapin, Fuller, Pearson et Prince) travaillant pour les *laboratoires Bell Telephone* (devenus aujourd'hui *Alcatel-Lucent Bell Labs*) développent une cellule photovoltaïque à haut rendement de 6 %.
- 1958 : Première utilisation spatiale de photopiles solaires dans le satellite américain Vanguard.
- 1958 : Le satellite Sputnik III s'est équipé de cellules photovoltaïques
- 1971 : Elliot Berman crée la société Solarpower pour développer des applications terrestres pour les modules photovoltaïques
- 1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.
- 1983 : la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie

Le spatial devient le banc d'essai de la technologie photovoltaïque. Les coûts de fabrication élevés des cellules et leurs rendements médiocres ne leur permettent pas encore une exploitation à grande échelle. Il faudra attendre les années 70 pour que les gouvernements et les industriels investissent dans la technologie photovoltaïque.

Aujourd'hui, l'énergie photovoltaïque est à la disposition des entreprises et des particuliers et les panneaux photovoltaïques ont des rendements plus élevés. [2]

I.3 Sources d'énergies renouvelables

On distingue plusieurs types de sources d'énergies renouvelables : l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque. Excepté l'énergie géothermique qui provient de la chaleur des profondeurs de la terre, ces sources d'énergie proviennent directement ou indirectement du soleil. Elles sont donc disponibles indéfiniment tant que celui-ci brillera. L'énergie photovoltaïque est la plus jeune des énergies renouvelables, elle a l'avantage d'être non polluante, souple et fiable. [2]

I.4 Energie photovoltaïque

Le mot « photovoltaïque », souvent abrégé par les lettres PV, a 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. L'effet photovoltaïque, c'est la conversion directe de l'énergie solaire en électricité. Les cellules solaires photovoltaïques sont des semi-conducteurs capables de convertir directement la lumière en électricité. Cette conversion, appelée photovoltaïque, a été découverte par E. Becquerel en 1839 [3]

I.4.1 Conversion photovoltaïque

La conversion de l'énergie solaire en énergie électrique repose sur l'effet photoélectrique, c'est-à-dire sur la capacité des photons à créer des porteurs de charge (électrons et trous) dans un matériau. Lorsqu'un semi-conducteur est illuminé avec un rayonnement de longueur d'onde appropriée (l'énergie des photons doit être au moins égale à celle du gap énergétique du matériau), l'énergie des photons absorbés permet des transitions électroniques depuis la bande de valence vers la bande de conduction du semi-conducteur, générant ainsi des paires électron-

trou qui peuvent contribuer au transport du courant (photoconductivité) par le matériau lorsqu'on le polarise.

Si on illumine maintenant une jonction PN, les paires électron-trou qui sont créées dans la zone de charge d'espace de la jonction sont immédiatement séparées par le champ électrique qui règne dans cette région, et entraîné dans les zones neutres de chaque côté de la jonction. Si le dispositif est isolé, il apparaît une différence de potentiel aux bornes de la jonction (photo tension) ; s'il est connecté à une charge électrique extérieure, on observe le passage d'un courant alors qu'on n'applique aucune tension au dispositif. C'est le principe de base d'une cellule photovoltaïque. [4]

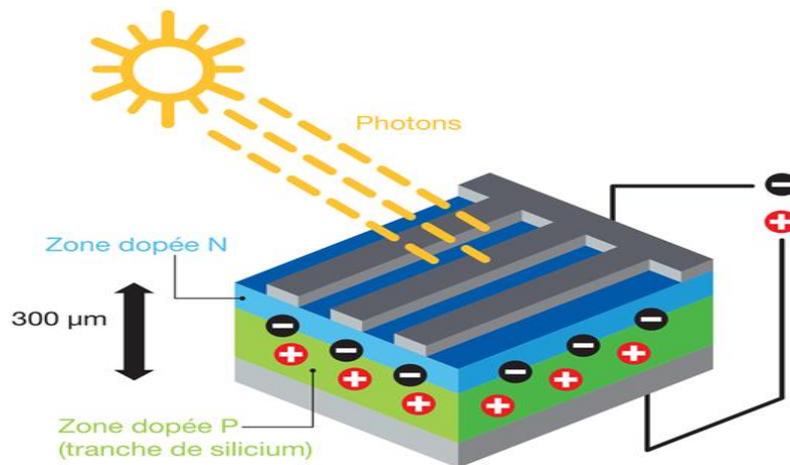


Figure I.1 : Jonction P-N d'une cellule photovoltaïque

I.4.2 Cellule photovoltaïque

A. Construction de la cellule

La cellule PV est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs de type P-N qui produisent un courant électrique sous l'effet des photons lumineux. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons par le matériau constituant le dispositif
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création des paires d'électrons/trous dans le matériau semi-conducteur
- Collecte des particules générées dans le dispositif. [5]

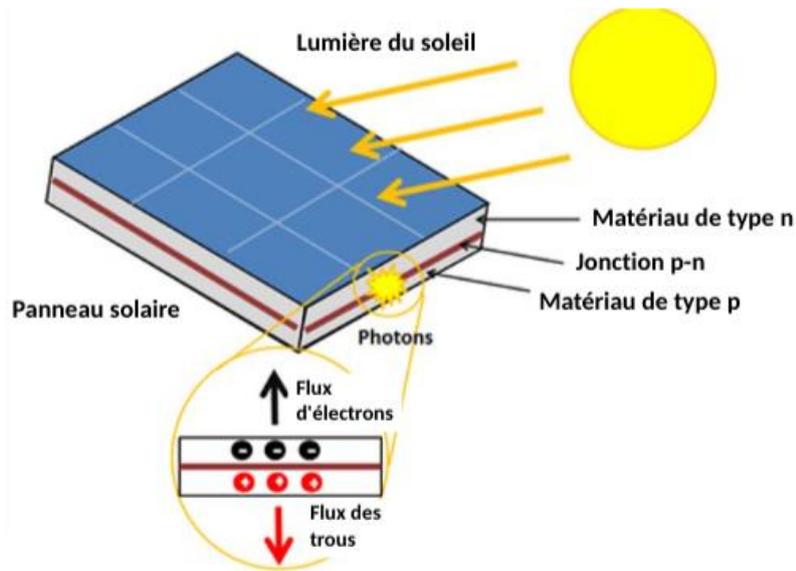


Figure I.2 : Construction de la cellule photovoltaïque

Le rayonnement solaire est constitué des photons transportant chacun une énergie E_{PH} qui répond, elle-même, à la relation suivante :

$$E_{ph} = \frac{h}{c\lambda} \quad (I. 1)$$

- E_{PH} : la quantité d'énergie.
- λ : la longueur d'onde.
- h : la constante de Planck .
- C : la vitesse de la lumière.

D'après la relation, cette énergie est inversement proportionnelle à la longueur d'onde. Le flux d'énergie solaire est alors transmis sous forme de rayonnements électromagnétiques dont les longueurs d'ondes assez différents du corps noir dans l'espace, mais encore plus sur la terre telle que le montre la figure ci-dessus

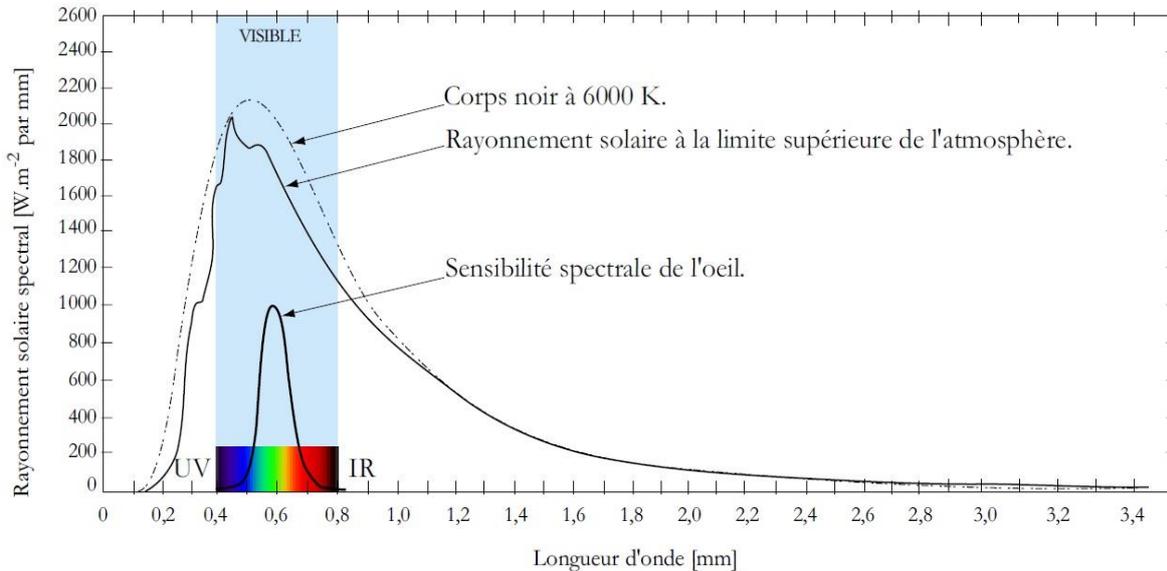


Figure I.3 : Répartition spectrale du rayonnement solaire [6]

Dans les conditions AM0 : hors atmosphère à haute altitude.

Dans les conditions AM2 : pour l'atmosphère terrestre, le soleil étant à 30° sur l'horizon.

Il est à remarquer que le spectre de l'énergie solaire en atmosphère terrestre est décalé vers le rouge et l'infrarouge par rapport au spectre hors atmosphère.

Nous observons la figure I.3, les longueurs d'ondes du rayonnement solaire terrestre sont comprises entre $0,2 \mu m$ (ultraviolet) et $0,4 \mu m$ (infrarouge) avec un maximum d'énergie pour $0,5 \mu m$. La figure montre aussi que 97,5% de cette énergie est comprise entre $0,2 \mu m$ et $2,5 \mu m$, et principalement, entre $0,4 \mu m$ et $0,78 \mu m$ qui correspond au visible. Les capteurs d'énergie solaire, qui correspondent aux cellules solaires devront donc être compatibles avec ces longueurs d'ondes pour pouvoir piéger les photons et les restituer sous forme d'électrons.

B. Principe de fonctionnement

Les cellules photovoltaïques exploitent l'effet photoélectrique pour produire du courant continu par absorption du rayonnement solaire. Cet effet permet aux cellules de convertir directement l'énergie lumineuse des photons en électricité par le biais d'un matériau semi-conducteur transportant les charges électriques.

Une cellule photovoltaïque est composée de deux types de matériaux semi-conducteurs, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit d'électrons. Ces deux parties sont respectivement dites « dopées » de type n et de type p. Le dopage des cristaux de silicium consiste à leur ajouter d'autres atomes pour améliorer la conductivité du matériau.

Un atome de silicium compte 4 électrons périphériques. L'une des couches de la cellule est dopée avec des atomes de phosphore qui, eux, comptent 5 électrons (soit 1 de plus que le silicium). On parle de dopage de type n comme négatif, car les électrons (de charge négative) sont excédentaires. L'autre couche est dopée avec des atomes de bore qui ont 3 électrons (1 de moins que le silicium). On parle de dopage de type p comme positif en raison du déficit d'électrons ainsi créé. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p.

En traversant la cellule photovoltaïque, les photons arrachent des électrons aux atomes de silicium des deux couches n et p. Les électrons libérés se déplacent alors dans toutes les directions. Après avoir quitté la couche p, les électrons empruntent ensuite un circuit pour retourner à la couche n. Ce déplacement d'électrons n'est autre que de l'électricité. [7]

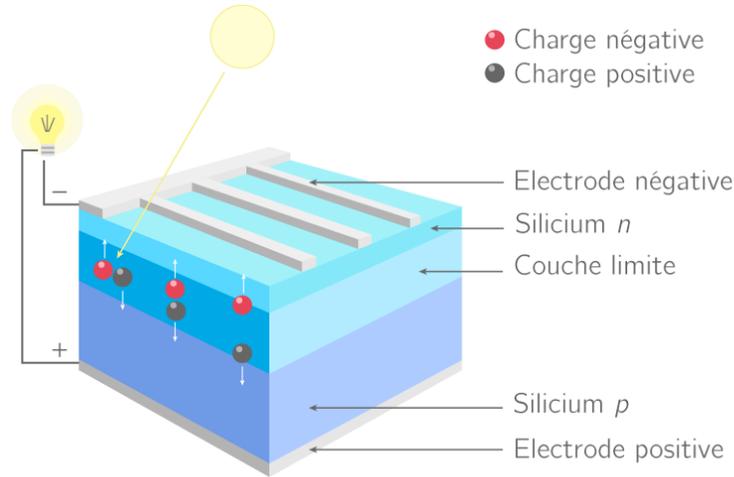


Figure I.4 : Principe de fonctionnement d'une cellule solaire

C. Les types de cellules photovoltaïques

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par un rendement et un coût qui lui est propre. Cependant quel que soit le type, le rendement reste assez faible entre : 8 et 23 % de l'énergie que les cellules reçoivent. Les cellules les plus utilisées sont : [6]

- **Silicium monocristallin**

Les cellules monocristallines sont des photopiles élaborées à partir de silicium cristallisé en un cristal unique. Leur rendement est de 10 à 16 %, mais leur fabrication est complexe et consommatrice d'énergie.



Figure I.5 : Silicium Monocristalline.

- **Silicium polycristalline**

Les cellules poly cristallines sont fabriquées à partir d'un bloc de silicium cristallisé sous forme de cristaux multiples. Leur rendement moyen est de 11 à 13 %, et leur coût de production est un peu moins élevé que celui des cellules monocristallines. [6]

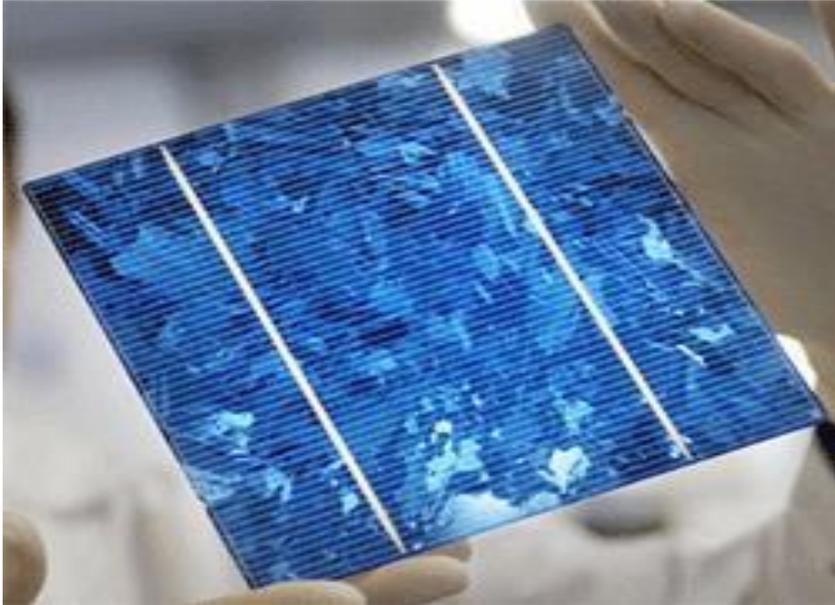


Figure I.6 : Silicium Polycristalline

- **Silicium amorphe**

Les cellules amorphes se composent de couches de silicium très minces appliquées sur un support en verre, en plastique souple ou en métal. A l'origine, leur rendement était plus faible (6 à 10%), mais la technologie évolue rapidement, ils fonctionnent avec un éclairage faible ou diffus (même par temps couvert, y compris sous éclairage artificiel de 2 à 3000 lux).



Figure I.7 : Silicium Amorphe.

- **Autres technologies**

Les cellules sont faites aussi avec d'autres matériaux comme l'arséniure de gallium (GaAs), le tellure de cadmium (Cd Te) ou le diséléniure de cuivre et d'indium (CIS) qui ont l'avantage d'absorber fortement la lumière, mais leur manipulation est difficile et certains matériaux comme le cadmium pose des problèmes de toxicité [6]

I.5 Module photovoltaïque

Les puissances demandées par les charges couramment utilisées nécessitent conjointement des tensions supérieures à ceux que peuvent fournir les cellules élémentaires, il faut donc envisager des groupements. Pour cela les cellules sont assemblées pour former un module les connexions en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la même tension. [5]

Un module photovoltaïque protégé de l'humidité par un capsulage de verre et de plastique. L'ensemble est ensuite muni d'un cadre et d'une boîte de jonction électrique. [4]

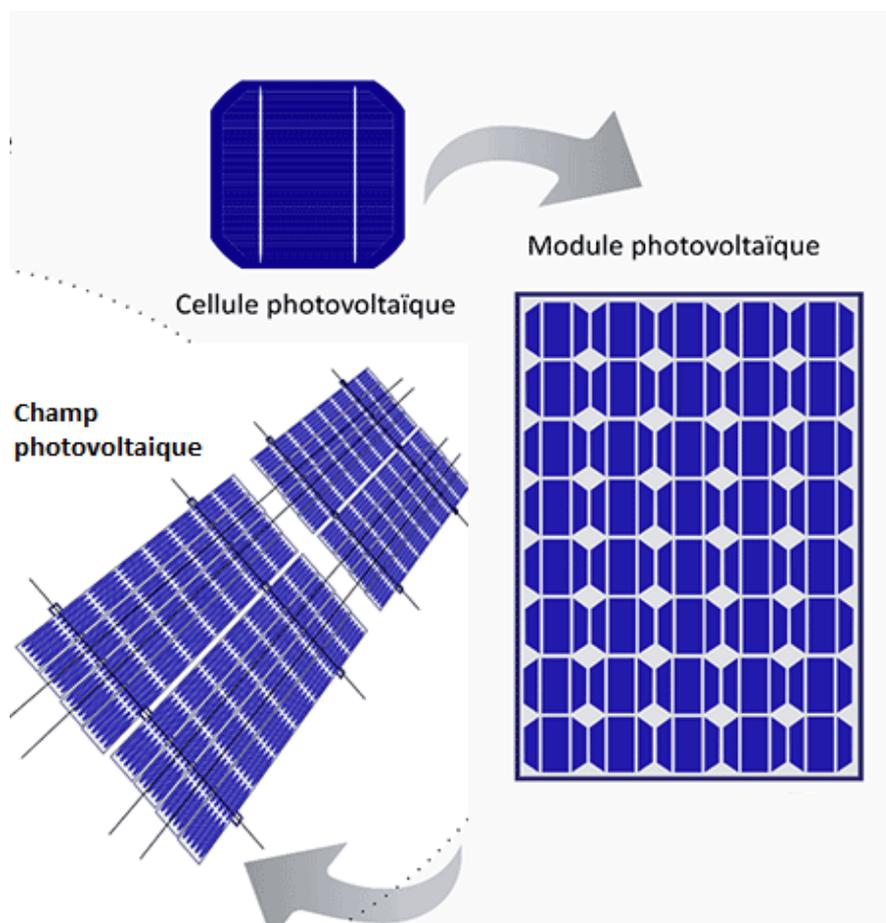


Figure. I.8 : Cellule photovoltaïque, le module et le champ PV

I.5.1 Étude de positionnement

Pour un rendement optimal, nous devons orienter les panneaux pour qu'on tire un maximum de puissance sur l'ensemble de la journée, chaque endroit au monde a des conditions climatiques spécifiques en fonction de la localisation, nous en Afrique du nord on dispose d'un

énorme potentiel en terme de l'énergie solaire bénéficiant d'un ensoleillement tout au long de l'année, donc on orientant les panneaux au sud avec un angle d'inclinaison de 30° on profitera au maximum du l'éclairement.

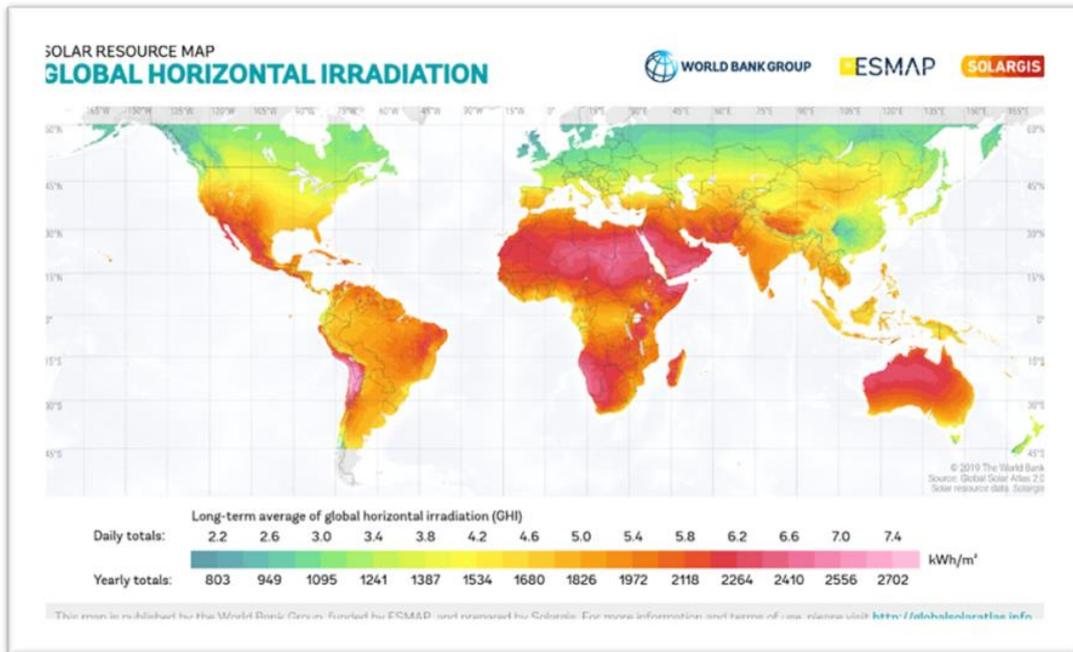


Figure. I.9 : Différents valeurs d'éclaircements dans le monde

L'énergie solaire provient du soleil tandis que la valeur de l'éclaircissement est 1360W/m² au niveau du sol, À cause de l'absorption dans l'atmosphère, la densité d'énergie solaire est réduit á 1000W/m² [8]

I.5.2 Types des systèmes photovoltaïques

Généralement il existe trois types de systèmes photovoltaïques, les systèmes autonomes, les systèmes hybrides et les systèmes connectés à un réseau. Les deux premiers sont indépendants du système de réseau distribution d'électricité, on les retrouve généralement dans les régions isolées. [9]

a) Système photovoltaïque raccordé au réseau

Les systèmes de production d'énergie photovoltaïque connectés à un réseau (figure I.11) sont une résultante de la tendance à la décentralisation du réseau électrique. L'énergie est produite plus près des lieux de consommation. Les systèmes connectés à un réseau réduisent la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution. Il produit sa propre électricité et achemine son excédent d'énergie vers le réseau, auprès duquel il s'approvisionne au besoin, ces transferts éliminent le besoin d'acheter et d'entretenir une batterie. Il est toujours possible d'utiliser ceux systèmes pour servir d'alimentation d'appoint lorsque survient une panne de réseau [9]

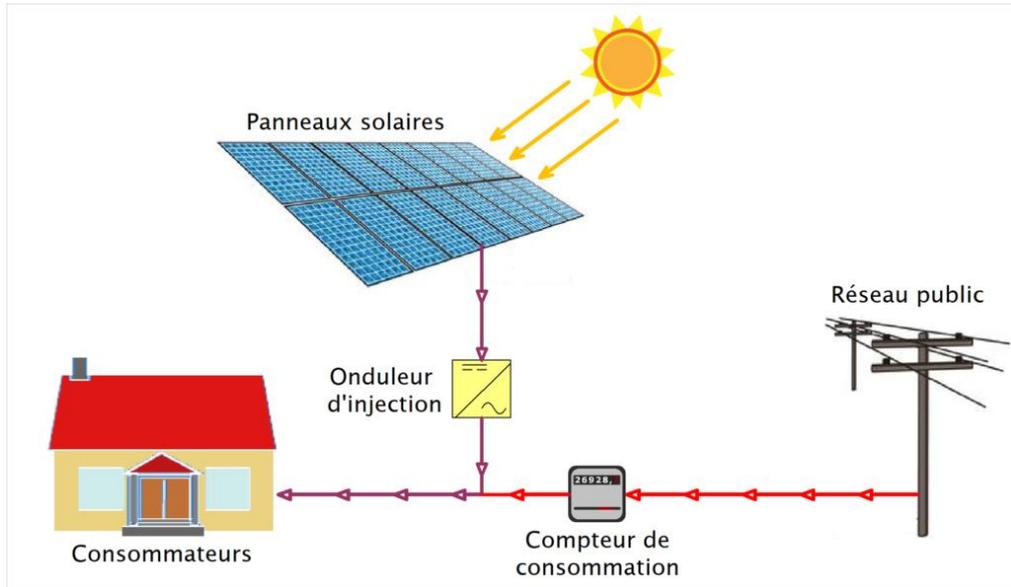


Figure I.10 : Systèmes photovoltaïque connectés au réseau

b) Systèmes autonomes

Ces systèmes photovoltaïques sont installés pour assurer un fonctionnement autonome sans recours à d'autres sources d'énergie. Généralement, ces systèmes sont utilisés dans les régions isolées et éloignées du réseau. Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes sont décrits sur la figure (I.12) qui traduit les différentes possibilités offertes : couplage direct à une charge adaptée ou couplage avec adaptateur d'impédance MPPT (Maximum Power Point Tracking), fonctionnement au fil du soleil ou avec stockage d'énergie électrique. [9]

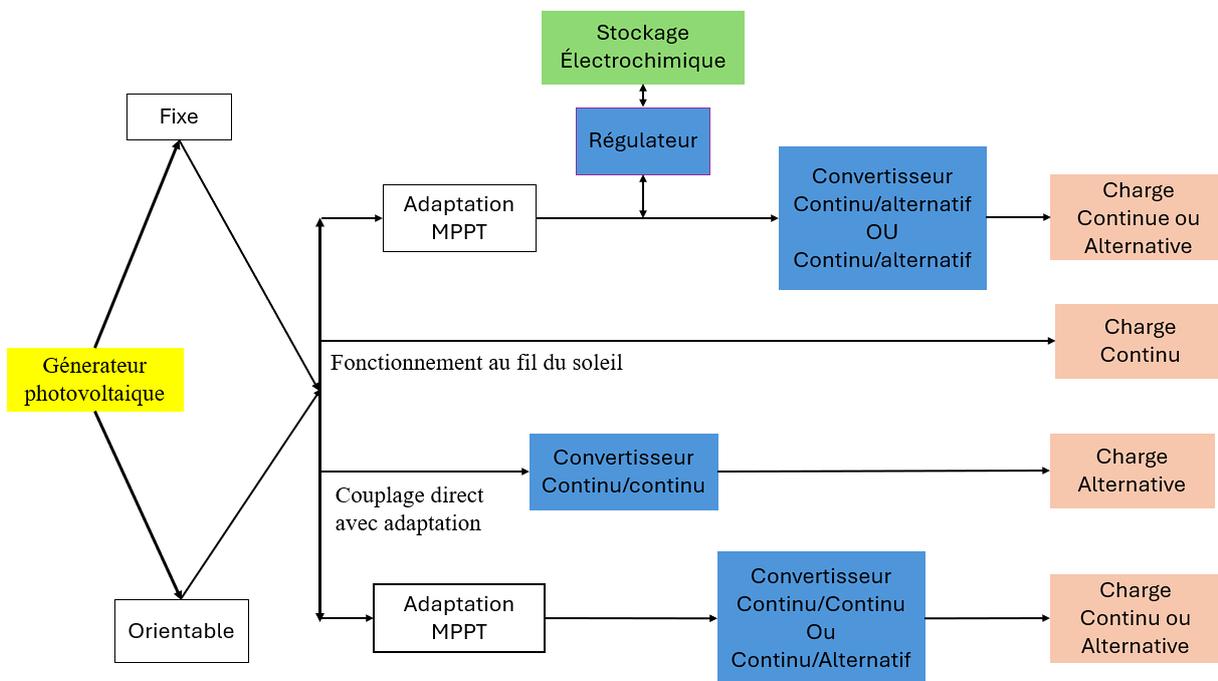


Figure I.11 : Différents types de systèmes photovoltaïques autonomes. [9]

Ces installations se composent essentiellement de trois principaux composants : des modules solaires, la batterie, et du régulateur de charge. La batterie d'un tel système se charge le jour, et sert de réservoir d'énergie en permanence. Elle peut sans problème, à un instant donné, recevoir un courant de charge et débiter un courant de décharge de valeur différente.

Les appareils alimentés sont donc câblés sur la batterie au travers du régulateur de charge, cela pour assurer le chargement optimal de l'accumulateur tel que lorsque la batterie est pleine, ce dernier coupe la charge pour éviter qu'elle ne souffre de surcharge.

En journée, le générateur photovoltaïque alimente les récepteurs courant continu en fonctionnement et charge la batterie de stockage. Un contrôleur de charge évite la surcharge de la batterie en cas de surproduction solaire. Durant la nuit et par mauvais temps, les récepteurs sont alimentés par la batterie. Un limiteur de décharge protège la batterie en cas de décharge profonde. En présence de récepteurs fonctionnant en alternatif, un onduleur autonome convertit la tension continue en tension alternative, permettant ainsi leur alimentation. [10]

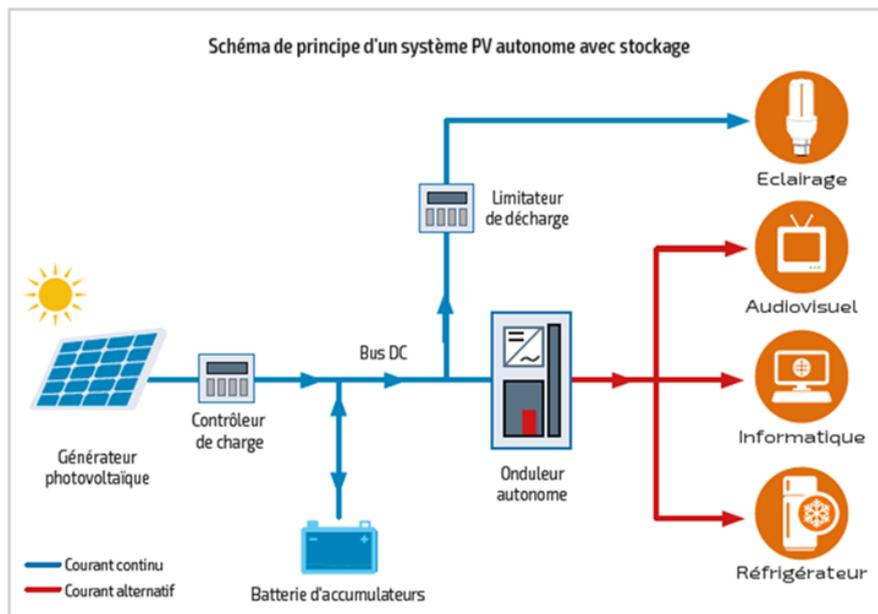


Figure I.12 : Schéma d'un système autonome avec stockage

c) Systèmes hybrides

Les systèmes d'énergie hybride associent au moins deux sources d'énergie renouvelable aussi une ou plusieurs sources d'énergie classiques. Les sources d'énergie renouvelable, comme le photovoltaïque et l'éolienne ne délivrent pas une puissance constante, mais vu leurs complémentarités, leur association permet d'obtenir une production électrique continue. Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées.

Les différentes sources dans un système hybride peuvent être connectées en deux configurations, architecture à bus continu et architecture à bus alternatif [Abo 05], [Vec 05]. [9]

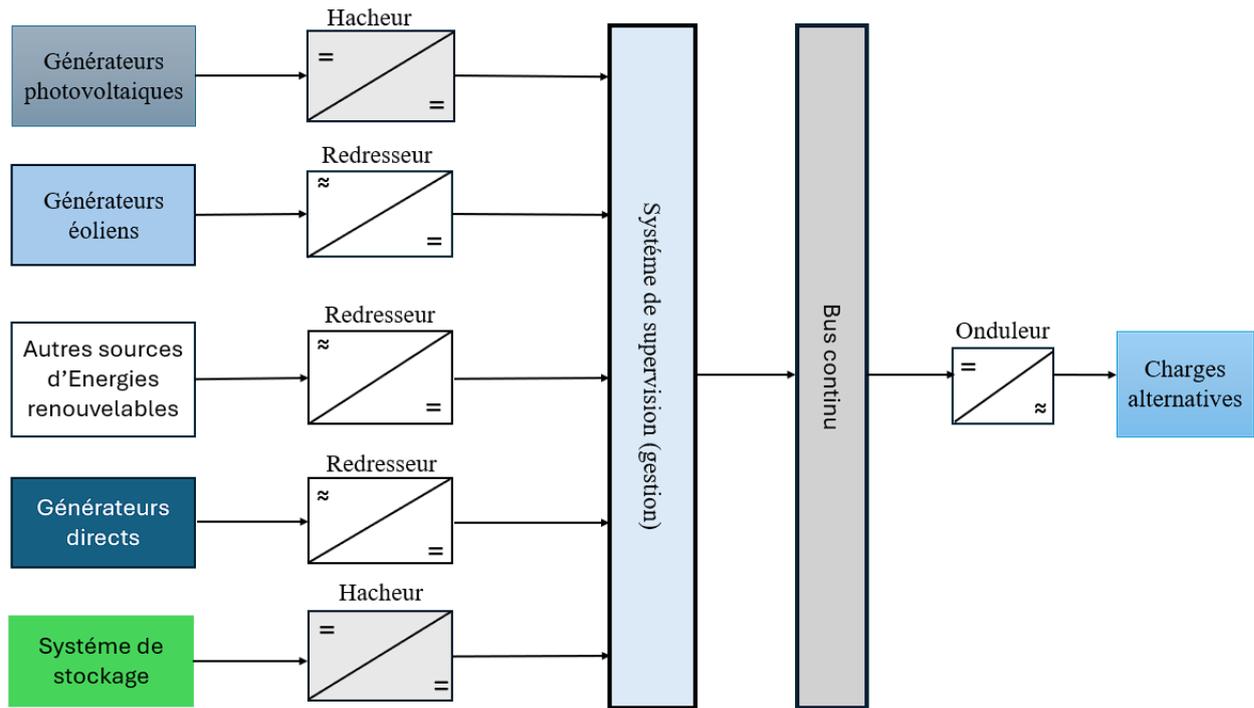


Figure I.13 : Configuration du système hybride à bus continu [9]

Dans la première configuration, la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus continu (voir figure I.14). Ainsi, les systèmes de conversion d'énergie à courant alternatif (CA) fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour être convertie ensuite en courant continu (CC). Les générateurs sont connectés en série avec l'onduleur pour alimenter les charges alternatives. L'onduleur doit alimenter les charges alternatives à partir du bus continu et doit suivre la consigne fixée pour l'amplitude et la fréquence. La fonction spécifique du système de supervision est la commande de mise en marche et arrêt des générateurs et du système de stockage. L'avantage de cette topologie est la simplicité de commande. Dans la seconde configuration tous les composants du système hybride sont reliés à la charge alternative. [9]

I.6 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque présente un certain nombre d'avantages, parmi eux on cite :

- Sa source est gratuite ; Le soleil est la seule ressource dont a besoin un panneau solaire et le soleil brillera jusqu'à la fin des temps. De plus, la plupart des cellules photovoltaïques sont fabriquées à base de silicium, un matériau abondant et non toxique (second matériau le plus abondant sur Terre).
- L'énergie solaire photovoltaïque ne génère ni bruit, ni émissions nocives, ni gaz polluants l'électricité solaire utilise seulement l'énergie du soleil comme source. Elle ne crée aucun coproduit nocif et contribue activement à réduire le réchauffement climatique.
- L'énergie solaire exige peu de maintenance les modules solaires ne nécessitent pratiquement aucune maintenance et faciles à installer.
- L'énergie solaire photovoltaïque fournit de l'électricité aux zones rurales les plus isolées.

Parmi ces inconvénients ; on cite :

- Les modules photovoltaïques ne fonction pas quand l'énergie solaire n'est pas disponible.
- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un cout élevé.
 - Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%).
 - Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru .la fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulation associés soient judicieusement choisis.
 - Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs Diesel pour des faibles demandes d'énergie en région isolée

I.7 Conclusion :

En conclusion, les systèmes photovoltaïques représentent une solution inestimable dans la quête d'une transition énergétique durable. Leur capacité à convertir l'énergie solaire en électricité, combinée à leur adaptabilité et à leur polyvalence, en font une option attractive pour répondre aux besoins énergétiques croissants des sociétés modernes.

Pour maximiser l'efficacité et l'impact environnemental positif des systèmes photovoltaïques, il est impératif de continuer à investir dans la recherche et le développement de technologies de stockage d'énergie plus durables et efficaces. En fin de compte, en adoptant et en améliorant ces systèmes, nous pouvons progresser vers un avenir énergétique plus propre, plus durable et plus résilient pour tous.

Chapitre II :

Modélisation d'un système photovoltaïque

II.1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque joue un rôle de plus en plus crucial dans la transition mondiale vers des sources d'énergie renouvelables et durables. Cependant, pour maximiser l'efficacité et la fiabilité des systèmes photovoltaïques, il est essentiel de comprendre leur comportement et leurs performances dans diverses conditions. C'est là qu'intervient la modélisation des systèmes photovoltaïques.

Cette énergie est devenue l'un des piliers fondamentaux de la transition énergétique mondiale vers un avenir plus durable et respectueux de l'environnement. Cependant, pour exploiter pleinement le potentiel de cette source d'énergie renouvelable, il est crucial de comprendre et de modéliser avec précision le comportement des systèmes photovoltaïques dans une variété de conditions. L'importance de la modélisation dans ce contexte ne peut être surestimée, car elle permet non seulement de prédire les performances des installations solaires, mais aussi de concevoir des systèmes plus efficaces, d'optimiser leur fonctionnement et de planifier leur intégration dans le réseau électrique. En effet, la modélisation des systèmes photovoltaïques offre une perspective essentielle pour les concepteurs, les ingénieurs et les décideurs, en fournissant des outils puissants pour évaluer les impacts environnementaux, économiques et sociaux de ces installations, et en aidant à prendre des décisions éclairées pour promouvoir une transition énergétique réussie. Ainsi, dans cette ère de transition vers des sources d'énergie plus propres et durables, la modélisation des systèmes photovoltaïques émerge comme un pilier indispensable pour façonner un avenir énergétique plus prometteur et plus responsable.

Dans ce chapitre, nous représentons d'abord un modèle d'un générateur photovoltaïque (idéal et réel), modèle d'un champ photovoltaïque et ses types de connexion, l'effet des différents paramètres sur le PV, modèle des convertisseurs DC/DC et ses types.

L'objectif de cette étude consiste à modéliser un système photovoltaïque, et obtenir les caractéristiques dynamiques de cellules photovoltaïques et les convertisseurs sous l'environnement Simulink/Matlab.

II.2 Modélisation et simulation de la cellule photovoltaïque

Il existe de nombreux modèles mathématiques de générateurs photovoltaïques présents dans la littérature, qui décrivent le fonctionnement et le comportement des générateurs photovoltaïques. Parmi ces modèles le modèle à une diode qui est largement adopté dans les travaux scientifiques

La figure II.1 présente un schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale qui est constituée d'une source de courant (la photopile) court-circuitée par une diode, le courant est généré en excitant cette source par des photons grâce à l'énergie lumineuse [11]

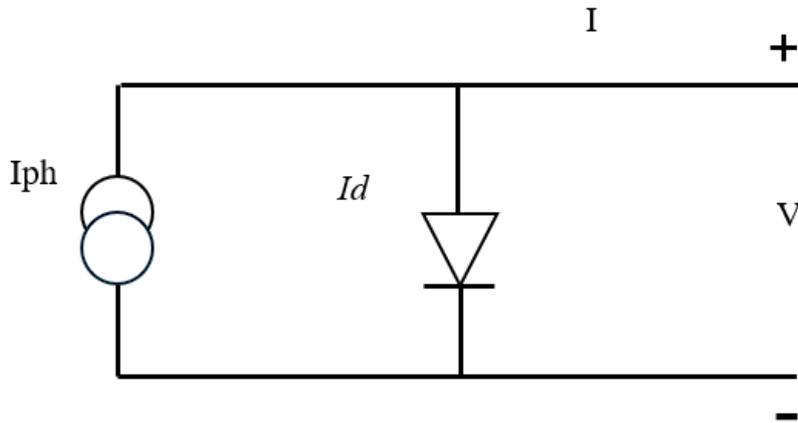


Figure II.1 : Circuit équivalent simplifié d'une cellule solaire

L'équation caractéristique résultant de ce modèle idéal est :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (II.1)$$

Avec :

$$I_d = I_s \frac{V_{pv}}{e^{AV\tau} - 1} \quad (II.2)$$

D'où :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \frac{V_{pv}}{e^{AV\tau} - 1} \quad (II.3)$$

Dans ces équations :

$I_{pv}, I_d, I_s, I_{ph}, V_{pv}$ Désignent respectivement photo courant. Courant de diode, courant inverse de saturation de la diode, courant fournis par la cellule, tension fournie par la cellule.

Le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque est présenté dans la figure II.2. Il inclut une source de courant, une diode, une résistance série et une résistance shunt [12, 13].

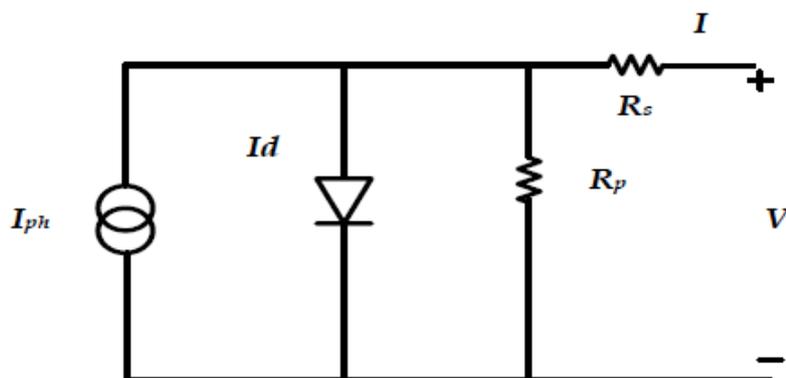


Figure II.2 : Schéma équivalent du modèle à une diode.

Le courant généré par le module est donné par la loi de Kirchoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{Rsh} \quad (II.4)$$

Avec :

$$I_d = I_0 \cdot \left(\exp \frac{q(V_{pv} + R_s I_{pv})}{AKT} - 1 \right) \quad (II.5)$$

$$I_{Rsh} = \frac{(V_{pv} + R_s * I_{pv})}{R_{sh}} \quad (II.6)$$

D'où :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left(\exp \frac{q(V_{pv} + R_s I_{pv})}{AKT} - 1 \right) - \frac{(V_{pv} + R_s * I_{pv})}{R_{sh}} \quad (II.7)$$

Dans cette équation

Le photo-courant I_{PH} d'une cellule photovoltaïque est défini comme le courant généré en réponse à l'illumination solaire. Le courant de saturation inverse de la diode I_0 représente la fuite de courant inverse à travers la diode de la cellule. Les variables q , a , K et T correspondent respectivement à la charge de l'électron, au facteur d'idéalité de la diode, à la constante de Boltzmann et à la température de la cellule. La tension V_{pv} est mesurée aux bornes de la cellule photovoltaïque, tandis que I_{pv} désigne le courant électrique produit par la cellule elle-même. Les résistances R_s et R_{sh} représentent les résistances série et shunt de la cellule, respectivement.

II.3 Modélisation d'un modèle photovoltaïque à une diode

Le bloc réalisé en utilisant l'environnement Matlab/Simulink est représenté sur figure (II.3). Les caractéristiques courant-tension et puissance-tension ont été obtenues pour des conditions standards de fonctionnement (ensoleillement 1000 W/m^2 et température 25°C). Les paramètres (I_{cc} , I_{mpp} , V_{oc} , V_{mpp}) sous les conditions standards de fonctionnement ($G_{stc}=1000 \text{ W/m}^2$, $T_{stc}=25^\circ\text{C}$) sont fournis par le constructeur de panneaux photovoltaïque et énuméré dans le tableau (II.1)

Tableau II.1 : Caractéristiques du panneau utilisé

Puissance max du panneau P_{PPM}	330 W
Courant au point de puissance max I_{PPM}	8.21 A
Tension au point de puissance max V_{ppm}	52.4 V
Courant de court-circuit I_{cc}	6.214 A
Tension en circuit ouvert V_{oc}	32.9 V
Coefficient d'incrémentatation du courant	3.00 Ma/°C
Coefficient d'incrémentatation de la tension	-150mV/°C

La caractéristique I-V de ce module est représentée par les équations suivantes :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left(\exp \frac{q(V_{pv} + R_s * I_{pv})}{AKT} - 1 \right) - \frac{(V_{pv} + R_s * I_{pv})}{R_{sh}} \quad (II.8)$$

$$I_{ph} = (I_{sc} + K_i(T - 298.5)) * \frac{G}{1000} \quad (II.9)$$

$$I = \frac{I_{sc} + K_i(T - 298.5)}{\exp \frac{q(V_{oc} + K_v(T - 298.5))}{AKTN_s} - 1} \quad (II.10)$$

I_{ph} , I_0 , N_s , V , I , T , a , G , R_s , et R_{sh} désignent respectivement , le photo-courant, le courant de saturation inverse de la diode, le nombre des cellules en série, la tension aux bornes du module, le courant du module, la température ambiante en K, le facteur d'idéalité, irradiation solaire en W/m² , les résistances série et shunt du module.

Afin de retrouver les caractéristiques principales de notre panneau photovoltaïque, nous avons créé le modèle mathématique cité précédemment (modèle à une diode) sous conditions STC avec l'environnement Matlab/Simulink.

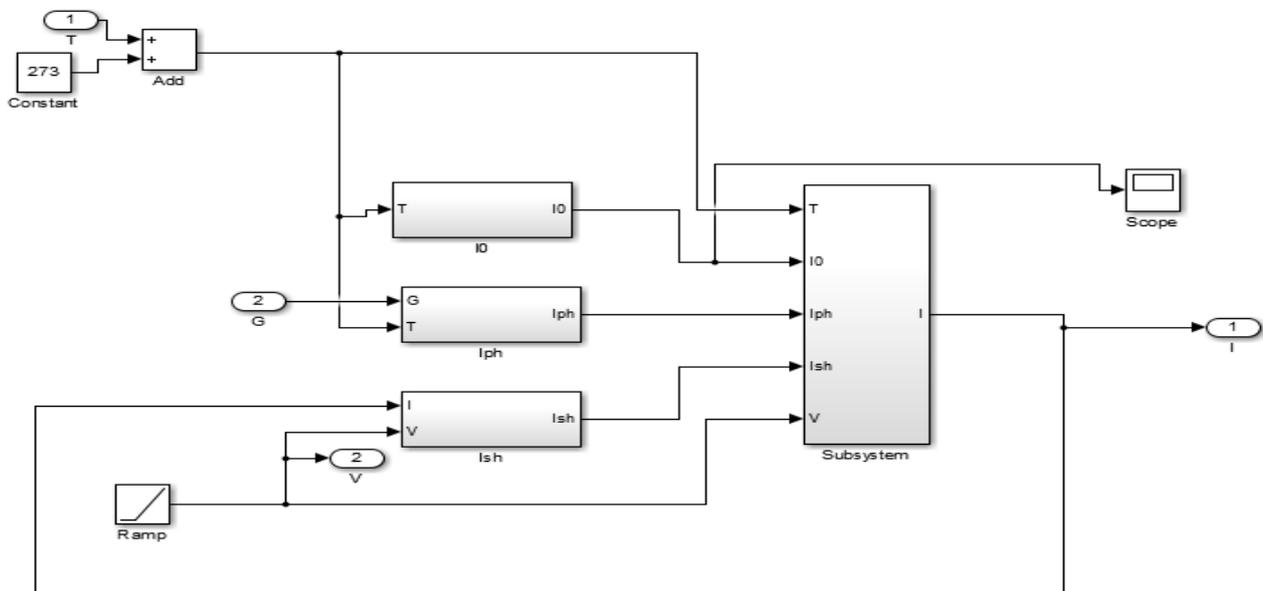


Figure II.3 : Modèle Matlab/Simulink

II.3.1 Caractéristique Courant-tension (I_{pv} - V_{pv}) Puissance-Tension(P_{pv} - V_{pv}) dans les conditions Standard

Nous allons étudier le comportement de notre panneau photovoltaïque dans les conditions standard de fonctionnement à l'insolation $G = 1000\text{W/m}^2$ et à la température $T = 25^\circ\text{C}$.

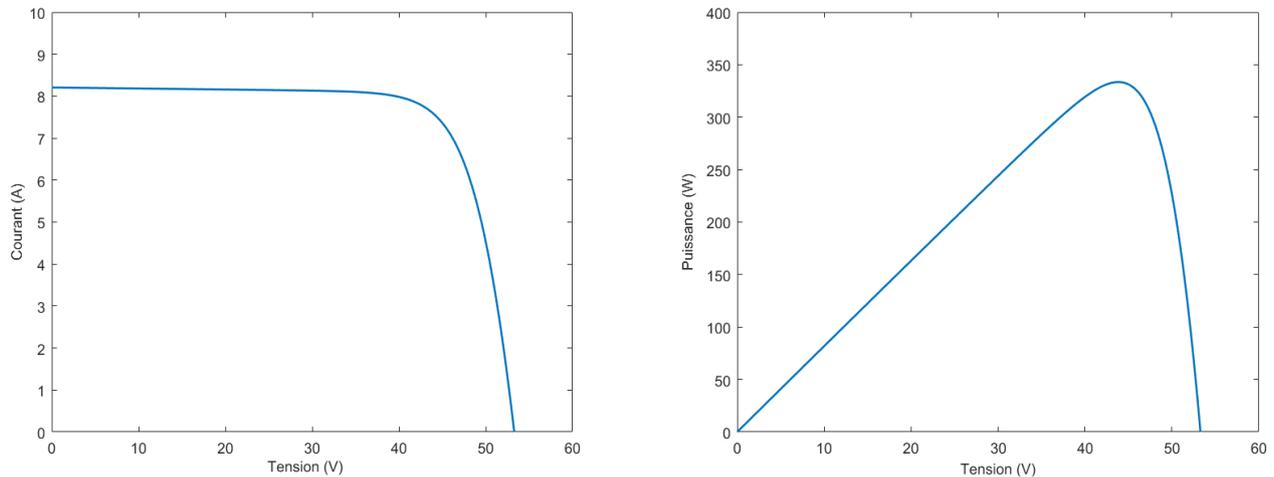


Figure II.4 : Caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ et $P_{pv}=f(V_{pv})$ dans les conditions : $G_{Stc}=1000\text{W/m}^2$, $T_{Stc}=25^\circ\text{C}$.

Grâce aux résultats de simulation obtenus, nous avons confirmé la validité du modèle à une diode. Les caractéristiques Puissance-Tension et Courant-Tension correspondent de manière précise au comportement typique d'un panneau photovoltaïque.

II.3.2 Types de connexions

a. Association en Série

Dans un groupement en série Figure.II.5, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par l'addition des tensions à courant donné. [14]

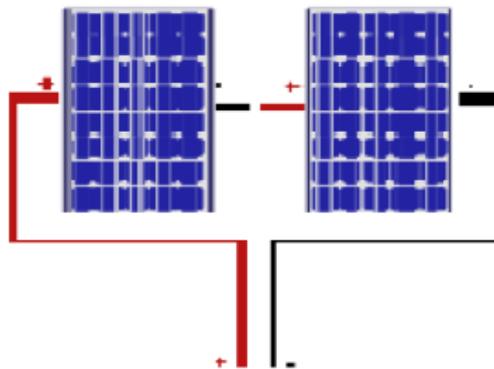


Figure II.5 : Association des modules en série

La Figure.II.6 montre la caractéristique résultante (I_s, V_s) obtenue par l'associant en série (indice s) de n_s cellules identiques (I_{cc}, V_{co}).

Avec :

le courant de court-circuit :

$$I_{scc} = I_{cc} \quad (II.11)$$

la tension de circuit ouvert.

$$V_{sco} = n_s V_{co} \quad (II.12)$$

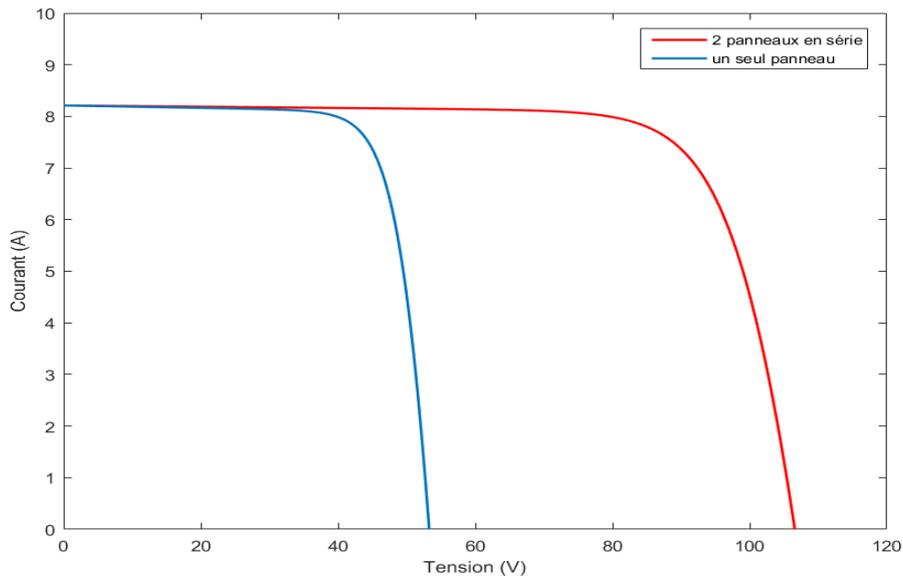


Figure II.6 : Caractéristique résultante d'un groupement en série d'une cellule identique

b. Association en parallèle

Dans un groupement de cellules connectées en parallèle Figure.II.7, les cellules étant soumises à la même tension, les intensités s'additionnent : la caractéristique résultante est obtenue par addition de courants à tension donnée.

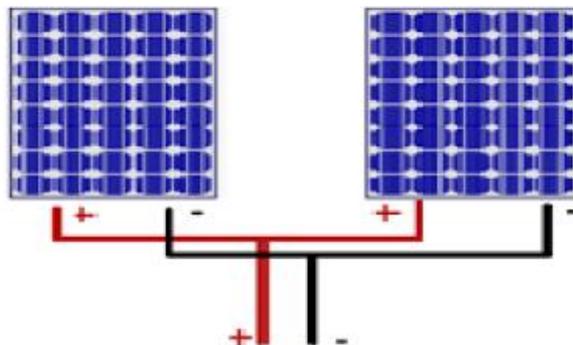


Figure II.7 : Association des modules en parallèle

La Figure II.8 montre la caractéristique résultante (I_{PCC}, V_{Pco}) obtenue en associant en parallèle (indice p) n_p cellules identiques (I_{cc}, V_{co}).

le courant de court-circuit :

$$I_{pcc} = n_p I_{cc} \quad (II.13)$$

la tension de circuit ouvert :

$$V_{pco} = V_{co} \quad (II.14)$$

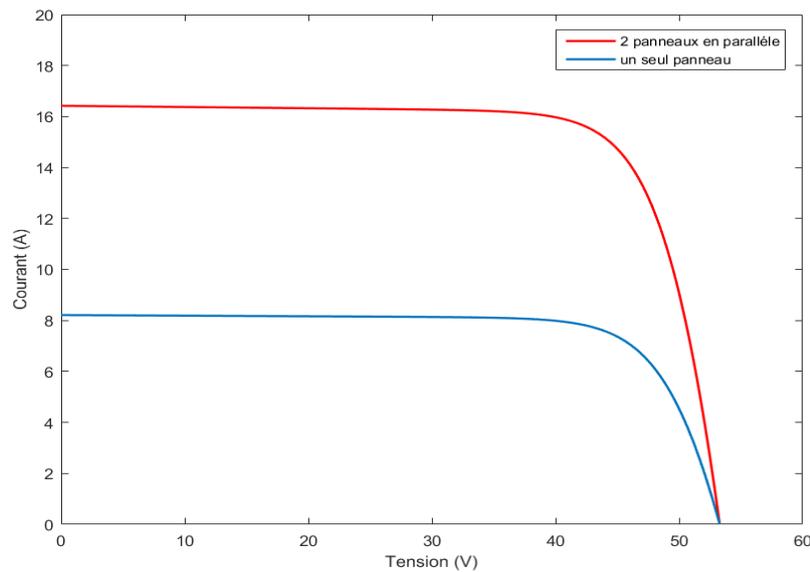


Figure II.8 : Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de deux cellules identique

c. Association mixte (série-parallèle)

Le générateur photovoltaïque est constitué d'un réseau série-parallèle de nombreux modules photovoltaïques regroupés par panneaux photovoltaïques figure II.10. La caractéristique électrique globale courant/tension du PV se déduit donc théoriquement de la combinaison des caractéristiques des cellules élémentaires supposées identiques qui le composent par deux affinités de rapport n_s parallèlement à l'axe des tensions et de rapport n_p parallèlement à l'axe des courants,

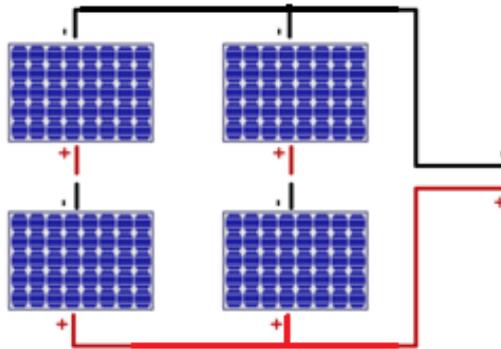


Figure II.9 : Association mixte des modules

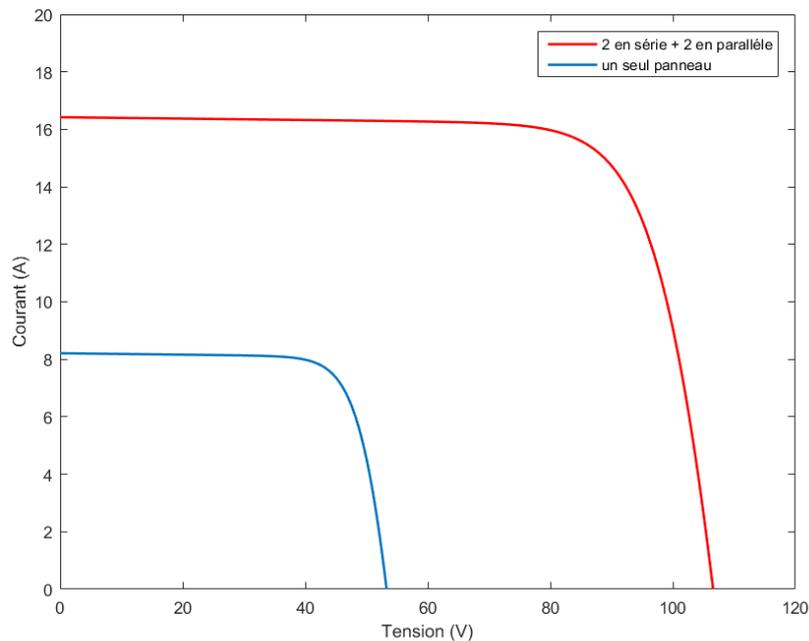


Figure II.10 : Caractéristique d'un groupement mixte

Les générateurs photovoltaïques sont alors réalisés en vue d'augmenter la tension (association en série) ou augmenter le courant (association en parallèle) par l'association d'un grand nombre de cellules élémentaires de même technologie et de caractéristiques identiques. Le câblage série-parallèle est donc utilisé pour obtenir un module PV (ou panneau PV) aux caractéristiques souhaitées (courant et tension suffisants) [14].

- **String et le champ photovoltaïque**

En fonction de la capacité du panneau solaire, le "string" est formé par l'assemblage en série de plusieurs modules. Ces "strings" sont ensuite reliés en parallèle pour créer un système photovoltaïque complet. Afin d'empêcher qu'une branche de cellules reliées en série ne soit alimentée par d'autres "strings" reliés en parallèle, il est nécessaire d'installer des diodes en série (diodes anti-retour) dans chaque branche.

II.4 Convertisseurs DC/DC

L'hacheur est un dispositif de conversion de courant continu à un niveau spécifique de tension (ou de courant) en un autre niveau de tension (ou de courant) continu. Il est essentiel dans des applications telles que le stockage de l'énergie solaire dans des batteries ou pour alimenter des charges nécessitant un courant continu. [15]

L'hacheur est constitué de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. En conditions idéales, ces composants ne dissipent aucune puissance active, ce qui contribue à obtenir de bons rendements dans les hacheurs. [16]

Les hacheurs sont des convertisseurs de courant continu qui opèrent en découpant une grandeur d'entrée continue, que ce soit une tension ou un courant, et produisent une sortie également continue ou présentant une faible ondulation [17].

Le choix du type d'hacheur dépendra des batteries dans lesquelles nous stockerons l'énergie.

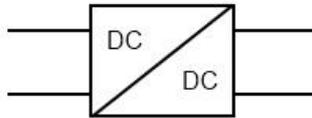


Figure II.11 : Symbole d'un convertisseur DC-DC.

II.5 Types des convertisseur DC/DC

Il existe différents types de convertisseurs DC-DC qui sont utilisés fréquemment dans de telles applications comme :

- hacheur série **Buck** « abaisseur »
- hacheur parallèle **Boost** « élévateur »
- hacheur série-parallèle **Buck-Boost** qui est la combinaison des deux précédents

1) Convertisseur dévolteur (Buck Converter)

Le convertisseur abaisseur (Figure II.12), également connu sous le nom de hacheur Buck ou hacheur série dans la littérature, est un dispositif capable de relier deux sources de courant/tension de types différents, ou leur inverse. L'utilisation de l'hacheur Buck dans les systèmes de conversion photovoltaïque est particulièrement adaptée, car le générateur photovoltaïque fournit un courant continu, tandis que le récepteur, généralement une batterie, agit comme une source de tension. Son utilisation courante consiste à abaisser la tension d'entrée à une tension de sortie inférieure, où le rapport de conversion $\alpha = \frac{V_o}{V_i}$ varie en fonction du rapport cyclique de l'interrupteur [18].

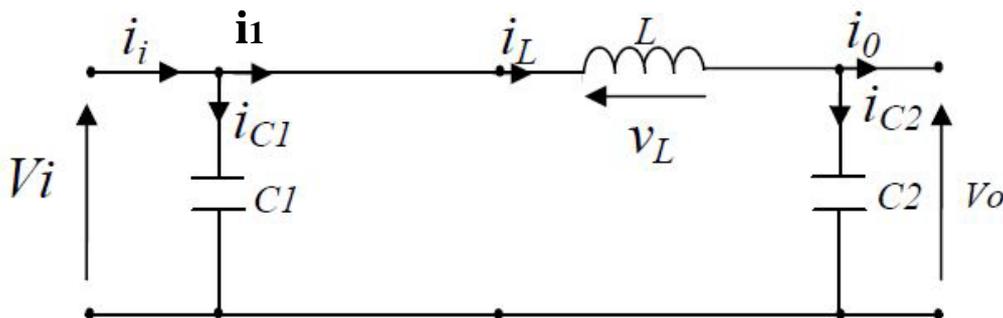


Figure II.12 : Schéma de principe d'un convertisseur Buck

- **Modèle mathématique**

Pour comprendre le fonctionnement réel de ce convertisseur, il est essentiel de maîtriser en détail son modèle mathématique. Pour ce faire, nous devons représenter le circuit équivalent selon les deux états de l'interrupteur, puis dériver le modèle mathématique reliant les variables d'entrée et de sortie. La Figure II.13 illustre le schéma du circuit équivalent d'un convertisseur

abaisseur avec l'interrupteur fermé pendant une durée de $\alpha \cdot T_s$ tandis que la Figure II.13 représente le même convertisseur abaisseur avec l'interrupteur ouvert pendant la période $(1 - \alpha)T_s$. [19]

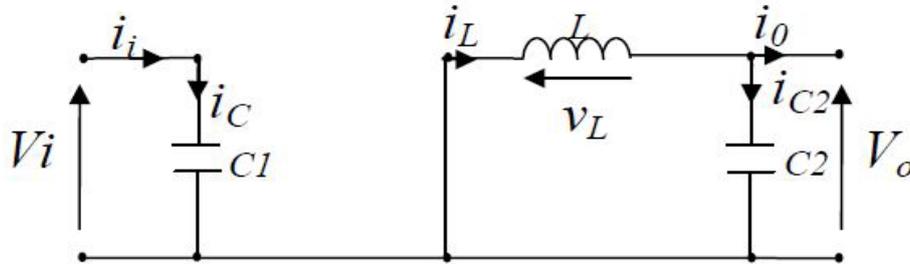


Figure II.13 : Schéma équivalent de l'hacheur série quand $T \in [0, \alpha \cdot T_s]$

Lorsqu'on applique la loi de Kirchhoff sur le circuit ci-dessus on aura les équations suivantes :

$$\begin{cases} I_{C_1}(t) = C_1 \frac{dv_1(t)}{dt} = i_i(t) - i_1(t) \\ I_{C_2}(t) = C_2 \frac{dv_2(t)}{dt} = i_i(t) - i_o(t) \\ V_1(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \end{cases} \quad (II. 14)$$

- **Rapport de conversion et rendement**

Le rapport de conversion M est défini comme étant le rapport entre la tension de sortie et la tension d'entrée comme suit : [20]

$$M(\alpha) = \frac{V_o}{V_i} = \eta \alpha \quad (II. 15)$$

Où η est le rendement du convertisseur défini comme étant le rapport entre la puissance de la sortie sur la puissance d'entrée :

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{V_o I_o}{V_i I_i} \quad (II. 16)$$

- **Modes de conduction continu**

Nous disons que le convertisseur travaille en mode de conduction continu lorsque le courant traversant l'inductance ne s'annule jamais. On montre ci-dessous le modèle de Buck. [21]

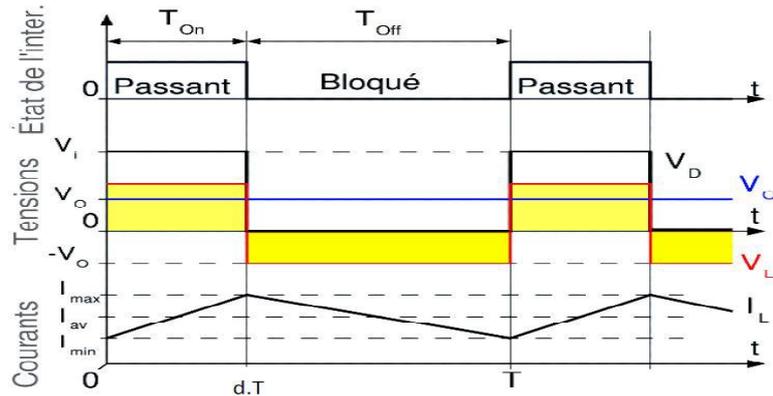


Figure II.14 : Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Buck.

2) Hacheur survolteur (Boost Converter)

Ce dernier est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de (boost) ou hacheur parallèle ; il transforme n'importe quelle tension en une autre plus élevée, son circuit de base est celui de la Figure II.15 :

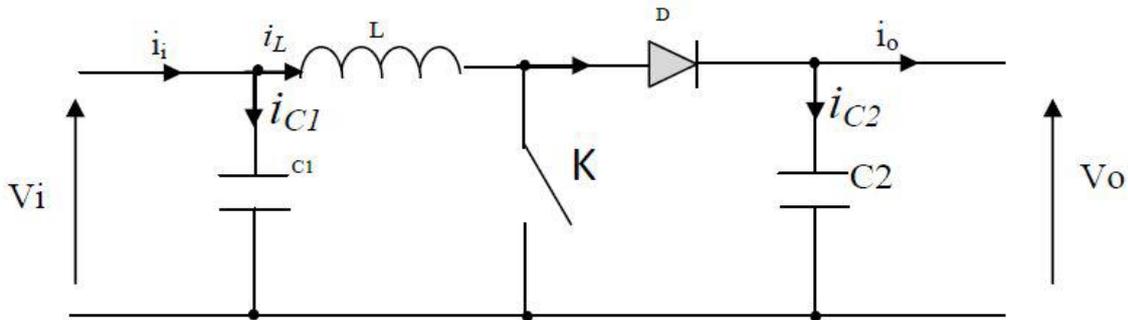


Figure II.15 : Schéma de principe d'un convertisseur Boost

- **Principe de fonctionnement**

Lorsque le commutateur K est fermé, pendant la durée T_{ON} c-à-d $t \in [0, \alpha T_S]$, le courant croît progressivement, ce qui laisse l'inductance stocker d'avantage d'énergie durant tout le temps de la fermeture de K. Puis le commutateur bascule en ouverture c.-à-d. pendant la durée T_{OFF} , $t \in [\alpha T_S ; T_S]$; durant cette action de transition de la fermeture à l'ouverture, l'inductance L s'oppose à la variation du courant I_L dans son circuit. Cette variation sollicite aussi la variation du flux magnétique dans son noyau, et donc elle génère une tension à ses bornes qui s'ajoute à la tension de source, le tout se retrouvant aux bornes du condensateur C_2 [22].

- **Modèle mathématique**

Afin de pouvoir synthétiser les fonctions du hacheur survolteur à l'état d'équilibre, il est nécessaire de présenter les schémas équivalents du circuit à chaque position de l'interrupteur K. celui de la figure II.16, présente le circuit équivalent du boost lorsque K est fermée c-à-d. entre $[0, \alpha T_S]$

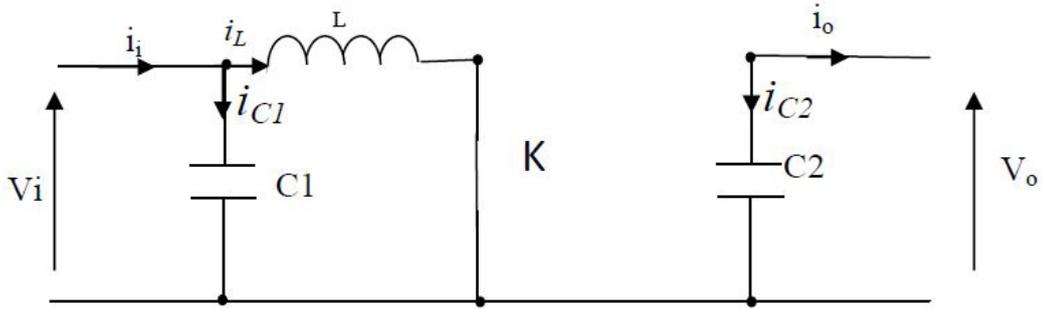


Figure II.16 : Schéma équivalent du hacheur survolteur quand $t \in [0; a.Ts]$

Comme pour le circuit Buck, l'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donne :

$$\begin{cases} I_{C_1}(t) = C_1 \frac{dv_1(t)}{dt} = I_i(t) - I(t) \\ I_{C_2}(t) = C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = -i_0(t) \\ V_1(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_1(t) \end{cases} \quad (II. 17)$$

à l'état ouvert de l'interrupteur K, le circuit équivalent au fonctionnement du Boost est le suivant :

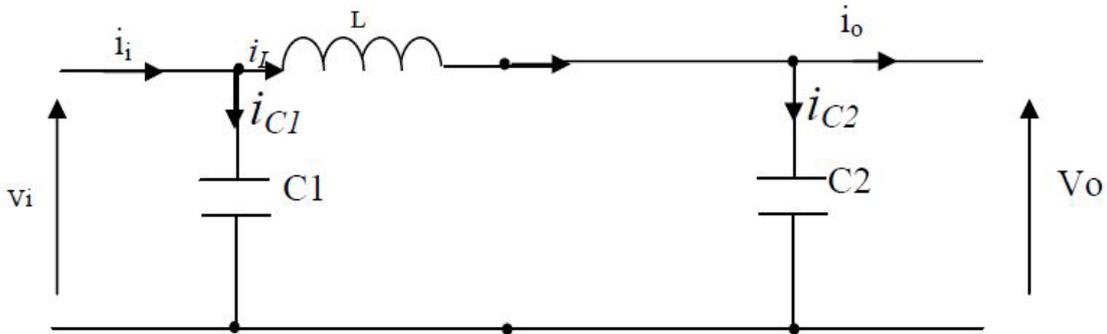


Figure II.17 : équivalent d'un hacheur survolteur lorsque $t \in [a.Ts, Ts]$

$$\begin{cases} I_{C_1}(t) = C_1 \frac{dv_1(t)}{dt} = i_i(t) - i_1(t) \\ I_{C_2}(t) = C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = i_i(t) - i_0(t) \\ V_1(t) = L \frac{di_1(t)}{dt} = V_i(t) - V_0(t) \end{cases} \quad (II. 18)$$

- **Rapport de conversion et rendement**
on peut calculer le rapport de conversion $\frac{V_0}{V_i}$ par :

$$M(\alpha) = \frac{V_0}{V_i} = \frac{1}{1 - \alpha} \tag{II. 19}$$

- **Mode de conduction continu**

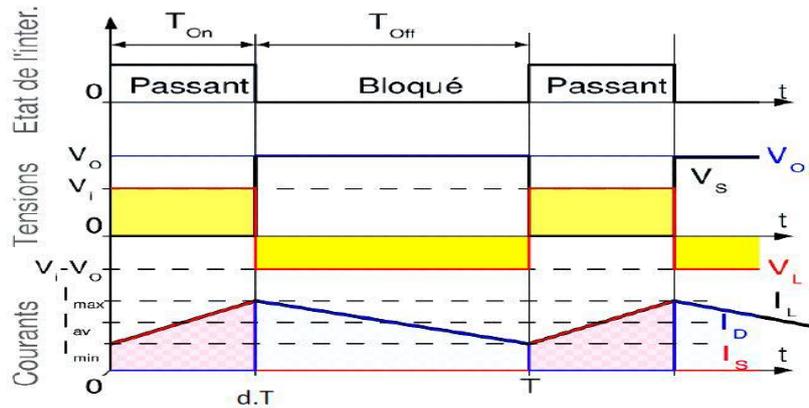


Figure II.18 : Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Boost.

3) Convertisseur dévolteur-survolteur (Buck-Boost Converter)

Ce convertisseur fusionne les fonctions d'élévation et de réduction de tension, permettant de transformer une tension d'entrée en une tension plus basse ou plus élevée selon les exigences. Son schéma de principe est représenté dans la figure II.19

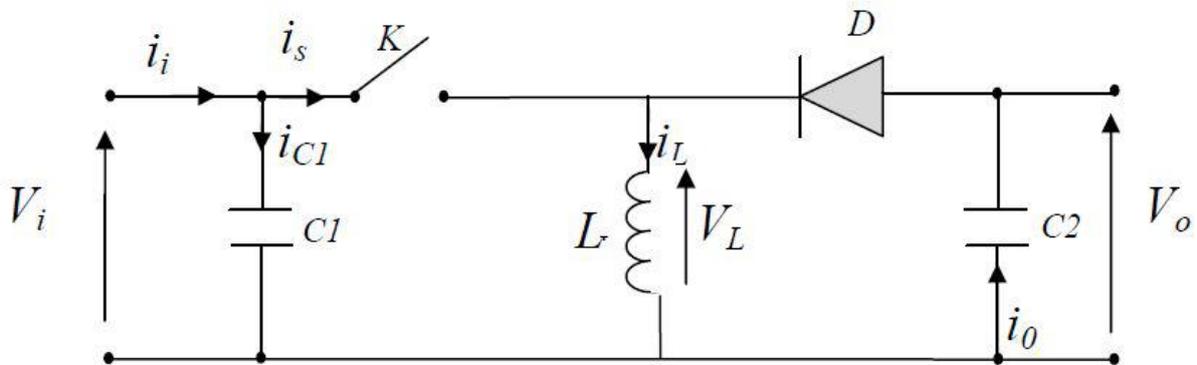


Figure II.19 : Convertisseur Buck-Boost

- **Principe de fonctionnement**

Lorsque le commutateur K est fermée, pendant la durée T_{ON} c-à-d $t \in [0, \alpha T_s]$, la diode est bloquée, tandis que le courant croît linéairement à l'intérieur de la self avec une pente égale à $\alpha = \frac{V_i}{L}$ ce qui laisse l'inductance stocke d'avantage d'énergie durant tout le temps de la fermeture de K.

Lorsque le commutateur s'ouvre c-à-d durant T_{OFF} $t \in [\alpha T_s, T_s]$ la diode conduit à travers l'inductance, dans laquelle le courant décroît aussi linéairement avec une pente égale à $\beta = -\frac{V_0}{L}$ [20]. Lorsque l'interrupteur K est fermée le circuit équivalent est montré sur la Fig.II.20 :

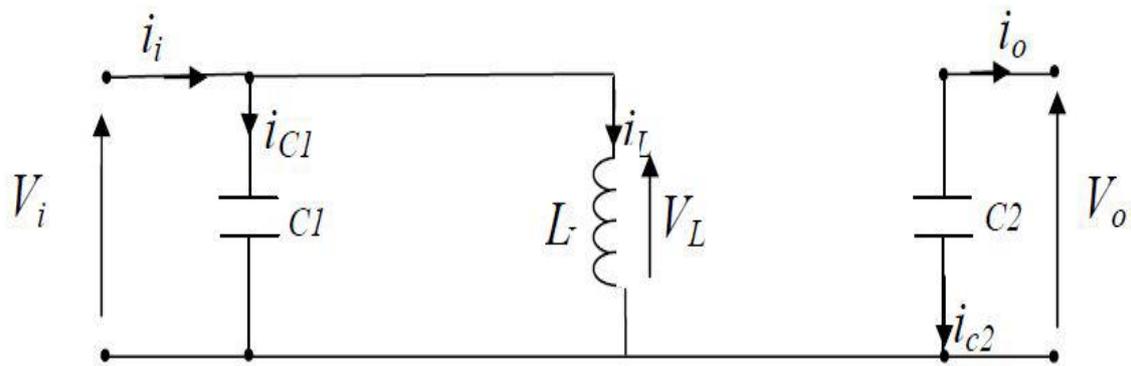


Figure II.20 : Circuit équivalent d'un Buck-Boost lorsque $t \in [0, \alpha.T_s]$

Avec l'application de la loi de Kirchoff a ce circuit nous obtiendrons les équations suivantes [18] [20] :

$$\begin{cases} I_{C_1}(t) = C_1 \frac{dv_1(t)}{dt} = i_i(t) - i_1(t) \\ I_{C_2}(t) = C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = -i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_i(t) \end{cases} \quad (II. 20)$$

Lorsque l'interrupteur K est ouvert le circuit équivalent apparait à la figure II.21 :

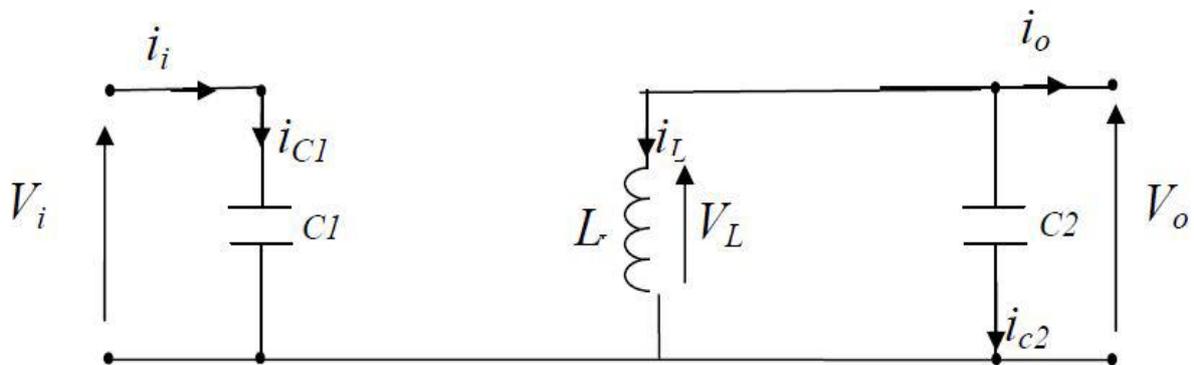


Figure II.21 : Equivalent d'un Buck-Boost lorsque $t \in [\alpha T_s, T_s]$

Le modèle d'équation dans cette configuration est comme suit :

$$\begin{cases} I_{C_1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ I_{C_2}(t) = C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = i_i(t) - i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_i(t)}{dt} = V_0(t) \end{cases} \quad (II. 21)$$

- **Rapport de conversion et rendement**

Le rapport de conversion se calcule comme suit :

$$M(\alpha) = \frac{V_0}{V_i} = -\frac{\alpha}{1-\alpha} \quad (II.22)$$

- **Sa forme de conduction :**

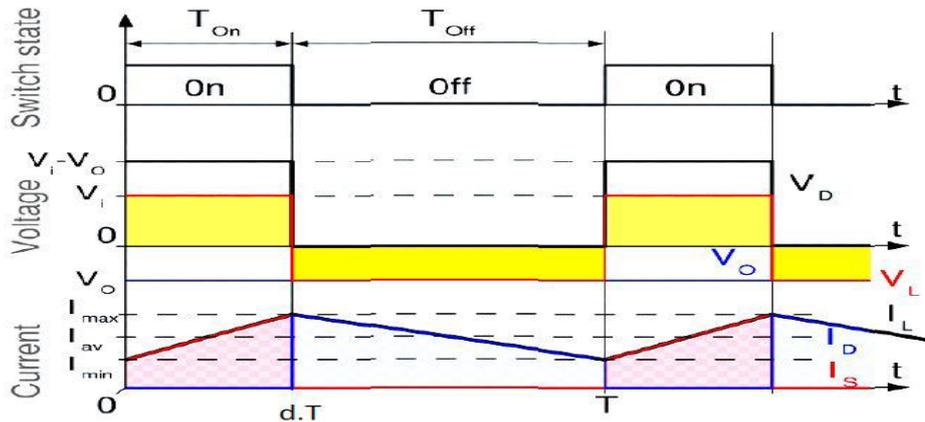


Figure II.22 : Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Buck-Boost

II.6 Control de Convertisseur DC/DC

Pour la meilleure exploitation de diverses ressources des énergies renouvelables, il est important d'améliorer l'efficacité et la fiabilité des systèmes photovoltaïques GPV. Le suivi de point de puissance maximale (MPPT) a un rôle important dans la performance des systèmes d'énergie photovoltaïque. Les systèmes photovoltaïques peuvent produire une puissance maximale à un point de fonctionnement particulier appelé Maximum Power Point (MPP).

Le suiveur de point de puissance maximum (MPPT) permet au module photovoltaïque de fonctionner à son point de puissance maximale. Le principe des commandes de (MPPT) est d'effectuer une recherche du point de puissance maximale (MPP) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance. Il est généralement conçu avec un convertisseur qui régule la puissance prélevée sur le panneau solaire. Le point de puissance maximale (MPP) est généralement contrôlé par deux variables de contrôle. La tension ou la puissance, mesurée à chaque fois est utilisée à nouveau dans une boucle pour déterminer si le module solaire est au point de puissance maximale.

L'association d'un convertisseur statique DC / DC, comme illustré à la modifie le point de fonctionnement du panneau à l'aide d'une commande externe afin de maximiser l'énergie transférée de manière permanente. L'algorithme de recherche MPPT peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisi et des performances recherchées. Cependant au final, tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé

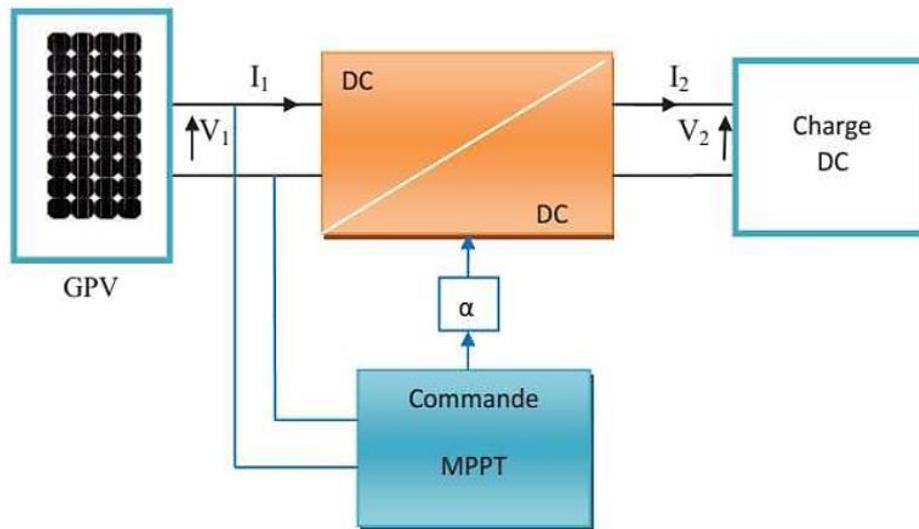


Figure II.23 : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque

II.7 Techniques de MPPT

II.7.1 Techniques MPPT dans le cas d'un éclairage uniforme

Pour maximiser la production d'énergie d'un panneau photovoltaïque (PPV), plusieurs techniques ont été développées pour assurer une adaptation efficace et un rendement optimal. Parmi celles-ci, les méthodes classiques telles que le Perturb and Observe (P&O) et le Fuzzy Logic Control (FLC) sont largement reconnues dans le domaine du suivi du point de puissance maximale (MPPT) pour les systèmes photovoltaïques. Ces approches sont bien étudiées, utilisées et comparées dans la recherche scientifique et l'industrie en raison de leur simplicité, de leur efficacité et de leur capacité à s'adapter à diverses conditions opérationnelles des systèmes solaires. Bien que des méthodes plus récentes comme les algorithmes évolutifs ou les réseaux de neurones gagnent en popularité, le P&O et le FLC demeurent des choix préférés pour de nombreuses applications en raison de leur robustesse et de leur performance éprouvée.

II.7.2 Algorithme Perturbation & Observation (P&O)

C'est une méthode largement utilisée en raison de sa simplicité et de sa facilité d'implémentation. Elle consiste à perturber le point de fonctionnement, par l'augmentation ou la diminution de la tension de fonctionnement, et l'observation de son effet sur la puissance [23].

Si la variation de la puissance augmente ($\Delta P > 0$), cela signifie qu'on est dans la bonne direction, on maintient alors le même sens de perturbation (ΔV).

Au contraire si ($\Delta P < 0$), donc le point de fonctionnement s'éloigne du PPM, cela signifie qu'on est dans la mauvaise direction alors on inverse le sens de perturbation (ΔV).

Selon l'équation, la variation du rapport cyclique ($D=\alpha$) est inversement proportionnelle à la variation de la tension de fonctionnement V_e (si ΔV augmente le rapport cyclique D diminue, sinon).

La Figure II.24 et le Tableau II.2 illustre son principe de fonctionnement et tous les cas possibles.

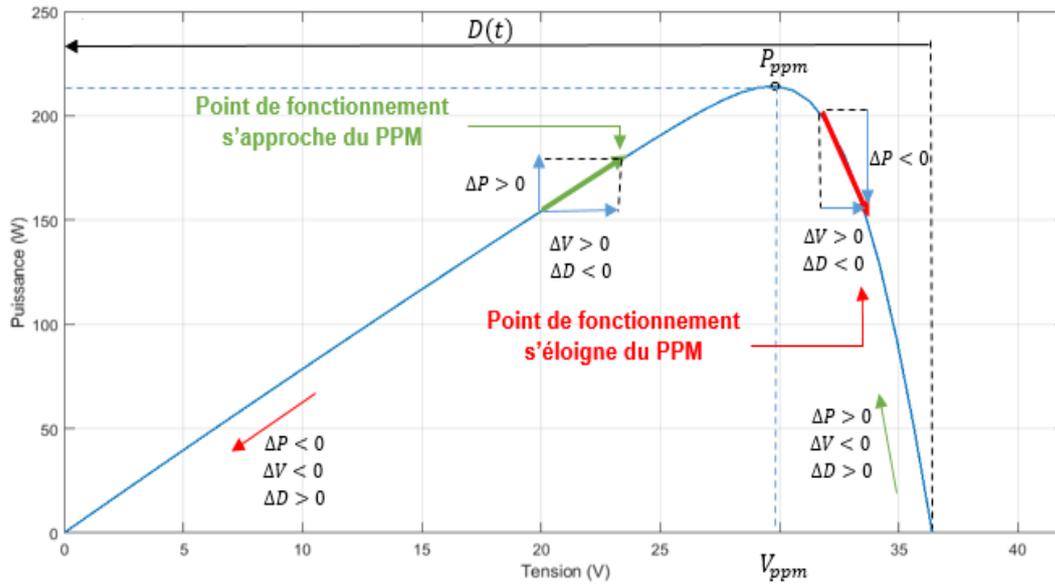


Figure II. 24 : Principe de la technique P&O

Tableau II.2 : Matrice (principe la technique P&O)

Variation de la tension ΔV	Variation du rapport cyclique D	Evolution de la variation de la puissance ΔP	Décision à prendre pour atteindre PPM
+	-	+	Diminuer D / Augmenter V $D(t) = D(t - 1) - \Delta D$ Ou $V(t) = V(t - 1) + \Delta V$
+	-	-	Augmenter D / Diminuer V $D(t) = D(t - 1) + \Delta D$ Ou $V(t) = V(t - 1) - \Delta V$
-	+	+	Augmenter D / Diminuer V $D(t) = D(t - 1) + \Delta D$ Ou $V(t) = V(t - 1) - \Delta V$

L'analyse de la courbe de la puissance en fonction de la tension d'un GPV (Figure II.25) montre qu'il existe deux zones de fonctionnement ; la première à gauche du PPM et la

deuxième à droite du PPM. Lorsqu'on perturbe le point de fonctionnement quatre cas peuvent se présenter

Premier cas $\Delta P > 0$ et $\Delta V > 0$: on est donc dans la bonne direction, pour la prochaine itération, on continue à augmenter la tension du GPV, contrairement la valeur de rapport cyclique D sera diminuée.

Deuxième cas $\Delta P > 0$ et $\Delta V < 0$: on est dans le bon sens, pour la prochaine itération, continuer la diminution de la valeur de la tension du GPV, contrairement la valeur de rapport cyclique D sera augmentée.

Troisième cas $\Delta P < 0$ et $\Delta V < 0$: on est dans la mauvaise direction, la prochaine itération doit corriger le sens de recherche c.-à-d augmenter la valeur de la tension, contrairement la valeur de rapport cyclique D sera diminuée.

Quatrième cas $\Delta P < 0$ et $\Delta V > 0$: on est dans la mauvaise direction, pour la prochaine itération on va diminuer la valeur de la tension, contrairement la valeur de rapport cyclique D sera augmentée, la Figure II.25 illustre l'organigramme de cette technique.

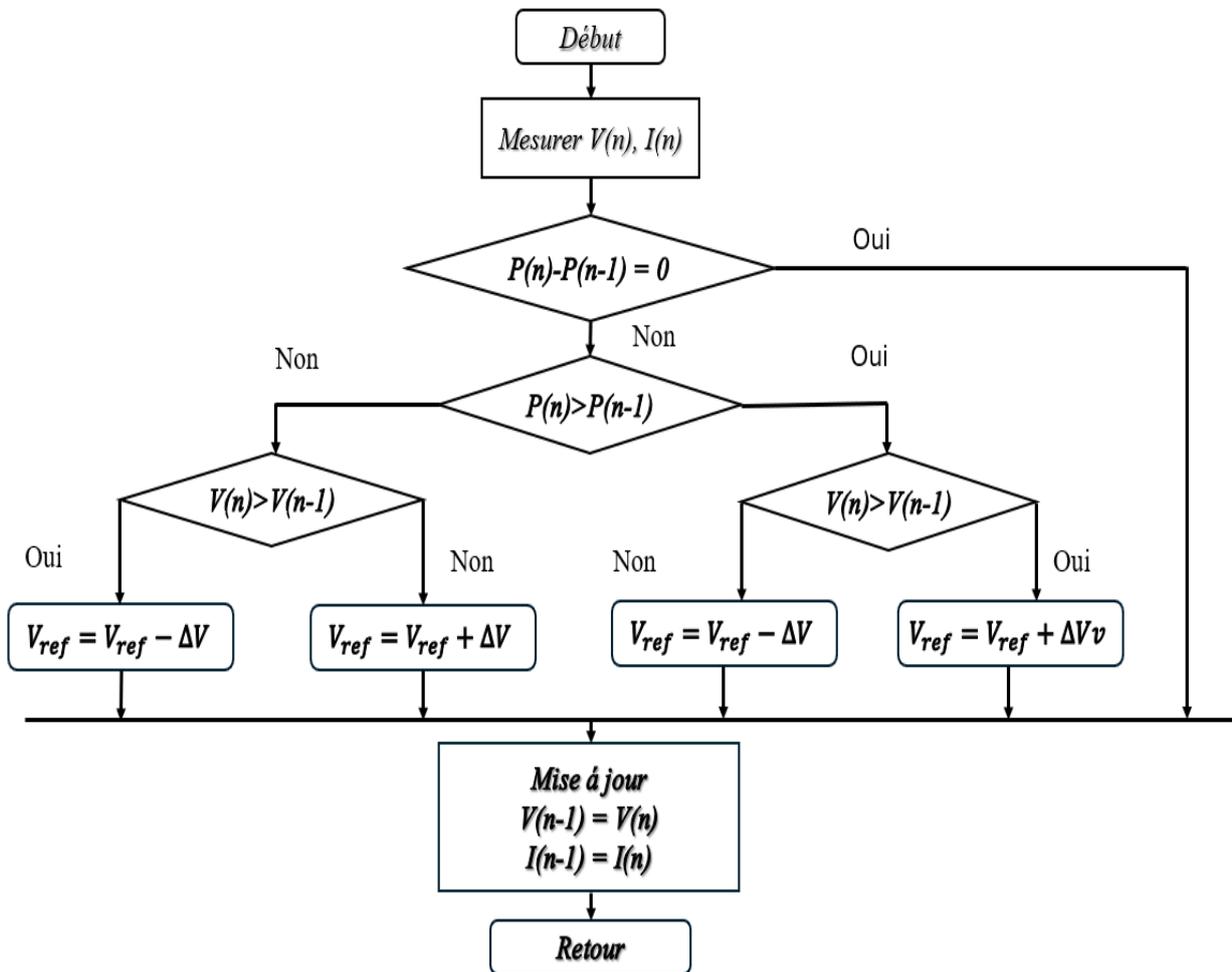


Figure II.25 : Organigramme de la technique Pertub & Observe (P&O).

Pour résumer, cette technique résout l'inconvénient du changement brusque de l'ensoleillement dans la méthode PO, mais garde les deux autres inconvénients, le **Pas** de perturbation et la convergence vers un optimum local dans le cas d'un ombrage partiel.

II.7.3 Technique à Base de la Logique Floue (FLC)

Les méthodes de poursuite du PPM, abordées jusqu'à présent, présentent un inconvénient majeur, la perturbation du rapport cyclique par un grand **Pas** réduira les oscillations, mais augment le temps de réponse du système. L'utilisation de la théorie de la logique floue dispose d'un dispositif de poursuite du PPM rapide et qui réduit ces oscillations, de plus simple à concevoir car elle n'exige pas la connaissance du modèle mathématique du système [24]

Le régulateur Flou généralement utilisé possède deux variables d'entrées, l'erreur E et le changement d'erreur CE et une variable de sortie D (variation du rapport cyclique).

Généralement, une commande par logique floue est constituée de trois blocs : Fuzzification, bloc d'inférences et finalement la Défuzzification (Figure II.26).

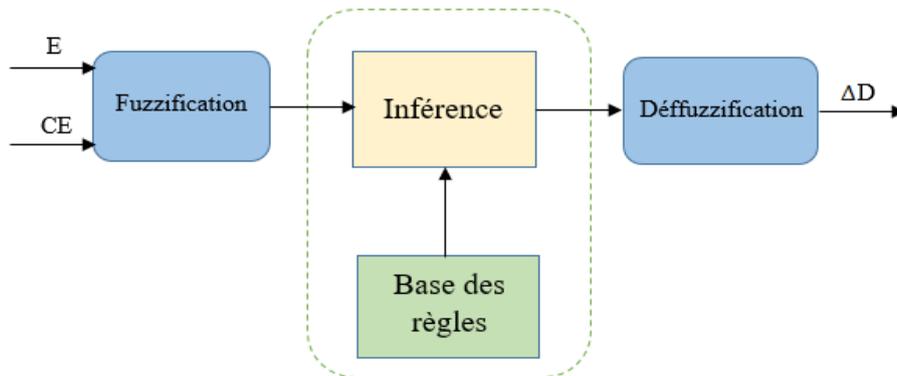


Figure II. 26 : Structure générale d'un régulateur flou

- **Fuzzification**

La fuzzification permet la conversion des variables physiques d'entrée en ensembles flous, elle se déroule généralement en trois étapes :

- Une étape préliminaire consiste à définir la plage de variations possibles des entrées (univers de discours).
- Partitionner en classes floues l'univers de discours.
- Définir les fonctions d'appartenances des classes floues précédentes.

Dans notre cas, on a deux entrées, la première sera l'erreur E qui est la variation de la puissance par rapport à la tension (la pente de la caractéristique P-V) et la seconde entrée définie la variation de l'erreur CE qui donne une information sur le sens de la pente. La sortie du régulateur flou est la variation du rapport cyclique D du convertisseur statique DC/DC.

Les entrées E et CE sont exprimées comme suit :

$$E(t) = \frac{\Delta P}{\Delta V} = \frac{P(t) - P(t-1)}{V(t) - V(t-1)} \quad (II.23)$$

$$CE(t) = E(t) - E(t-1) \quad (II.24)$$

Avec :

La puissance instantanée $P(t)$ représente la quantité de travail électrique générée à un moment donné, tandis que $P(t-1)$ indique la puissance mesurée précédemment. La variation de la puissance ΔP mesure les changements dans la production d'énergie. De même, la tension actuelle $V(t)$ et la tension précédente $V(t-1)$ sont des paramètres critiques pour évaluer la stabilité du système électrique, avec ΔV représentant leur variation. Pour contrôler la précision du système, l'erreur actuelle $E(t)$ est comparée à l'erreur précédente $E(t-1)$, et la variation de l'erreur $CE(t)$

A chaque variable, ont associé un univers de discours, entre -8 et 8 pour E , CE et de -1 à 1 pour la variable de sortie D .

En partitionne chaque univers de discours en trois sous-ensembles flous :

La variable d'entrée E : est défini par les termes linguistiques : Négative (N), Zéro (Z) et Positive (P). $E \in \{N ; Z ; P\}$

La variable d'entrée CE : est défini par les termes linguistiques : Décroître (D), Stable (S), Croître (C). $CE \in \{D ; S ; C\}$

La variable de sortie D : est définie par les termes linguistiques : Diminué ($-$), Inchangé (0), Augmenté ($+$). $D \in \{- ; 0 ; +\}$

Les fonctions d'appartenance que nous avons utilisées sont schématisées sur les figures II.27, II.28 et II.29. Afin de simplifier notre exemple, nous avons pris des fonctions d'appartenance triangulaires et trapézoïdales.

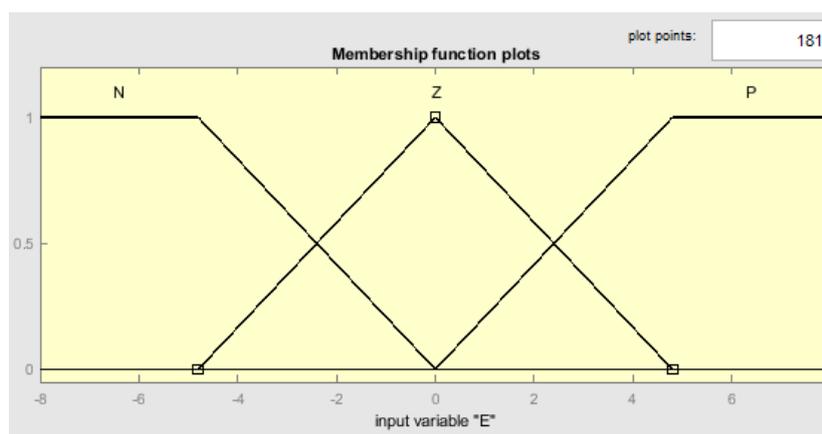


Figure II. 27 : Fonctions d'appartenances de la variable d'entrée E

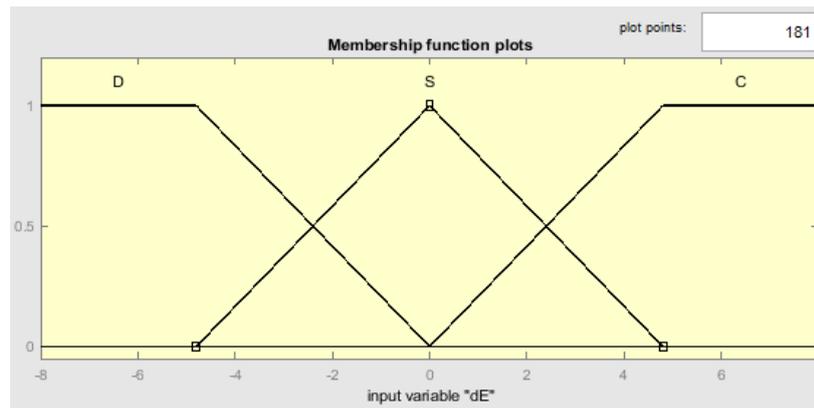


Figure II. 28 : Fonctions d'appartenances de la variable d'entrée CE

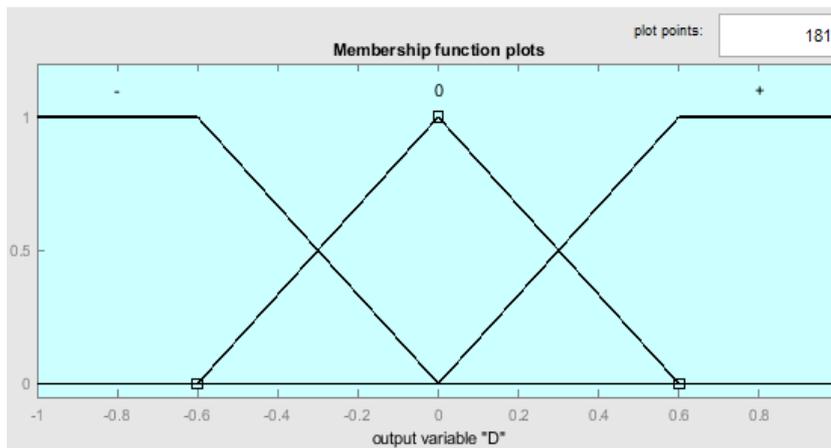


Figure II. 29 : Fonctions d'appartenances de la variable de la sortie D

- **Inférence**

Cette étape consiste à prendre des décisions et établir des relations logiques entre les entrées et la sortie tout en définissant les règles d'appartenance du type : **Si ... ET... Alors**. Rappelons que le choix de ces réglages consiste à modifier le rapport cyclique du convertisseur statique de telle sorte à atteindre le PPM et annuler l'erreur E, trois cas sont envisagés :

Premier cas : E est positive, c'est-à-dire, on se trouve à gauche du PPM. Si la variation de la pente CE décroît, donc le point de fonctionnement converge vers le PPM, alors on maintient la même direction (continue à diminuer le rapport cyclique D). Si la variation de CE est croissante, il faut revenir au PPM et se déplacer vers la droite (diminuer D). Si CE est stable le point de fonctionnement ne se déplace pas, donc il faut diminuer le rapport cyclique D.

Deuxième cas : E est négative, c'est-à-dire, on se trouve à droite du PPM. Si la variation de la pente CE est croissante, donc le point de fonctionnement converge vers le PPM, alors on maintient la même direction (continue à augmenter le rapport cyclique D). Si la variation de CE est décroissante, il faut revenir au PPM et se déplacer vers la gauche (augmenter D). Si CE est stable, pas de déplacement, donc il faut augmenter le rapport cyclique D.

Troisième cas : Si E est nulle, c'est-à-dire on est au PPM. Si la variation de la pente CE est croissante, donc on se déplace vers la gauche et le point de fonctionnement diverge de PPM, alors il faut revenir au PPM (diminuer le rapport cyclique D). Si la variation de CE est décroissante, il faut revenir au PPM et se déplacer vers la gauche (augmenter D). Si CE est stable, pas de déplacement, donc on n'a pas besoin de varier le rapport cyclique D.

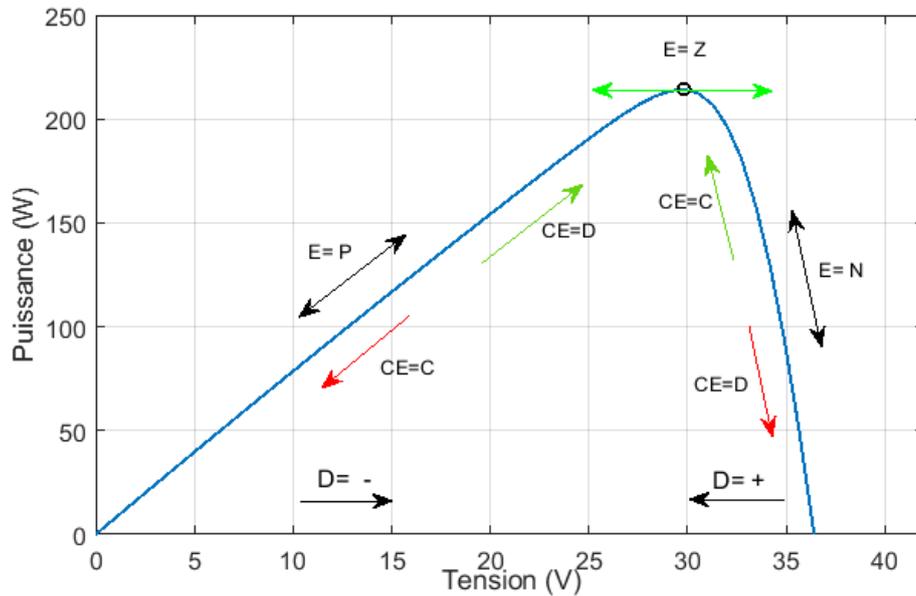


Figure II. 30 : Principe de MPPT à Base de la Logique Floue

Ces dernières peuvent s'écrire sous forme d'une matrice appelée "matrice d'inférence"

Tableau II.3 : Matrice d'inférences

ΔD		CE		
		D	S	C
E	N	+	+	0
	Z	+	0	-
	P	0	-	-

L'étape suivante consiste à déterminer les règles qui sont activées (dans la matrice d'inférences) et à donner leurs degrés d'appartenance. La méthode d'inférence adoptée est la méthode Mamdani (max-min), c'est-à-dire que l'opérateur ET, correspondant à l'intersection de deux fonctions d'appartenance, est réalisé par la formation du minimum appliquée aux deux fonctions d'appartenance. Alors que l'opérateur OU, correspondant à l'union de deux fonctions d'appartenance, est réalisé par la formation du maximum appliquée aux deux fonctions d'appartenance

- **Défuzzification**

Cette étape est l'opération inverse de la fuzzification, consiste à transformer les résultats flous obtenus dans l'étape précédente (inférence), en une valeur numérique précise (valeur interprétable par l'utilisateur, qui sera dans notre cas ΔD)

La méthode de défuzzification que nous avons utilisée est l'opérateur "centre De gravité ", il est donné par l'équation suivante :

$$\Delta D = \frac{\int \mu(D_i) D_i}{\int \mu(D_i)} = \frac{\sum_i \mu(D_i) \cdot D_i}{\sum_i \mu(D_i)} \quad (II.25)$$

Malgré de nombreuses avantages que cette technique présente, en revanche elle fait appelle à une conception spéciale, qui demande une plateforme d'exécution performante couteuse et non familiarisé avec tous sujets spécifiques telle que la recherche du PPM dans le cas d'un ombrage partiale (le point de fonctionnement dans notre cas converge vers un optimum locale), par ailleurs, plusieurs études ont montré que la combinaison des autres techniques avec FLC peuvent suivre le PPMG [25].

II.8 Techniques MPPT dans le cas d'un ombrage partiel

Sous des conditions d'ombrage partiel, il est bien établi que les méthodes traditionnelles de maximisation des systèmes photovoltaïques, telles que perturb and observe (P&O), sont incapables de distinguer le point de puissance maximale global parmi plusieurs maximums locaux. Ces techniques montrent leur inefficacité lorsque l'ensoleillement est non uniforme. Pour surmonter ce défi, cette section explore l'introduction d'une nouvelle approche d'optimisation, PSO, tout en proposant de nouvelles structures pour les méthodes traditionnelles P&O et. Ces nouvelles approches incluent une variation du rapport cyclique D et une méthode à pas variable pour mieux répondre au problème des multiples maximums.

II.8.1 Technique d'optimisation d'essaim de particules (PSO)

L'optimisation par Essaim de particule (OEP) ou bien Particle Swarm Optimization (PSO) , a été inventée par Russel Eberhart (ingénieur en électricité) et James Kennedy (socio-psychologue) en 1995 [26]. Au départ J. Kennedy et R. Eberhart cherchaient à simuler la capacité des oiseaux à voler de façon synchrone et leur aptitude à changer brusquement de direction tout en restant en une formation optimale. Le modèle qu'ils ont proposé à ensuite été étendu en un algorithme simple et efficace d'optimisation. [29]

L'essaim de particules correspond à une population d'agents simples, appelés particules. Chaque particule est considérée comme une solution du problème, où elle possède une position x_i et une vitesse v_i (déplacement). De plus, chaque particule possède une mémoire lui permettant de se souvenir de sa meilleure performance p_{best} (en position et en vitesse) et de la meilleure performance atteinte par les particules de l'essaim p_{g-best} [27].

Dans PSO le comportement social est modélisé par une équation mathématique permettant de guider les particules durant leur processus de déplacement [26]. Le déplacement d'une

particule est influencé par trois composantes : la composante d'inertie, la composante cognitive et la composante sociale. Chacune de ces composantes reflète une partie de l'équation [28] :

- **La composante d'inertie** : la particule tend à suivre sa direction courante de déplacement ;
- **La composante cognitive** : la particule tend à se diriger vers le meilleur site par lequel elle est déjà passée ;
- **La composante sociale** : la particule tend à se diriger vers le meilleur site atteint par ses voisines.

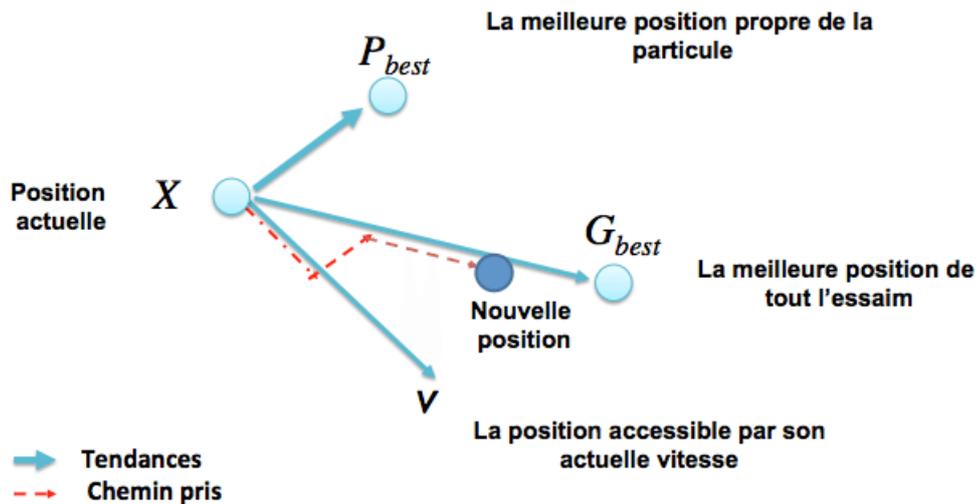


Figure II.31 : Stratégie de déplacement d'une particule

Le déplacement de la particule i entre les itérations t et $t+1$ se fait selon les équations suivantes :

$$x(t+1)_i = x(t)_i + v(t+1)_i, i \in \{1, \dots, n_p\} \quad (II.26)$$

$$v(t+1)_i = w \cdot v(t)_i + c_1 r_1 (P_{best} - x(t)_i) + c_2 r_2 (P_{g_{best}} - x(t)_i) \quad (II.27)$$

Avec :

$x(t+1)_i$: Position de la particule i à l'instant $(t+1)$

$x(t)_i$: Position de la particule i à l'instant (t)

$v(t+1)_i$: Vitesse de la particule i à l'instant $(t+1)$

$v(t)_i$: Vitesse de la particule i à l'instant (t)

W : Coefficient d'inertie

C_1, C_2 : Coefficients d'accélération

r_1, r_2 : Deux nombres aléatoires tirés uniformément dans $[0,1]$

P_{best} : La meilleure position locale de la particule i

$P_{g_{best}}$: La meilleure position globale (de toutes les particules de l'essaim)

n_p : Nombre de particule dans l'espace de recherche.

L'évaluation de la position de chaque particule est déterminée par une fonction dite «Fitness» F . Donc une comparaison de la fonction fitness de chaque position de la particule i à l'instant t est faite, avec la fonction fitness de sa meilleure position (locale) pour déterminer P_{best} , et avec les fonctions fitness de la meilleure position de toutes les particules (globale) pour déterminer P_{g_best} [29].

Donc on peut écrire :

$$\text{Si : } F(x(t+1)_i) > F(P_{best}) \quad \rightarrow \quad P_{best} = x(t+1)_i$$

Et :

$$\text{Si : } F(x(t+1)_i) > F(P_{g_best}) \quad \rightarrow \quad P_{g_best} = x(t+1)_i$$

- **Application de la technique PSO pour le MPPT**

Lors de l'application de la technique du PSO pour suivre le point de puissance maximale MPP, chaque paramètre de l'algorithme PSO aura son équivalent dans les paramètres de la technique MPPT, et cela peut être exprimé comme suit :

$$\begin{aligned} D_i &\leftarrow x_i \\ \Delta D_i &\leftarrow v_i \\ D_{best} &\leftarrow P_{best} \\ D_{g_best} &\leftarrow P_{g_best} \\ P(D) &\leftarrow F(x) \end{aligned}$$

Pour mieux comprendre, on réécrit les équations (II.29) et (II.30) en utilisant les paramètres de MPPT :

$$D(t+1)_i = D(t)_i + \Delta D(t+1)_i \quad , \quad i \in \{1, \dots, n_p\} \quad (II.28)$$

$$\Delta D(t+1)_i = w \cdot \Delta D(t)_i + c_1 r_1 (D_{best} - D(t)_i) + c_2 r_2 (D_{g_best} - D(t)_i) \quad (II.29)$$

Tel que :

$D(t+1)_i$: Le rapport cyclique de la particule i à l'instant $(t+1)$

$D(t)_i$: Le rapport cyclique de la particule i à l'instant (t)

$\Delta D(t+1)_i$: La variation du rapport cyclique de la particule i à l'instant $(t+1)$

$\Delta D(t)_i$: La variation du rapport cyclique de la particule i à l'instant (t)

D_{best} : Le meilleur rapport cyclique de la particule i

D_{g_best} : Le meilleur rapport cyclique global (de toutes les particules de l'essaim).

A chaque itération on détermine la puissance correspondante à la position de chaque particule de l'essaim, la position est meilleure si la puissance correspondante est supérieure, on peut donc écrire :

$$\text{Si :} \quad P(D(t+1)_i) > P(D_{best}) \rightarrow D_{best} = D(t+1)_i$$

$$\text{Si :} \quad P(D(t+1)_i) > P(D_{g_{best}}) \rightarrow D_{g_{best}} = D(t+1)_i$$

Les étapes principales de l'algorithme de cette technique sont décrites comme suit :

Etape 1 : Initialisation de l'algorithme

Initialisation des coefficients c_1 , c_2 et le coefficient d'inertie W . Les particules peuvent être placées sur des positions fixes ou être placées dans l'espace de manière aléatoire. Fondamentalement, s'il y a des informations disponibles concernant la localisation du point de puissance maximale global PPMG dans l'espace de recherche, il est plus logique d'initialiser les particules autour de ce point. Les particules sont initialisées sur des positions fixes qui couvrent l'espace de recherche $[D_{min}, D_{max}]$. D_{min} et D_{max} représentent le rapport cyclique maximal et le rapport cyclique minimal du signal PWM à appliquer sur le convertisseur DC/DC utilisé, respectivement.

Etape 2 : Evaluation des particules

Chaque rapport cyclique est appliqué au convertisseur, la tension et le courant correspondants seront récupérés et la puissance de chaque particule est calculée. Cette puissance est plus grande pour un rapport cyclique optimal.

Etape 3 : Mettre à jour les meilleures données individuelles (local) et globales

Si le rapport cyclique d'une particule donne la meilleure puissance de son parcours alors ce rapport sera enregistré en tant que l'optimum local D_{best} , et s'il donne la plus grande puissance que celles obtenues par les autres particules alors il devient l'optimum global $D_{g_{best}}$

Etape 4 : Mettre à jour du rapport cyclique D et de la variation du rapport cyclique ΔD

Si le critère d'arrêt est satisfait alors le meilleur rapport cyclique $D_{g_{best}}$ est utilisé, sinon une optimisation de D , ΔD et toutes les particules,

Ces étapes sont résumées dans l'organigramme suivant, Figure II.32 :

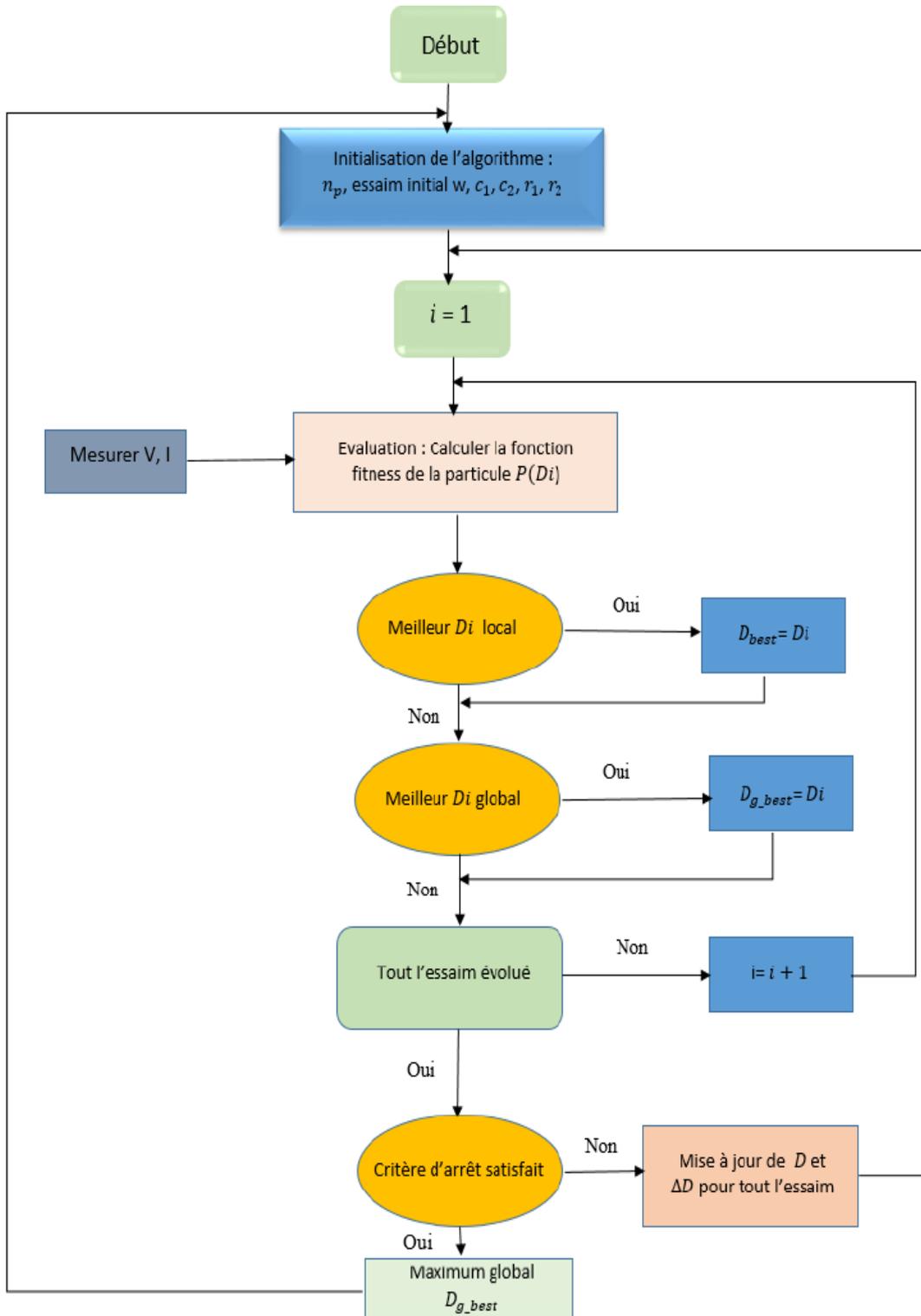


Figure II.32 : Organigramme de la technique d'optimisation d'essaim de particules (PSO)

II.9 Conclusion

La modélisation précise du système photovoltaïque et de ses composants, notamment des panneaux solaires et des convertisseurs DC/DC, est essentielle pour une conception optimale et une gestion efficace de l'énergie solaire. Elle permet une analyse approfondie du comportement du système dans différentes conditions et facilite l'optimisation des performances.

Il existe une variété de convertisseurs DC/DC utilisés dans les systèmes photovoltaïques, tels que les convertisseurs Buck, boost, Buck-boost, Chacun de ces types offre des avantages et des inconvénients selon les applications spécifiques et les exigences de conception.

Le contrôle de ces convertisseurs est crucial pour maximiser le rendement énergétique du système photovoltaïque. Des techniques de contrôle avancées, telles que la commande de tension, de courant ou de puissance, sont utilisées pour réguler la conversion d'énergie en fonction des variations des conditions environnementales et de charge.

Le Maximum Power Point Tracking (MPPT) est une technique de contrôle utilisée pour optimiser le rendement des panneaux solaires en ajustant en permanence leur point de fonctionnement pour maximiser la puissance de sortie. Les types de MPPT les plus courants incluent le Perturb and Observe (P&O), Technique à Base de la Logique Floue (FLC) , Technique d'optimisation d'essaim de particules (PSO). Chacun de ces algorithmes présente des caractéristiques spécifiques en termes de précision, de rapidité de suivi et de robustesse face aux variations des conditions environnementales.

En conclusion, la modélisation du système photovoltaïque, des convertisseurs DC/DC et de leurs types, ainsi que le contrôle des convertisseurs DC/DC et ses types de MPPT, sont des éléments essentiels pour la conception et l'optimisation des installations solaires. Leur compréhension approfondie et leur application judicieuse sont cruciales pour maximiser le rendement énergétique, améliorer la fiabilité et favoriser l'adoption généralisée de l'énergie solaire.

Chapitre III :
**Les défis face aux systèmes
photovoltaïques**

III.1 Introduction

L'intégration croissante des systèmes PV dans le mix énergétique mondial présente divers défis techniques, parmi lesquels : les conditions climatiques, les défauts de mismatch et les défauts de connexion., les conditions climatiques sont parmi les défis les plus significatifs auxquels les systèmes PV font face, les variations de température, l'exposition aux intempéries telles que la pluie, la neige et le vent, ainsi que l'exposition aux rayonnements solaires intenses peuvent affecter la performance et la durabilité des panneaux solaires. Par exemple, les températures élevées peuvent réduire l'efficacité de conversion des cellules PV, tandis que l'accumulation de saletés et de neige sur les panneaux peut réduire leur efficacité et nécessiter un entretien régulier, les défauts de mismatch, où des cellules PV connectées en série ne produisent pas uniformément du courant, représentent un autre défi majeur. Ces déséquilibres peuvent entraîner une dissipation de puissance dans les cellules sous-performances, provoquant des points chauds dans les modules PV. Cela non seulement réduit l'efficacité globale du système, mais peut aussi causer des dommages permanents aux cellules et aux modules, aussi on a les défauts de connexion, comme les connexions lâches ou endommagées, sont également critiques. Ils peuvent augmenter la résistance dans le circuit électrique du système PV, entraînant des pertes d'énergie et augmentant le risque de surchauffe et d'incendie. Une maintenance régulière et des techniques d'installation de haute qualité sont essentielles pour minimiser ces risques.

En résumé, la gestion efficace de ces défis requiert une conception robuste, une surveillance continue et une maintenance préventive des systèmes PV, avec une attention appropriée aux conditions climatiques locales, à la gestion des défauts de mismatch et à la fiabilité des connexions, les systèmes PV peuvent fournir une source d'énergie renouvelable fiable et durable dans le paysage énergétique moderne

III.2 Variation des conditions climatiques

Les performances des systèmes PV sont tributaires des conditions climatiques, un facteur crucial à prendre en compte dès leur conception. En effet, les variations météorologiques influencent directement la quantité et la qualité de l'énergie solaire captée et convertie en électricité, le premier facteur c'est l'ensoleillement qui joue un rôle crucial, sa variation selon les saisons, les heures de la journée et les conditions météorologiques locales impacte directement la production d'énergie des panneaux solaires.

III.2.1 L'éclairement Solaire

Logiquement, les journées ensoleillées avec un ciel clair favorisent une capture optimale de l'énergie solaire, tandis que les journées nuageuses réduisent considérablement la production. Cet effet peut être expliqué en examinant l'équation du photo-courant I_{ph} indiquée dans l'expression (II.8) : on peut noter que ce courant est directement proportionnel à l'éclairement. Par conséquent, la quantité d'électricité produite par les systèmes PV est directement influencée par l'ensoleillement. La figure (III-1) montre l'effet de cette condition sur la puissance de sortie d'un système PV.

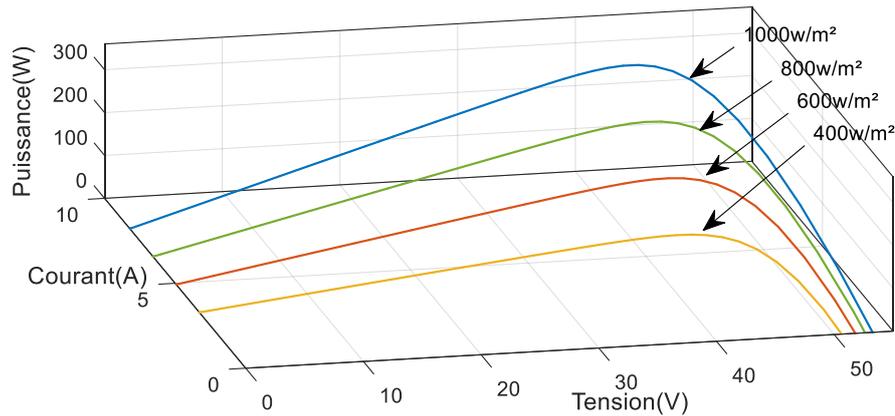


Figure III.1 : Effet de l'éclairement sur les caractéristiques du système PV.

III.2.2 Température

La température joue un rôle déterminant dans l'efficacité d'un module photovoltaïque (PV), comme le montre clairement la Figure 2. Lorsqu'elle augmente sous une illumination constante de 1000 W/m², la tension en circuit ouvert (V_{oc}) diminue de manière significative, tandis que le courant de court-circuit (I_{sc}) - représentant le photo-courant généré dans le module PV - augmente légèrement. Cette interaction conduit à une diminution notable de la puissance maximale produite par le générateur. Il est donc évident que les panneaux PV fonctionnent de manière optimale dans des environnements plus froids et plus clairs, par opposition aux conditions plus chaudes, soulignant ainsi l'impact considérable de la température sur l'efficacité globale des modules PV.

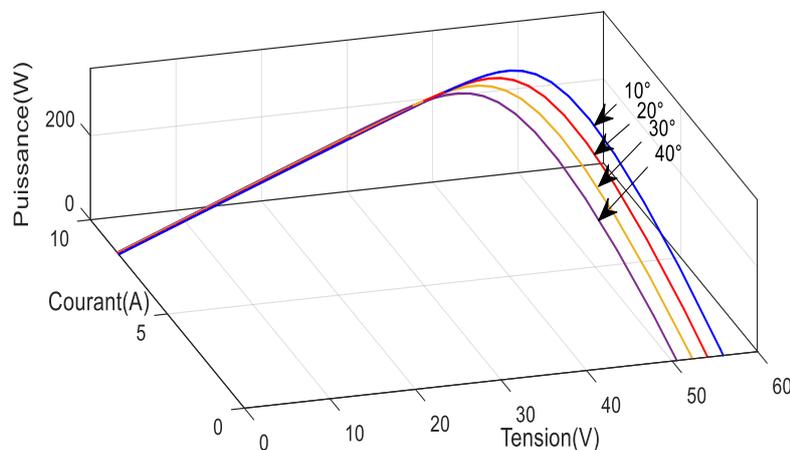


Figure III.2 : Effet de la température sur les caractéristiques du système PV.

III.2.3 L'ombrage partiel

Ce phénomène se produit quand un objet solide ou des nuages projetant leurs ombres sur l'un des panneaux, pour un éclairement solaire et une température ambiante donnés, le courant traversant une cellule est supérieur à son courant de court-circuit, alors la cellule fonctionnera en mode inversé (reverse-bias conditions) avec une tension négative, dans ce cas, la puissance excessive sera dissipée dans la cellule ombragée et la cellule ou l'encapsulation de la cellule en

plastic peuvent être irrémédiablement endommagées et peuvent conduire à un court-circuit dans la cellule, sans diodes bypass, cette réduction de production pourrait se propager à d'autres panneaux connectés en série, affectant tout le système PV. Les diodes bypass sont placées sur chaque panneau solaire ou sur chaque série de cellules pour permettre un contournement du courant lorsque le panneau est partiellement ombragé [30].

L'importance des diodes bypass réside dans leur capacité à minimiser les pertes de puissance dans le système PV. Lorsqu'un panneau ou une série de cellules est ombragé, la diode bypass permet au courant électrique de contourner cette zone ombragée, empêchant ainsi la réduction globale de la production d'énergie. Cela est particulièrement crucial dans les installations où les panneaux montés en série, car une baisse de tension ou de courant dans un seul panneau peut affecter toute la chaîne [30].

Avec un panneau touché sur deux en série par l'ombrage, on observe La courbe tension-puissance (V-P) dans ces conditions sans diodes bypass présente souvent des points de fonctionnement instables et la puissance est considérablement réduite [30].

Avec des diodes on assure des points de fonctionnement plus cohérents et en limitant les pertes de puissance dues à l'ombrage partiel. Bien que la puissance totale du système soit encore affectée par l'ombrage, l'impact sur la performance globale est réduit comme on observe sur la figure (III-3) :

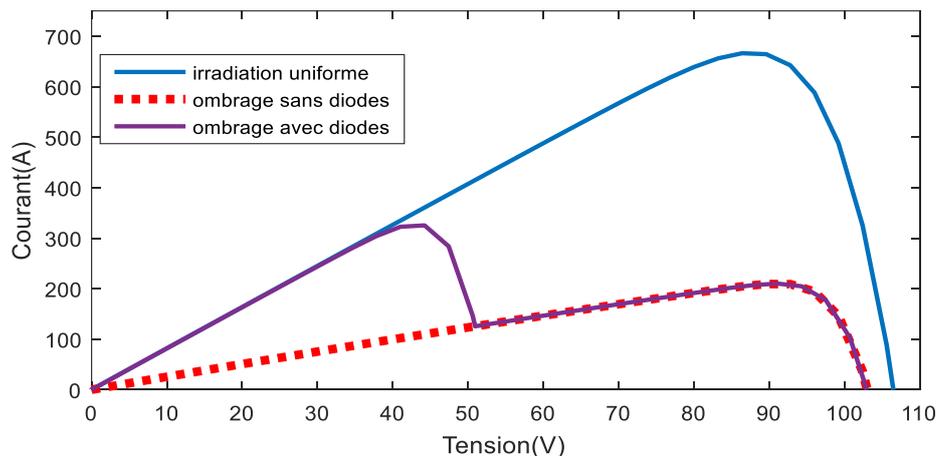


Figure III.3 : Importance des diodes bypass.

III.3 Les défauts de mismatch

Dans un système photovoltaïque, chaque cellule possède ses propres caractéristiques distinctes. Ces variations de caractéristiques sont souvent désignées sous le terme de Mismatch., ces défauts peuvent être causés aussi par des erreurs d'installation, associer un panneau avec des caractéristiques différentes aux autres panneaux comme les résistances séries et parallèles ou la présence d'une cellule défectueuse réduisant le courant, ce qui va entraîner l'affectation des performances du système

Donc ce déséquilibre se produit lorsque des cellules PV connectées en série produisent un courant inférieur aux autres cellules, entraînant une dissipation de puissance dans les cellules

défectueuses. Cet effet crée un point chaud dans le module PV et peut causer des dommages irréversibles.

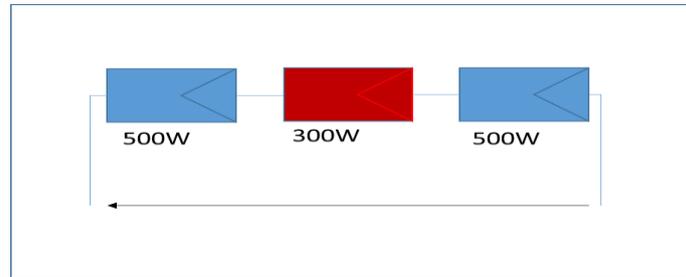


Figure III.4 : Exemple d'un défaut de mismatch

Une cellule en déséquilibre se caractérise par une résistance série accrue et une résistance de dérivation diminuée, le module en déséquilibre affecte la puissance de sortie du réseau PV et entraîne une dégradation générale des performances. L'effet de ce type de défaut sur un générateur PV est présenté dans la figure (III-5) qui illustre visuellement l'influence des résistances série et shunt sur le courant de sortie de la cellule PV. Après un examen approfondi de ces tracés, une tendance perceptible devient apparente : la pente de la section plate dans la courbe I-V de la cellule PV montre une corrélation inverse avec la résistance shunt (R_{sh}), tandis que la pente de la section raide dans la courbe I-V montre une relation directement proportionnelle à la résistance série (R_s). [31]

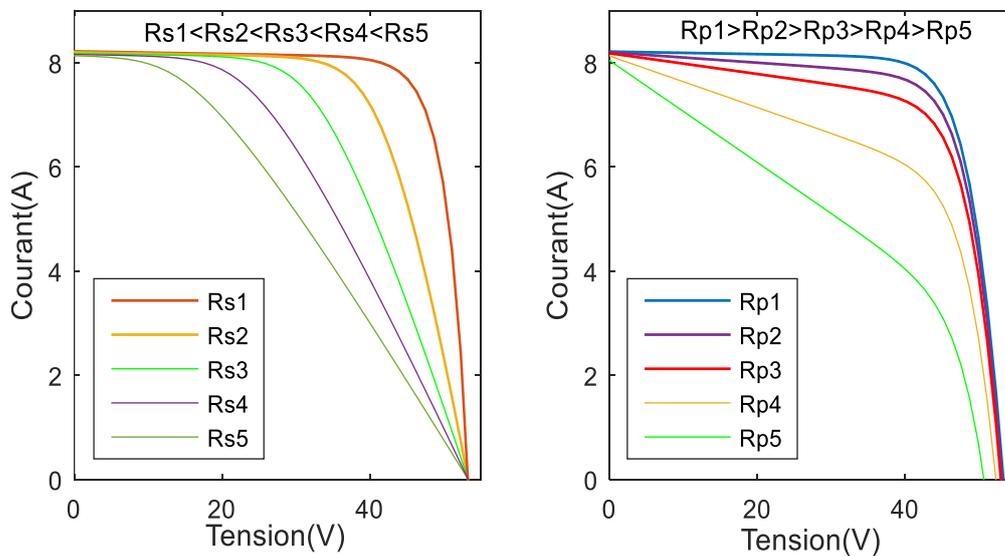


Figure III.5 : Effet des résistances internes sur le courant de sortie d'un système PV.

III.4 Défauts électriques

Les défauts de connexion représentent une préoccupation majeure dans les systèmes PV, affectant leur performance, leur sécurité et leur durabilité. Ces défauts peuvent survenir à différents niveaux de l'installation PV, depuis les connexions entre les cellules individuelles jusqu'aux câbles reliant les panneaux solaires au réseau électrique, ces défauts peuvent être causés par plusieurs facteurs, tout d'abord, des erreurs lors de l'installation, telles que des

connexions mal serrées, mal alignées ou insuffisamment protégées contre les intempéries, peuvent créer des points de résistance élevée, ces points chauds peuvent non seulement réduire l'efficacité de conversion de l'énergie solaire en électricité, mais aussi augmenter le risque de surchauffe et d'incendie.

En outre, l'usure due à l'exposition aux conditions climatiques extrêmes, comme les variations de température, l'humidité, le gel et le dégel, peut détériorer les matériaux des connexions électriques au fil du temps. Par exemple, la corrosion des contacts métalliques peut augmenter la résistance électrique, entraînant des pertes d'énergie et des fluctuations dans la production d'électricité., donc ces défauts, qu'ils soient liés aux composants individuels ou au système dans son ensemble, peuvent entraîner des pertes de rendement, une dégradation prématurée et des risques de sécurité., parmi les défauts les plus fréquents on a un ligne-terre (LT) court-circuit et line to line contact (LL). [32]

Ces défauts nous devons les localiser et remplacer des composants endommagés tels que des câbles, des connecteurs ou même des panneaux.

III.4.1 Modules court-circuités

Une défaillance ligne-terre est un court-circuit entre une ligne active et la terre, nous introduisons cette défaillance sur le réseau PV comme illustré sur la figure (III-6), les court-circuits distinguent comme l'une des principales sources de perte de performance et de fiabilité dans les installations solaires, ces défauts, qu'ils soient dus à des erreurs d'installation, ou des défaillances matérielles, peuvent compromettre l'efficacité et la durabilité des systèmes solaires.

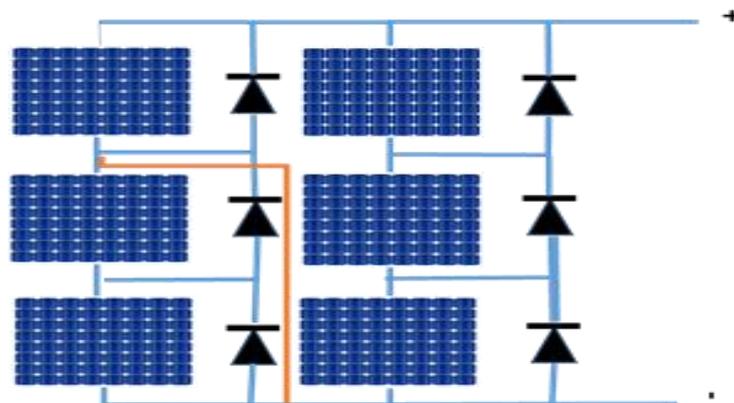


Figure III.6 : champ photovoltaïque avec des modules court-circuités avec diodes de protection

La tension donnée par les rangées du réseau PV chute et provoque une défaillance de déséquilibre (rangées avec des tensions de sortie différentes) qui affecte la courbe puissance-tension de l'ensemble du réseau PV. Le courant de retour vers le string défaillant est empêché en plaçant des diodes de blocage à la sortie de chaque string. Les courbes caractéristiques Puissance-Tension (P-V) et Courant-Tension (I-V) du réseau PV sous défaillance ligne-terre sont données sur la figure (III-7), la défaillance ligne-terre introduit plusieurs points de puissance maximale sur la courbe P-V à différents points de fonctionnement. Nous notons que la forme de la courbe P-V change avec la configuration et le choix effectué dans notre cas est justifié par la présence du MPP inférieur au même point de fonctionnement (tension) que le MPP du réseau sain.

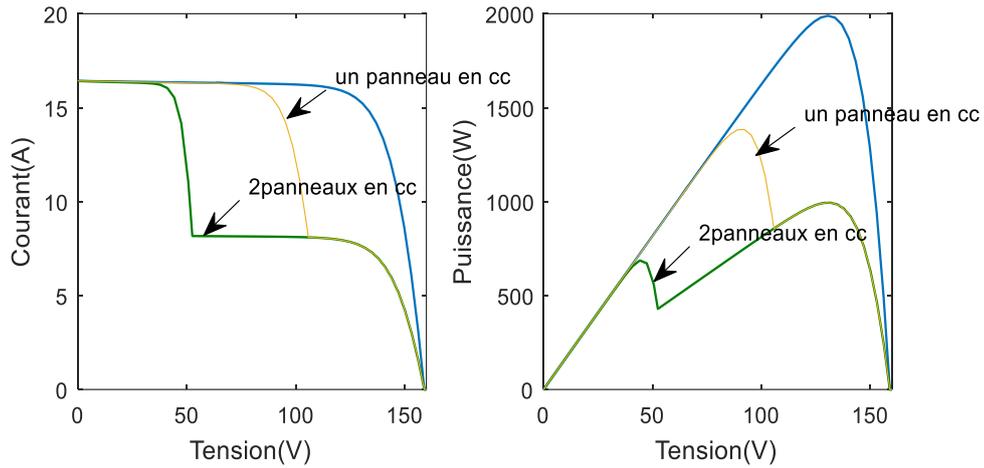


Figure III.7 : Caractéristique d'un système avec un défaut de court-circuit avec diodes

Dans une telle situation, les algorithmes basés sur la montée en pente sont piégés dans un extremum local et échouent à suivre le MPP global

III.4.2 Défaut de connection line to line

Une défaillance ligne-ligne est un court-circuit entre deux lignes dans le réseau PV avec des potentiels différents. Les défaillances ligne-ligne peuvent être causées par une défaillance d'isolation des conducteurs porteurs de courant, des courts-circuits dans la boîte de jonction PV dus à des dommages mécaniques, à l'infiltration d'eau et à la corrosion, ou à des défauts de double mise à la terre simultanée dans le réseau PV. Nous introduisons une défaillance ligne-ligne sur le même réseau PV précédent ; un court-circuit entre les câbles de deux string, comme illustré sur la figure III-8 système sans diodes :

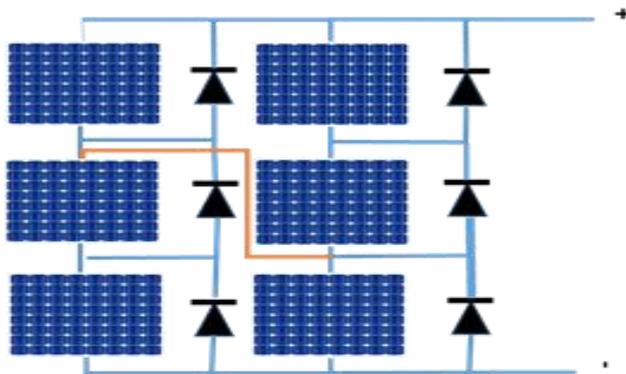


Figure III.8: line to line connexion

La courbe P-V du réseau PV défaillant sur la figure (III-9) est caractérisée par la présence de plusieurs points de puissance. De plus, la tension en circuit ouvert du réseau PV a changé en raison de la défaillance ligne-ligne. Cet effet peut être expliqué par la modification de la configuration du circuit du réseau PV causée par la défaillance ligne-ligne.

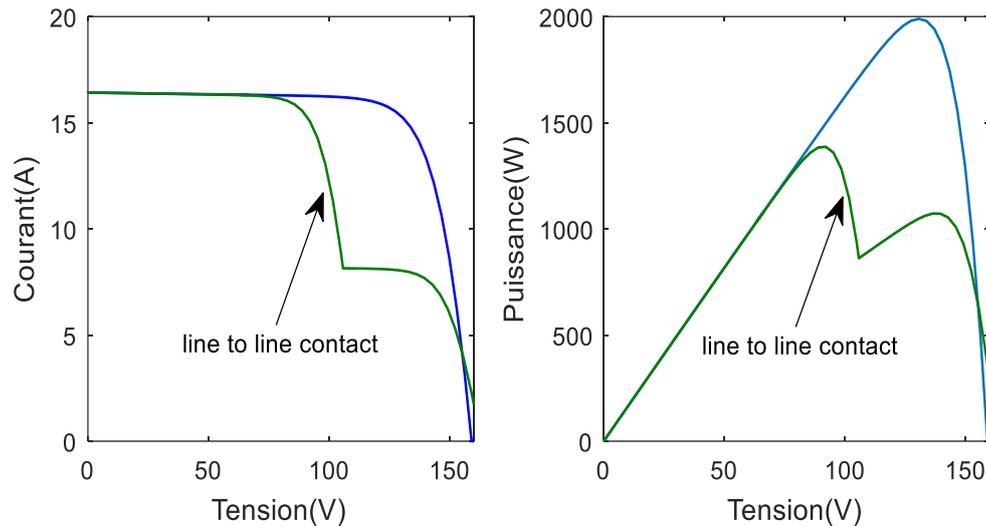


Figure III.9 : Caractéristique d'un système avec un défaut line to line avec diodes

III.5 L'optimisation de puissance durant les différents défis :

L'optimisation de la puissance dans les systèmes PV est essentielle pour maximiser la production d'énergie solaire, surtout dans des conditions variables telles que des défauts électriques ou des ombrages partiels. Dans ce domaine, plusieurs stratégies d'optimisation sont explorées. La littérature scientifique offre de nombreuses études se penchant sur le suivi du point de puissance maximale, un aspect crucial pour améliorer l'efficacité des systèmes PV, notamment face à des contraintes climatiques ou d'autres défauts potentiels, notre recherche s'inscrit dans ce cadre, approfondissant ces concepts dans le chapitre 4 de notre étude.

Un autre aspect essentiel concerne la disposition des modules PV dans les champs de production. Différentes configurations sont couramment adoptées, parmi lesquelles la Série-Parallèle (SP), le Total-Cross-Tide (TCT), l'Étoile (Star), le Triangulaire (Triangular), et d'autres encore. Chaque configuration offre des avantages spécifiques en termes de performance, de gestion des ombrages et d'optimisation du rendement global du système [33].

Dans notre étude, nous nous sommes particulièrement concentrés sur deux configurations prédominantes : la Série-Parallèle (SP) et le Total-Cross-Tide (TCT). Ces configurations sont largement utilisées dans la pratique en raison de leur efficacité éprouvée et de leur adaptabilité aux divers environnements et exigences opérationnelles des installations PV.

➤ Configuration des panneaux :

Les configurations des panneaux photovoltaïques (PV) jouent un rôle crucial dans la conception et l'efficacité des systèmes solaires, influençant directement leur performance, leur fiabilité et leur adaptabilité aux conditions environnementales variables. Ces configurations déterminent la manière dont les panneaux solaires sont interconnectés électriquement pour produire de l'électricité à partir de la lumière du soleil. [34]

• Configuration SP :

Dans une configuration Série-Parallèle (S-P) des panneaux solaires photovoltaïques (PV) (figure III-10(1)) les modules PV sont initialement connectés en série pour former des chaînes,

visant à obtenir une tension de sortie spécifique. Ensuite, ces chaînes de modules sont connectées en parallèle pour obtenir le courant de sortie désiré. La configuration SP présente plusieurs avantages, notamment sa simplicité de construction. Elle offre une méthode directe et rentable pour configurer les réseaux PV, réduisant les connexions redondantes et simplifiant la conception globale. Cette simplicité permet non seulement de réduire les coûts d'installation, mais aussi d'améliorer la fiabilité du système, car moins de composants signifient moins de points potentiels de défaillance. [34]

- **Configuration TCT**

Le schéma de connexion Total Cross-Tie (TCT) (figure III-10(1)) implique l'intégration de liens croisés dans le système PV connecté en série-parallèle. Reconnue comme l'une des approches les plus répandues et efficaces dans l'industrie photovoltaïque, cette configuration vise à contrer les effets néfastes de l'ombrage partiel sur le réseau PV tout en minimisant les pertes par rapport aux autres schémas de connexion standards. En intégrant des liens croisés, la configuration TCT améliore les performances globales, particulièrement dans les scénarios où des sections du réseau PV sont ombragées. Ce design optimise l'utilisation de l'énergie solaire disponible, permettant ainsi de maximiser la production d'énergie. En conséquence, le schéma de connexion TCT reste une option privilégiée parmi les praticiens du PV cherchant à renforcer la fiabilité et l'efficacité de leurs systèmes d'énergie solaire. [34]

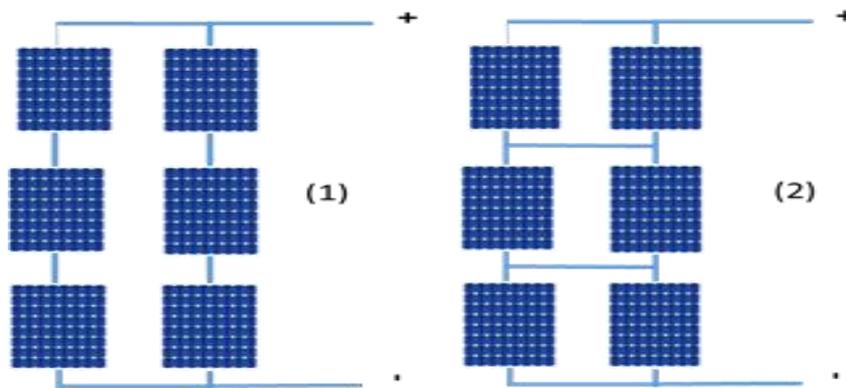


Figure III.10 : Connexion SP (1), connexion TCT (2)

Nous comparons deux méthodes de configuration, la Série-Parallèle (SP) et la TCT, pour un champ de 6 panneaux solaires avec un panneau ombragés 50%, il est observé sur la figure (III-11) que les pertes de puissance sont significativement plus élevées avec le montage SP qu'avec le TCT.

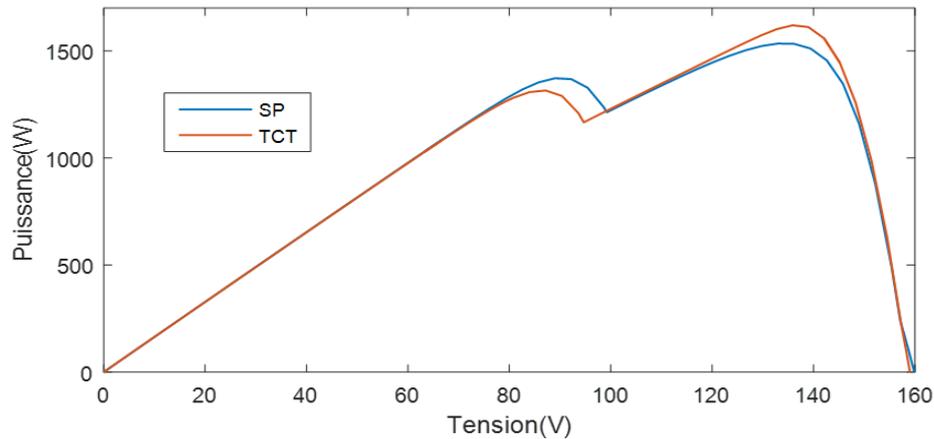


Figure III.11 : Caractéristique V, P d'un champ avec la configuration SP et TCT

La comparaison entre deux méthodes de configuration, la Série-Parallèle (SP) et la TCT, pour un champ de 6 panneaux solaires avec deux panneaux ombragés à 25% et 50%, il est observé sur la figure (III-12) que la valeur de la puissance maximale est plus grande dans la simulation de montage TCT qu'avec le SP.

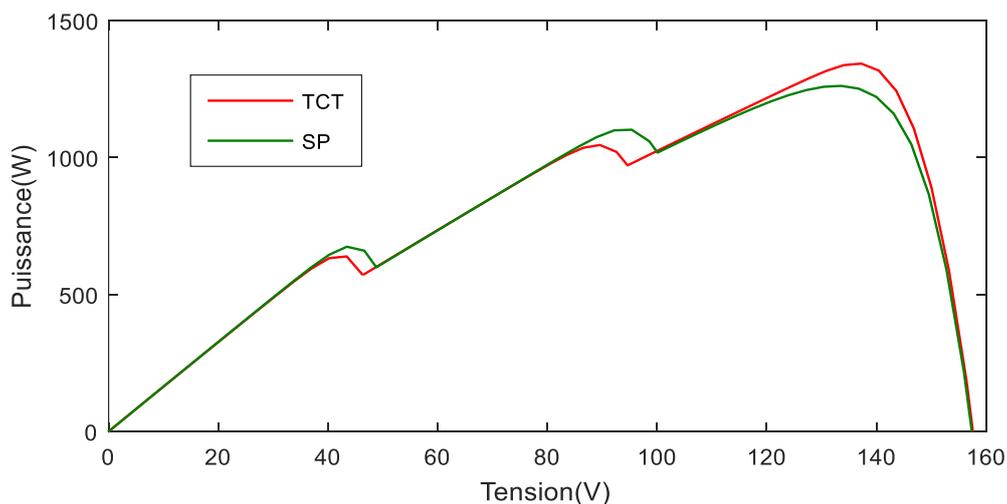


Figure III.12 : Caractéristique V, P d'un champ avec la configuration SP et TCT

Comparant deux méthodes de configuration, la Série-Parallèle (SP) et la TCT, pour un champ de 8 panneaux solaires avec trois panneaux partiellement ombragés à 25% et 50% et 75%, il est observé sur la figure (III-13) que les pertes de puissance sont significativement plus élevées avec le montage SP qu'avec le TCT.

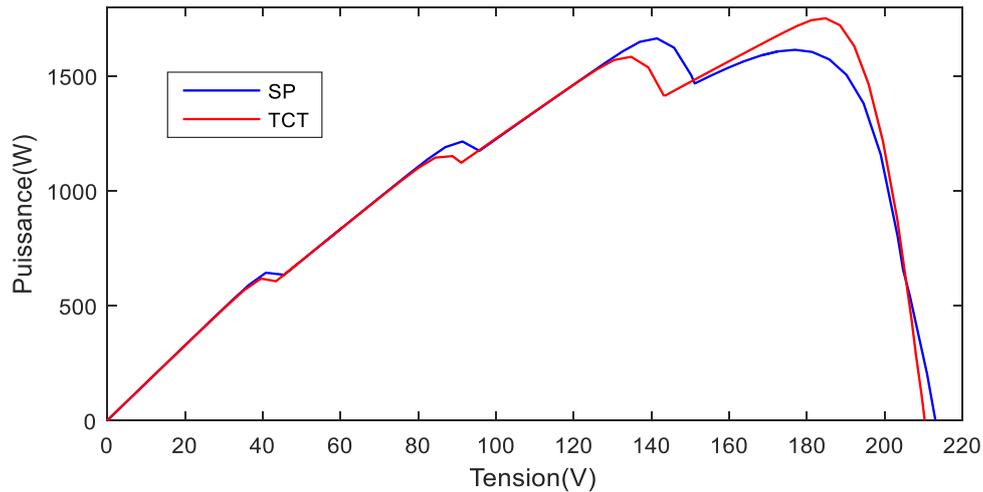


Figure III.13: Caractéristique V, P d'un champ avec la configuration SP et TCT

III.6 Conclusion

Ce chapitre se concentre sur l'étude et l'analyse des défauts fréquents dans les systèmes photovoltaïques à l'aide de modèles sous MATLAB/Simulink. Nous avons examiné les effets de la température du rayonnement solaire et de l'ombrage partiel, en lien avec les conditions climatiques. Nous avons défini le phénomène de mismatch et discuté des effets des variations des résistances en série et en parallèle sur le système. En ce qui concerne les défauts électriques, nous avons présenté les résultats d'un court-circuit en ligne (LT) et d'un court-circuit entre lignes (LL) dans un champ photovoltaïque, tant en l'absence qu'en la présence de diodes de protection bypass et anti-retours. Ensuite, nous avons comparé les performances des configurations en montage série-parallèle et TCT, l'analyse a démontré les avantages de la configuration TCT en cas d'ombrage partiel.

Chapitre IV :

Résultats et discussions

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons interpréter les résultats obtenus à partir des simulations et des analyses réalisées. Cela inclut l'évaluation de la performance des techniques MPPT on posant les bases pour une discussion approfondie des résultats comparatifs entre PO et la logique floue, nous nous concentrerons sur la stabilité et la précision de ces deux techniques d'optimisation appliquées à un cas d'étude concret, nous évaluerons les performances en termes de rendement énergétique et de précision des prévisions et nous discuterons des implications de ces résultats pour le développement futur des technologies PV optimisées et leur intégration dans les réseaux énergétiques modernes, nous faisons une comparaison directe entre PO et logique floue avec Identification les avantages et les limitations spécifiques de chaque méthode et déterminer dans quel contexte une approche pourrait être préférable à l'autre nous allons observer aussi les performances de la technique PSO en cas d'ombrage partiel dans le contexte des systèmes photovoltaïques.

IV.2 Comparaison entre la technique PO et la logique flou

La simulation de notre système avec un rayonnement similaire à celui d'une journée bien ensoleillé avec les deux techniques et nous obtiendrons cette caractéristique de puissance donnée sur la figure VI.1 :

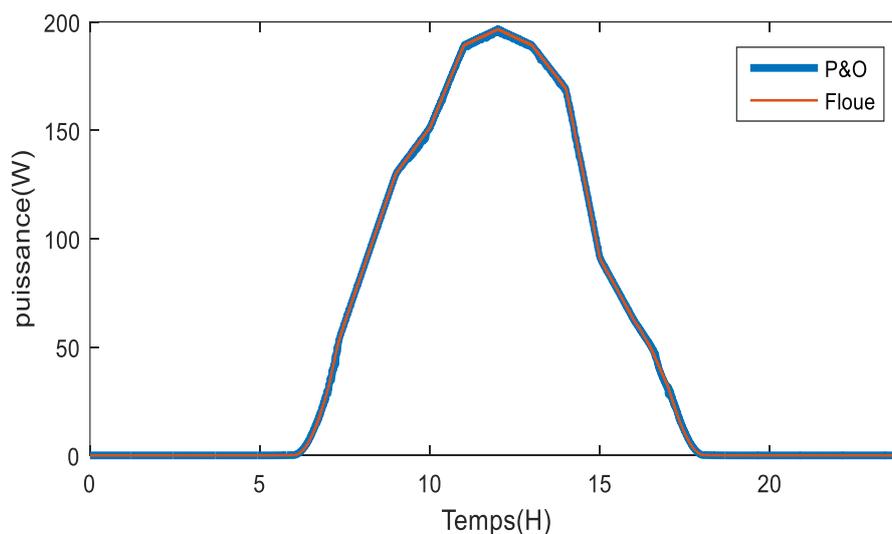


Figure IV.1 : Caractéristique de puissance avec optimisation

Cette figure IV.1 compare les caractéristiques de puissance obtenues par deux méthodes d'optimisation pour un système photovoltaïque : Perturb and Observe (P&O) et logique floue. L'analyse révèle une remarquable similarité entre les courbes, indiquant des performances quasi identiques dans les conditions testées. Le profil de puissance suit le cycle solaire journalier typique, augmentant rapidement dès 5h, atteignant un pic d'environ 200W vers midi, puis diminuant jusqu'à 20h. Les deux algorithmes démontrent une excellente réponse dynamique, suivant efficacement les variations de puissance sans oscillations ni instabilités significatives. Leur efficacité pour extraire la puissance maximale disponible est comparable, comme en témoigne la superposition presque parfaite des courbes. De plus, les deux méthodes font preuve d'une robustesse similaire face aux variations d'ensoleillement. Étant donné cette équivalence de

performance, le choix entre P&O et logique floue dépendrait probablement d'autres facteurs tels que la complexité de mise en œuvre, la facilité de réglage ou les ressources de calcul nécessaires.

En conclusion, cette figure démontre que tant P&O que la logique floue optimisent efficacement la puissance d'un système photovoltaïque sur une journée entière, suggérant que la sélection de l'une ou l'autre méthode devrait se baser sur des critères pratiques plutôt que sur leurs performances, qui sont remarquablement similaires dans ce cas.

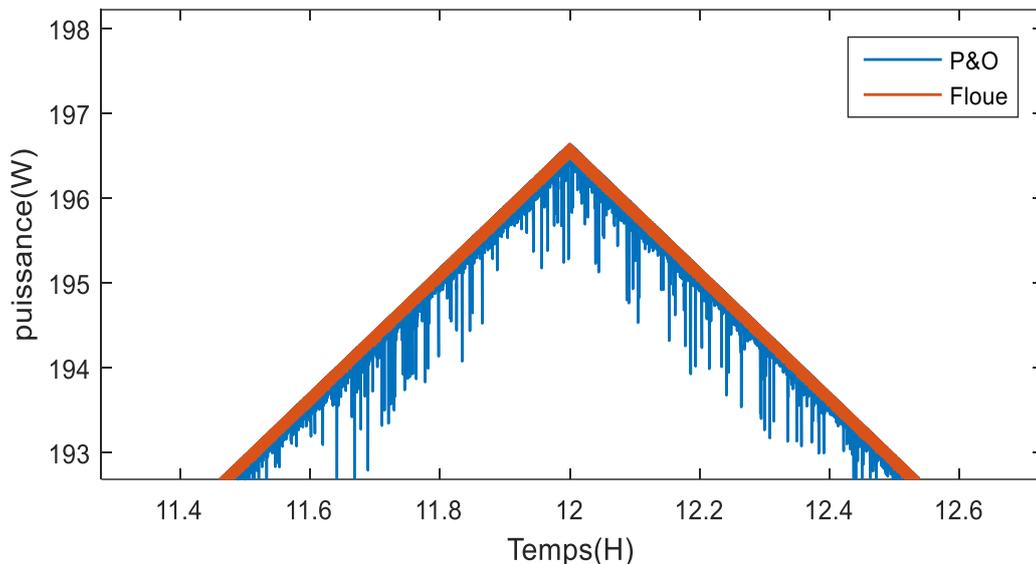


Figure IV.2 : Point de puissance maximale avec PO et logique floue

La figure IV.2 compare les points de puissance maximale obtenus par les méthodes Perturb and Observe (P&O) et logique floue dans un système photovoltaïque. Les deux approches atteignent des niveaux de puissance très similaires, culminant à environ 196,5W vers midi.

Cependant, des différences notables apparaissent dans leur comportement, la logique floue produit une courbe remarquablement lisse et stable, maintenant constamment la puissance maximale avec une grande précision.

En revanche, la méthode P&O présente des oscillations significatives autour du point optimal. Cette caractéristique, bien qu'indiquant une bonne réactivité, pourrait légèrement réduire l'efficacité énergétique globale en raison des pertes dues aux oscillations. La logique floue semble donc offrir un avantage en termes de stabilité et d'efficacité, particulièrement face aux petites variations d'ensoleillement.

Néanmoins, la méthode P&O reste généralement plus simple à mettre en œuvre. Le choix entre ces deux méthodes dépendra donc des priorités spécifiques du système : stabilité et efficacité maximales avec la logique floue, ou simplicité d'implémentation avec P&O. Dans des conditions réelles caractérisées par des variations rapides d'ensoleillement, la logique floue pourrait présenter un avantage significatif grâce à sa meilleure stabilité.

Tableau IV.1 : Tableau Comparatif entre P&O et FLC

Algorithme MPPT	P&O	FLC
Gradeur á mesurer	Tension et puissance	
Complexité	Moyenne	Grande
Vitesse	Dépend du pas	Rapide

IV.3 Evaluation de la technique PSO

Pour montrer la qualité des performances de PSO et sa capacité de poursuivre le PPM quel que soit le défaut enregistré ; ombrage partiel ou un défaut de connexion (LL/LG), ci-dessous les résultats de la simulation obtenus par la méthode PSO sous les différentes conditions :

- ❖ Ombrage partiel sur une partie d'un seul panneau de 54 cellules dont 18 sont ombrées, on montre la courbe P-V du panneau sans la présence de PSO est donnée sur cette figure (IV-3)

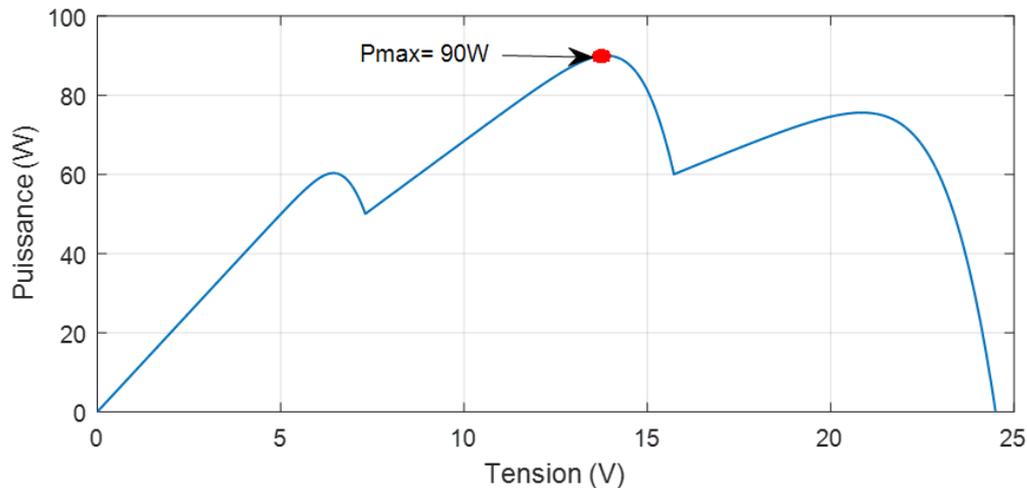


Figure (IV-3) : Caractéristique V-P panneau partiellement ombré

Le contrôle MPPT-PSO répond correctement aux caractéristiques du panneau. La puissance électrique générée par le panneau solaire est toujours maintenue à sa puissance maximale.

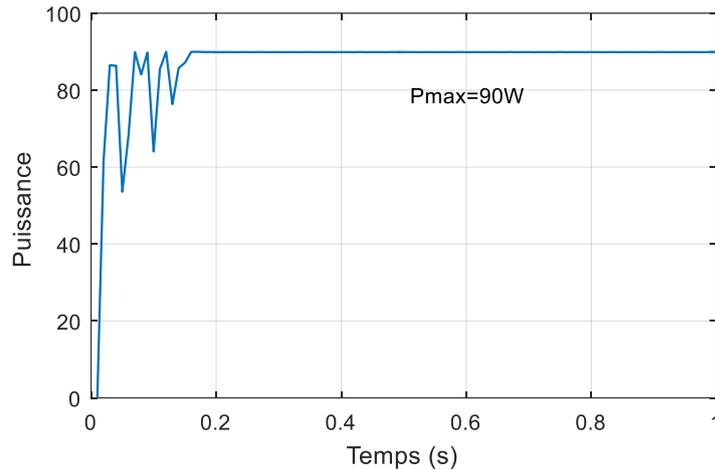


Figure IV.4 : Caractéristique puissance en fonction du temps

La Figure IV-4 montre l'évolution de la puissance :

- L'algorithme PSO converge rapidement vers la puissance maximale, atteignant presque 100% en moins de 0,1 seconde.
- Après les premières oscillations, la puissance se stabilise remarquablement. Elle reste constamment proche de 100% après environ 0,4 seconde, ce qui souligne l'efficacité de l'algorithme PSO pour localiser et maintenir le point de puissance maximale (MPP).
- Les oscillations initiales reflètent le processus d'exploration de l'algorithme PSO dans l'espace des solutions avant d'atteindre la convergence.

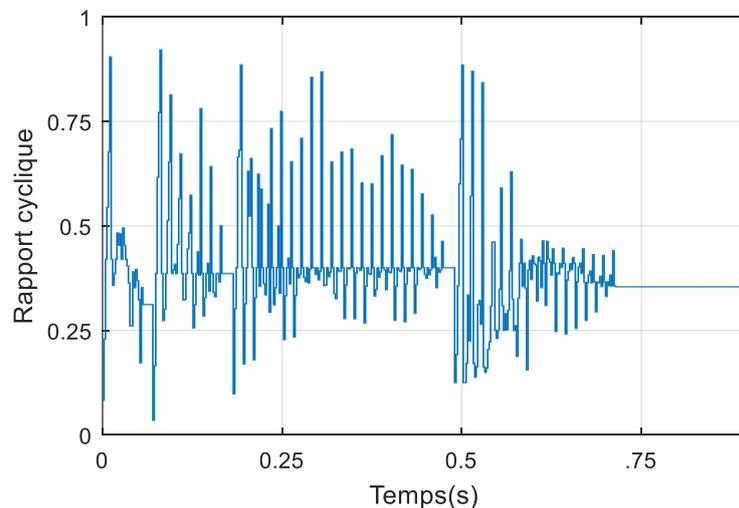


Figure IV.5 : Caractéristique rapport cyclique en fonction du temps

La Figure IV.5 montre l'évolution du Rapport cyclique (delta D) :

- Le rapport cyclique montre des ajustements acceptables et précis au début, correspondant à la phase d'exploration de l'algorithme PSO.
- Après environ 0,1 seconde, le rapport cyclique se stabilise autour de 0,4, indiquant que l'algorithme a trouvé la valeur optimale pour maximiser la puissance.
- La stabilité du rapport cyclique après 0,1 seconde correspond à la phase d'exploitation de l'algorithme PSO, où il affine sa solution autour de l'optimum trouvé.

L'algorithme PSO se distingue par son efficacité exceptionnelle pour le Maximum Power Point Tracking (MPPT), illustrant une convergence rapide et une stabilité remarquable. Le comportement dynamique de PSO se caractérise par des phases distinctes d'exploration initiale, marquées par des oscillations, suivies d'une phase d'exploitation où la puissance reste stable à près de 100% après environ 0,4 seconde. Cette analyse met en évidence la corrélation significative entre les ajustements du rapport cyclique et les variations de puissance, démontrant comment PSO optimise efficacement le système. De plus, l'algorithme se révèle robuste, assurant une puissance stable malgré les variations potentielles des conditions environnementales non visibles sur le graphique, mais implicitement gérées par PSO. En maximisant la capture d'énergie du système photovoltaïque grâce à sa convergence rapide et à sa stabilité élevée, PSO se positionne comme une solution efficace et fiable pour l'optimisation des systèmes photovoltaïques, soulignant ses avantages spécifiques dans le domaine du contrôle MPPT.

❖ La simulation d'un champ de trois panneaux en série deux avec ombrage ça nous donne la caractéristique de puissance suivante :

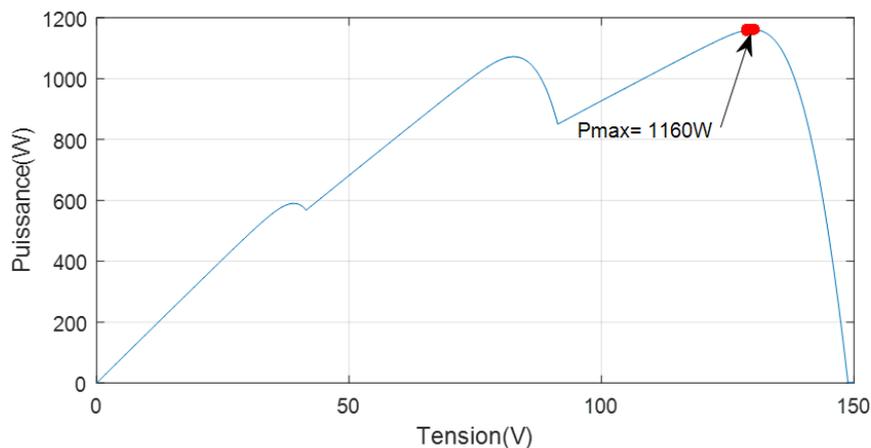


Figure IV.6 : Caractéristique V-P du champ dont des panneaux ombrés

D'après la figure IV.6 Le PSO atteint le point maximal dans un temps inférieur à 0.1s et sans perturbation, nous observant sur la figure IV.7 la puissance atteint (1160 w) et sur la figure IV.8 le rapport cyclique :

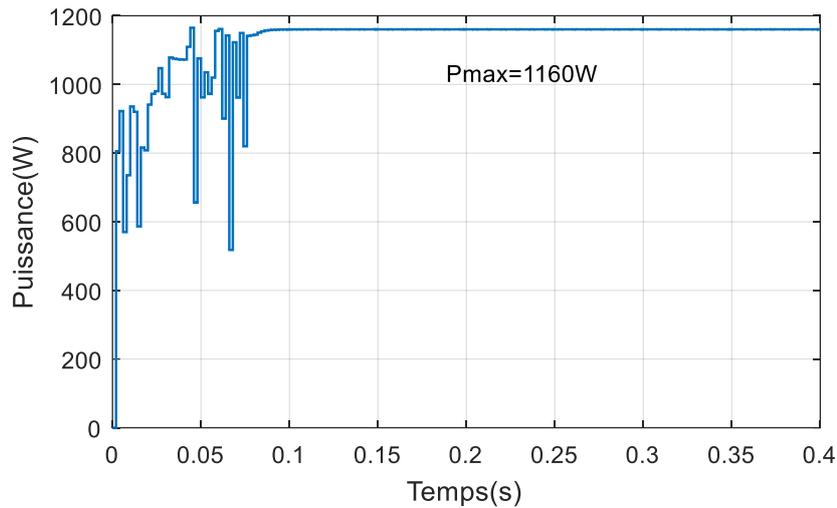


Figure IV.6 : Caractéristique Puissance en fonction du temps

L'algorithme PSO atteint le point de puissance maximal en moins de 0,1 seconde, avec une excellente stabilité par la suite. Plus précisément :

Figure VI.6 montre l'évolution de Puissance en fonction du temps :

- La puissance maximale de 1160 W est atteinte rapidement.
- Après une brève période d'oscillations initiales, la puissance se stabilise parfaitement, sans perturbations visibles.

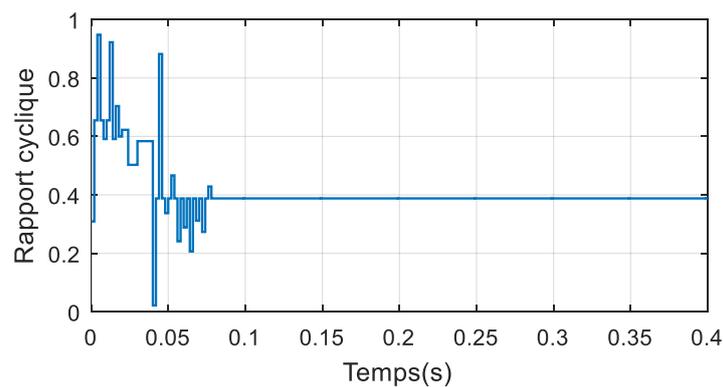


Figure IV.7 : Caractéristique du rapport cyclique en fonction du temps

Figure IV.8 montre l'évolution de Rapport cyclique en fonction du temps et on observe :

- Le rapport cyclique converge vers une valeur d'environ 0,45.
- Après quelques ajustements initiaux, il se stabilise complètement.

Ces résultats confirment l'efficacité du PSO pour :

- Une convergence rapide vers le point de puissance maximal
- Une excellente stabilité une fois ce point atteint
- L'absence de perturbations significatives après la phase initiale d'optimisation

Cette performance indique que le PSO est bien adapté pour le suivi du point de puissance maximal (MPPT) dans les systèmes photovoltaïques, offrant une réponse rapide et stable.

❖ Avec un défaut ligne-terre : La courbe P-V du champ est donnée sur cette figure :

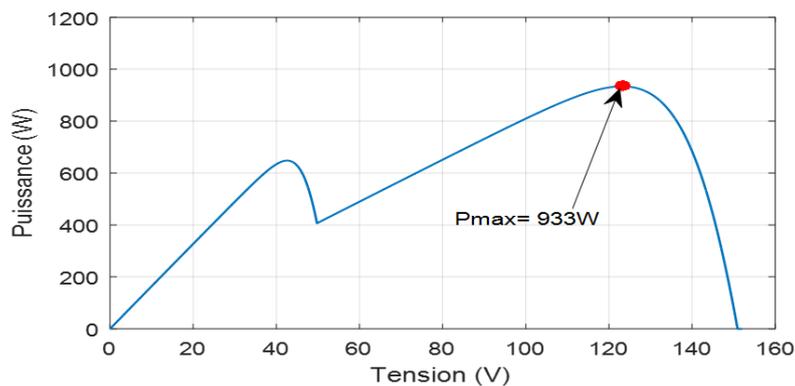


Figure IV.8 : Caractéristique V-P du champ avec un défaut LT

Le PSO atteint le point maximal dans un temps inférieur à 0.75s et sans perturbation nous observant sur la figure IV.9 la puissance et dans la figure IV.10 le rapport cyclique

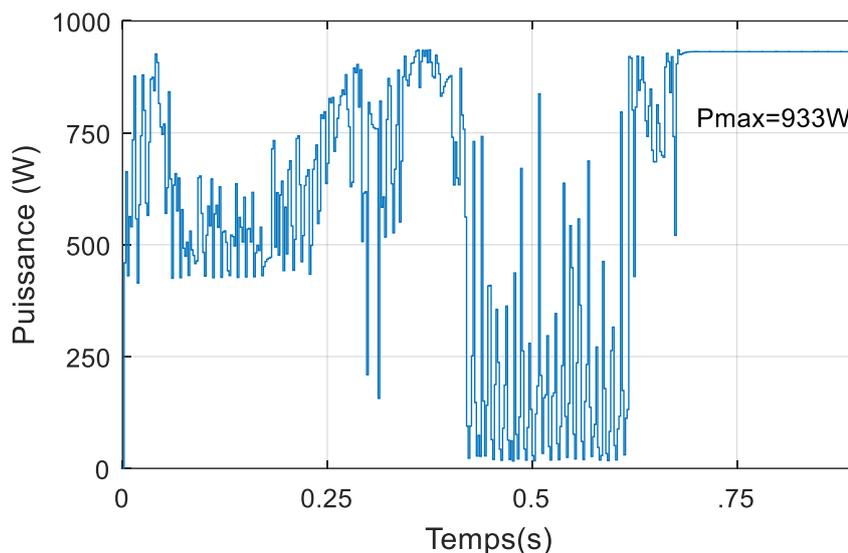


Figure IV.9 : Caractéristique puissance en fonction du temps

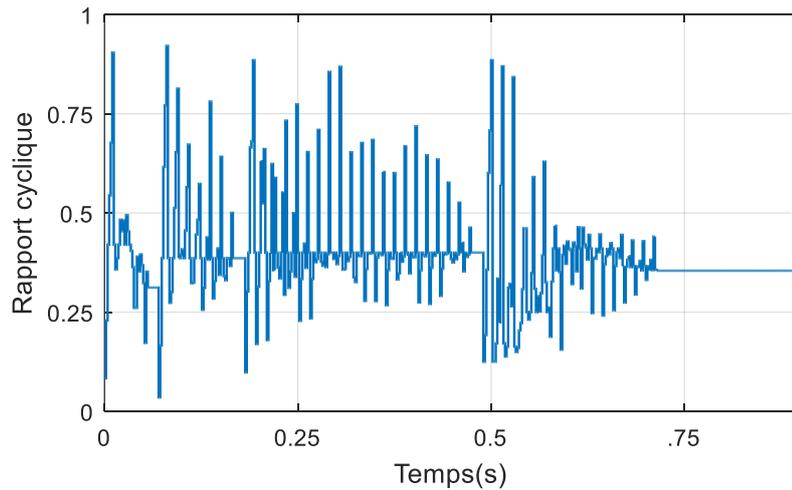


Figure IV.10 : Caractéristiques du rapport cyclique en fonction du temps

- ❖ Avec la présence d'un défaut ligne-ligne : La caractéristique V-P du champ est donnée sur la figure IV.11 suivante :

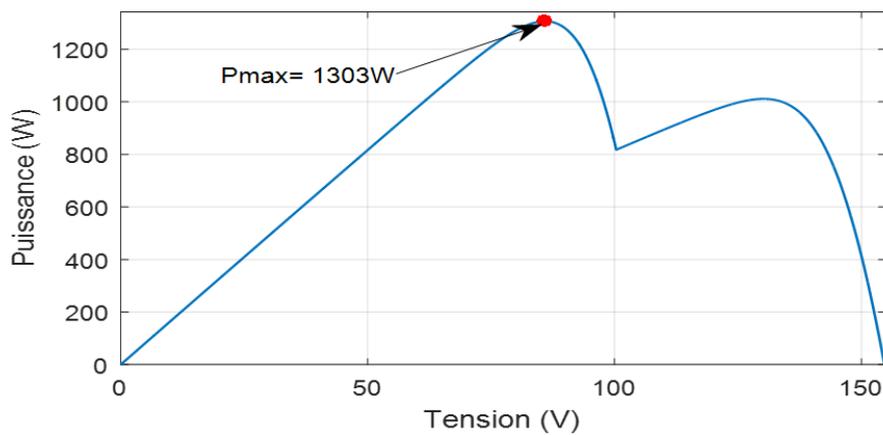


Figure IV.11 : Caractéristique V-P du champ avec un défaut LG

Nous observons aussi une autre fois un poursuit parfait du point de puissance maximale dans une duree très courte

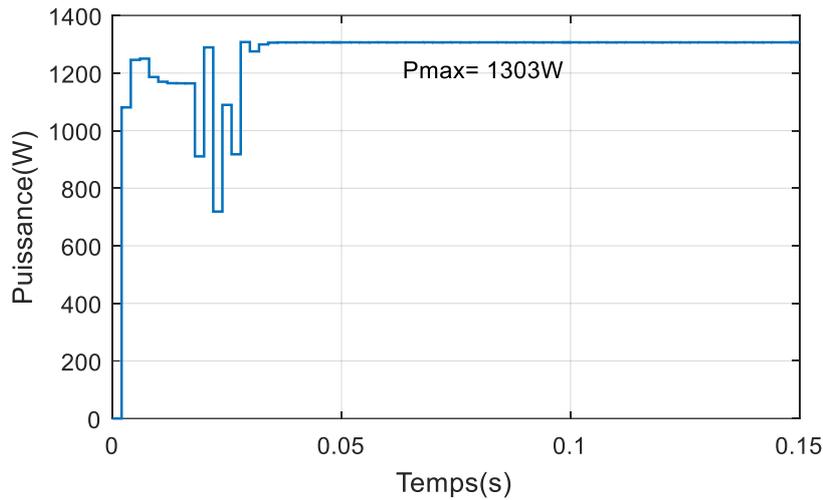


Figure IV.12 : Caractéristiques puissance en fonction de temps

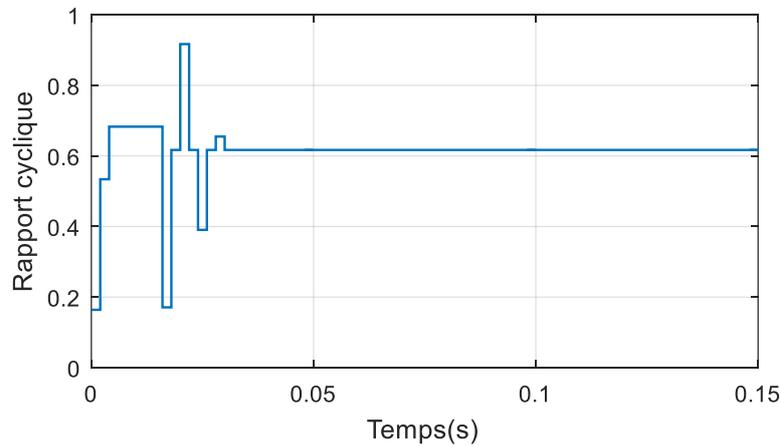


Figure IV.13 : Caractéristique du rapport cyclique en fonction du temps

IV.4 Comparaison entre TCT et SP en cas d'un défaut de résistances R_s et R_p

Pour effectuer une comparaison entre les configurations Total Cross Tide (TCT) et Série-Parallèle (SP) en cas de défauts de résistances série (R_s) et parallèle (R_p), nous allons analyser leurs performances respectives :

- **Cas de résistance série R_s**

La résistance série a été fixée à $0,221 \Omega$ tandis que la résistance parallèle a été variée (100/50/20/1 Ω). En cas de défaillance d'un panneau sur un champ PV de 6 panneaux, les puissances obtenues étaient respectivement de 1975, 1940, 1831, et 1390 W pour la configuration SP, comparées à 1983, 1957, 1847, et 1330 W pour la configuration TCT. Lors de la simulation de la défaillance de deux panneaux, les puissances mesurées étaient de 1960, 1917, 1762, et 700 W pour la configuration SP, et de 1970, 1922, 1780, et 722 W pour la configuration TCT sur le même champ PV de 6 panneaux.

- **Cas de résistance parallèle R_p**

Avec une résistance parallèle à 415,45 Ω , la résistance série a été variée (10/5/2/1 Ω). En cas de défaillance d'un panneau sur un champ PV similaire, les puissances enregistrées étaient de 1948, 1950, 1625, et 1360 W pour la configuration SP, comparé à 1941, 1845, 1580, et 1336 W pour la configuration TCT. Pour deux panneaux défaillants sur le même champ PV, les puissances mesurées étaient de 1891, 1714, 1368, et 1187 W pour la configuration SP, et de 1880, 1705, 1361, et 1176 W pour la configuration TCT

Le tableau IV.2 qui récapitule la comparaison entre les deux configurations (SP et TCT) :

Tableau IV.2 : Comparaison entre les configurations SP et TCT

Configuration	SP	TCT
Sensibilité au variation des résistances Parallèles	Grande	Petite
Sensibilité au variation des résistances séries	Grande	Grande
Câblage	Court	Long
Stabilité en cas de défaut	Mauvaise	Bonne
Structure avec un champ PV très grand	Simple	Complexe
Rendement	Médiocre	Meilleur

En conclusion, la configuration TCT présente généralement de meilleures performances en cas de défauts de R_s et R_p , offrant une meilleure stabilité et tolérance aux pannes. Cependant, le choix entre TCT et SP dépendra également d'autres facteurs tels que la taille du système, les coûts.

IV.5 Conclusion

Nous constatons que la logique floue se distingue par sa capacité à modéliser et à gérer l'incertitude de manière flexible et intuitive. Cela en fait un outil puissant pour optimiser les systèmes PV, où les conditions de fonctionnement peuvent varier considérablement et où une interprétation intuitive des résultats est souvent cruciale. En revanche, les technique PO est souvent plus efficaces dans des environnements déterministes avec des données précises et des objectifs bien définis. Le choix entre logique floue et techniques anciennes dépendra donc des exigences spécifiques du problème, y compris de la nature de l'incertitude, de la complexité des relations entre les variables et des objectifs d'optimisation spécifiques aux systèmes PV.

La technique PSO est particulièrement efficace pour l'optimisation numérique dans des espaces de recherche définis. Il utilise un processus itératif pour ajuster les positions des particules (agents) afin de converger vers une solution optimale, donc PSO est préféré à dans les

applications nécessitant une optimisation numérique précise, une exploration efficace d'espaces de recherche complexes, une adaptation aux changements des conditions climatiques et au défauts électriques.

Nous constatons aussi que le choix de la configuration en fonction des conditions spécifiques du site, des exigences de fiabilité et des stratégies de maintenance préventive à mettre en œuvre est crucial pour le bon fonctionnement de système.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce mémoire se concentre sur l'étude, l'implémentation et la comparaison des techniques MPPT dans des conditions d'ensoleillement uniforme et d'ombrage partiel. Pour atteindre cet objectif, nous avons débuté par la modélisation mathématique des composants d'un système photovoltaïque : les cellules, les panneaux photovoltaïques et le convertisseur DC/DC Boost. Ces modèles ont été utilisés pour construire un schéma dans Matlab/Simulink du système photovoltaïque, évaluant ainsi ses performances sous des conditions standard STC ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=1000\text{ W/m}^2$) et en cas d'ombrage partiel.

Ensuite, notre attention s'est portée sur la maximisation de la puissance délivrée par le panneau PV. Nous avons testé et comparé plusieurs méthodes MPPT telles que P&O et FLC. Les résultats montrent que toutes ces méthodes atteignent le point de puissance maximale (MPP) avec succès sous des conditions atmosphériques standard. Cependant, la méthode P&O est caractérisé par des oscillations autour du MPP, tandis que la méthode de commande FLC a montré de meilleures performances en termes de temps de réponse et de stabilité en régime permanent.

En revanche, en cas d'ombrage partiel, ces méthodes convergent vers le point de puissance maximale local. Pour pallier cette limitation, nous avons proposé des variantes des méthodes conventionnelles : P&O basée sur le découpage de l'intervalle de variation du rapport cyclique, P&O à pas variable, ainsi qu'une méthode basée sur PSO. Les simulations ont montré que ces techniques convergent vers le point de puissance maximale global, avec de meilleures performances en termes de rapidité et de stabilité en régime permanent pour la méthode P&O à pas variable.

En guise de perspectives, il serait pertinent de développer d'autres types de commandes MPPT et de procéder à leur implémentation matérielle sur des systèmes embarqués. Cela permettrait de valider les résultats de simulation obtenus et de confirmer les performances observées dans des conditions réelles d'exploitation des systèmes photovoltaïques.

Liste des références

Liste des références :

- [1] MESSAOUDENE H., « Détermination intelligente de la puissance maximale ». Mémoire de Magister, Université de Batna, 2013.
- [2] BENSMAIL S., « Contribution à la modélisation et à l'optimisation des systèmes photovoltaïques ». Mémoire de Magister, Génie électrique, Université A. Mira-Bejaia, 2012.
- [3] CUMUNEL P., BRAUN J.P., LABORET A., « Cellules Solaires ». Édition Dunod, Paris, 2001.
- [4] LEROUGE C., « Recherche et industrie photovoltaïque aux États-Unis ». Science Physique, 2006.
- [5] ZERGUINE B., « Modélisation d'un système de production électrique par la cellule photovoltaïque ». Mémoire de Master, Université de Badji Mokhtar, Annaba, 2010.
- [6] TIGHILET Ferhat O., « Dimensionnement et installation d'un système photovoltaïque (appliqué à la F.G.E.I) ». Mémoire du diplôme d'ingénieur d'état en électronique, Université Mouloud Maameri, Tizi-Ouzou, 2009.
- [7] ZAOUÏ FERS, « Utilisation des énergies renouvelables : influence de la température sur les performances du module PV3 ». Thèse de Doctorat, Université MOHAMED KHIDER Biskra, 12 mai 2016.
- [8] ABDELKADER M., « Modélisation et simulation sous Matlab/Simulink d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT ». Tizi-Ouzou, 2014.
- [9] BELAÏD MME, « Cours - Énergie solaire photovoltaïque ». Cours e-learning, Université de Bejaïa, Génie électrique, 2019.
- [10] MEEKHUN DARIGA, « Réalisation d'un système de conversion et de gestion de l'énergie d'un système photovoltaïque pour l'alimentation des réseaux de capteurs sans-fil autonomes pour l'application aéronautique » , thèse de Doctorat, Université de Toulouse.
- [11] LIU Y. H., HUANG S. C., HUANG J. W., LIANG W. C., « A particle swarm optimization-based maximum power point tracking algorithm for PV systems operating under partially shaded conditions ». IEEE Transactions on Energy Conversion, 27(4), 1027-1035, 2012.

- [12] TSAI H. L., Tu C. S., Su Y. J., « Development of generalized photovoltaic model using MATLAB/SIMULINK ». Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science, October 2008, pp. 1-6.
- [13] KESHAVANI K., JOSHI J., TRIVEDI V., BHAVSAR M., « Modelling and Simulation of Photovoltaic Array Using Matlab/Simulink ». International Journal of Engineering Development and Research, 2(4), 3742-3751, 2014.
- [14] PANKOW Y., « Étude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension ». Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris, décembre 2004.
- [15] SOBAIHI K., « Étude et réalisation d'un hacheur de Tracking du point de puissance Maximale (MPPT) à contre réaction ». Mémoire de Magister, École Nationale Polytechnique, Alger, 2010.
- [16] MAHER CH., « Gestion Énergétique des Panneaux photovoltaïques ». Mémoire Master, Université de Sfax, 2007-2008.
- [17] BILBAO LEARRETA A., « Réalisation de commandes MPPT Numériques ». Rapport de Stage, Projet Fin d'Études, Universitat Rovira Virgili, 2006.
- [18] ERICKSON R.W., MAKSIMOVIC D., « Fundamentals of Power Electronics (Second Edition) ». Springer, 2nd edition, 2001.
- [19] ISSARTEL B., « Conception d'un convertisseur DC/DC de type boost ». Thèse de Doctorat, Polytech Clermont-Ferrand, France, 2006.
- [20] Pr RUFER.A, BARRADE.P « Cours d'électronique de puissance conversion DC/DC » cours d'électronique de puissance, école polytechnique fédérale de Lausanne.
- [21] ABOUCHABANA N., « Étude d'une nouvelle topologie Buck-boost appliquée à un MPPT ». Thèse de Magister, ENP, Alger, 2009.
- [22] IRWIN J.D., « The Power Electronics Handbook ». TIMOTHY L. SKVARENINA, 2002.
- [23] KIVIMÄKI J., KOLESNIK S., SITBON M., SUNTIO T., KUPERMAN A., « Design guidelines for multiloop perturbative maximum power point tracking algorithms ». IEEE Transactions on Power Electronics, 33(2), 1284-1293, 2017.
- [24] ABBES H., ABID H., LOUKIL K., TOUMI A., ABID M., « Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque ». Journal of Renewable Energies, 17(3), 435-445, 2014.

- [25] CHIN C.S., NEELAKANTAN P., YOONG H.P., YANG S.S., TEO K.T.K., « Maximum power point tracking for PV array under partially shaded conditions ». In 2011 Third International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks, pp. 72-77, July 2011.
- [26] KENNEDY J., EBERHART R., « Particle swarm optimization ». Proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks, Vol. 4, pp. 1942-1948, November 1995.
- [27] PARSOPOULOS K.E., VRAHATIS M.N., eds., « Particle swarm optimization and intelligence: advances and applications ». IGI Global, 2010.
- [28] COOREN Y., « Perfectionnement d'un algorithme adaptatif d'Optimisation par Essaim Particulaire: application en génie médical et en électronique ». Doctoral dissertation, Université Paris-Est, 2008.
- [29] HADJI S., « Optimisation de la conversion énergétique pour les systèmes à énergie Photovoltaïque ». Doctoral dissertation, 2018.
- [30] NOTTON .G., CALUIANU .I.COLDA.,& CALUIANU , S. « Influence d'un ombrage partiel sur la production électrique d'un module photovoltaïque en silicium monocristallin »,Revue des énergies renouvelables ,13(1),49-62 ,2010
- [31] DADKHAH,J.,& NIROOMAND, M . « Optimization methods of MPPT Parameters for PV Systems: Review ,Classification , and Comparison. » Journal of Modern Power Systems and Clean Energy ,9(2) , 2021
- [32] De D., GRENOBLE D.E., BUN L., « Détection et Localisation de Défauts pour un Système PV », 2011.
- [33] SHI J., ZHANG W., ZHANG Y., XUE F., YANG T., « MPPT for PV systems based on a dormant PSO algorithm ». Electric Power Systems Research, 2015.
- [34] KUMAR A., PACHAURI R.K., CHAUHAN Y.K., « Experimental analysis of SP/TCT PV array configurations under partial shading conditions ». 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems.