



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة الشهيد حمّـة لخضر الوادي

Université d'El Oued

Faculté de Technologie

Département de Génie Électrique

Filière d'Électrotechnique

Mémoire

Présentée par

Oubiri Moueid Bellah

Ismailia Dhiya Eddine

Pour l'obtention du diplôme de
Master LMD en électrotechnique

Option Commande électrique

Titre

**Implémentation des algorithmes P&O, PSO et INC pour le
MPPT d'un système photovoltaïque en utilisant Arduino.**

Dr : bachaouat mohsine

Président

Dr : boughazala mohammed saleh

Examineur

Dr : Toumi Djafer

Encadreur



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة الشهيد حمّـه لخضر الوادي

Université d'El Oued

Faculté de Technologie

Département de Génie Électrique

Filière d'Électrotechnique

Mémoire

Présentée par

2025/2026

Résumé

المخلص

هذه الرسالة تتناول نمذجة وتطبيق أنظمة الطاقة الشمسية) الكهروضوئية (باستخدام تقنيات متقدمة لتتبع نقطة الطاقة القصوى (MPPT) تغطي الدراسة ثلاثة فصول رئيسية: الفصل الأول يقدم مبادئ الخلايا الشمسية والعوامل المناخية المؤثرة على الأداء الفصل الثاني يركز على نمذجة الأنظمة الكهروضوئية والمحولات الكهربائية وخوارزميات MPPT المختلفة مثل P&O والمنطق الضبابي الفصل الثالث يقدم المحاكاة والتطبيق العملي لهذه الخوارزميات باستخدام لوحة Arduino ، مع نتائج تظهر أن المنطق الضبابي يحقق أداءً متفوقاً في تتبع نقطة الطاقة القصوى وتحسين استقرار النظام.

الكلمات المفتاحية: PV الطاقة الكهروضوئية-GPV مولد كهروضوئي IV - منحنى التيار-الجهد

I_{pm}: التيار عند نقطة القدرة القصوى [أمبير] VCO: جهد الدائرة المفتوحة

Résumé

Ce mémoire traite de la modélisation et de l'implémentation de systèmes photovoltaïques utilisant des techniques avancées de suivi du point de puissance maximale (MPPT). L'étude couvre trois chapitres principaux : le premier présente les principes des cellules solaires et les facteurs climatiques influençant les performances. Le deuxième chapitre se concentre sur la modélisation des systèmes PV, les convertisseurs DC-DC et différents algorithmes MPPT, notamment la méthode de perturbation-observation (P&O) et la logique floue. Le troisième chapitre présente la simulation et l'implémentation pratique de ces algorithmes en utilisant une carte Arduino Méga, avec des résultats montrant que la logique floue offre une performance supérieure en suivi du MPP et en stabilité du système.

PV photovoltaïque

GPV un générateur photovoltaïque- I-V courant-tension-*I_{ppm}* Courant au point de puissance maximale [A].-VCO Tension à circuit ouvert

Abstract

This thesis addresses the modeling and implementation of photovoltaic systems using advanced Maximum Power Point Tracking (MPPT) techniques. The study covers three main chapters: the first introduces solar cell principles and climatic factors affecting performance. The second chapter focuses on modeling PV systems, DC-DC converters, and various MPPT algorithms, including Perturbation & Observation (P&O) and Fuzzy Logic control. The third chapter presents simulation and practical implementation of these algorithms using an Arduino Mega microcontroller, with results demonstrating that Fuzzy Logic control achieves superior performance in MPP tracking and system stability compared to conventional methods.

Listes des Symboles et Abréviations

PV photovoltaïque

GPV un générateur photovoltaïque

I-V courant-tension

ICC Courant de court circuit

VCO Tension à circuit ouvert

FF Facteur de forme

P_m Point de puissance maximale

IL Courant traversant l'inductance *L* dans le convertisseur DC/DC [A].

I_{ph} Photo-courant, dépendant de l'intensité de l'irradiation [A].

I_{ppm} Courant au point de puissance maximale [A].

IR_p Courant dérivé par la résistance parallèle [A].

I_s Courant de sortie du convertisseur DC/DC [A].

I_{sat} Courant de saturation inverse de la diode d'une cellule, dépendant de la température.

N_s Nombre de modules dans le panneau en série.

N_p Nombre de modules dans le panneau en parallèle

P_{pv} Puissance de la cellule photovoltaïque (ou GPV).

P_{max} Puissance maximale produite PV (W).

P_s Puissance de sortie du convertisseur DC/DC (de la charge *R*).

q Charge d'électron $q = 1.602 \times 10^{-9}$ c.

R Charge résistive [Ω]

R_p Résistance de shunt caractérisant les courants de fuites de la jonction [Ω].

R_s Résistance série

S Surface de glissement.

Sat Fonction saturation

Sign Fonction signe

T Température effective de la cellule en kelvin [K].

u Loi de commande

ueq Loi de commande équivalente

un Loi de commande discontinue

MPPT Maximum Power Point Tracking

P&O Perturbation et observation

DC/AC Conversion continu/alternatif

DC/DC Conversion continu/continu

D'autres symboles et abréviations spécifiques peuvent être définis dans les chapitres, s'il y a lieu.

À mes parents

À mes frères

À toute ma famille

À tous ceux qui me sont chers

Remerciements

Remerciements

Avant tout, je remercie Dieu le tout puissant et miséricordieux qui m'a donné l'envie, le courage et la force pour mener à terme ce travail.

*Mes remerciements s'adressent tout d'abord à mon Directeur de mémoire, Docteur **Toumi Djafer**. Tout au long de ce travail, elle a su m'apporter un soutien constant, une disponibilité, une écoute, une confiance et des conseils précieux et avisés à la hauteur de ses compétences et de ses réelles qualités humaines.*

Mes remerciements vont aussi aux membres de jury qui ont accepté d'examiner ce travail

Table des Matières

Table des Matières

Introduction générale	2
------------------------------------	----------

Chapiter .1Généralités sur les systèmes photovoltaïque

1.1. Introduction	5
1.2. Bref historique.....	6
1.3. Production électrique mondiale par les modules PV	7
1.4. Développement des énergies renouvelables en Algérie	7
1.5. Effet photovoltaïque et technologies des cellules photovoltaïques	8
1.6. Cellule photovoltaïque	9
1.6.1. Types de cellules photovoltaïques.....	10
1.6.2. Caractéristiques électriques d'une cellule PV	12
1.6.2.1. Courbes I-V et P-V d'une cellule photovoltaïque.....	12
1.6.2.2. Caractéristiques de sortie des cellules PV	12
1.7 Différents types de rayonnement	13
1.7.1 Rayonnement direct.....	14
1.7.2 Rayonnement diffuse	15
1.7.3 L'albédo ou Réfléchi.....	16
1.7.4 Rayonnement global	16
1.8 Conclusion.....	16

Chapitre 2 Modélisation d'un système photovoltaïque et la méthode MPPT

2 .1. Introduction.....	19
2 .2. Circuit équivalent d'une cellule solaire.....	19
2 .2.1. Cas d'une cellule idéale	19
2 .2.2. Cas d'une cellule réelle.....	21
2 .3. Mode de connexion du PV.....	22
2 .3.1. Association des cellules en série.....	22
2 .3.2. Association des cellules en parallèle	23
2 .3.3. Association mixte (série-parallèle).....	23
2 .4. Caractéristiques électriques du module photovoltaïque	24
2.5 .Les convertisseurs DC-DC (hacheurs)	25
2.5.1. Les type des convertisseurs DC-DC	25
2.5.2. Hacheur survolteur (ou Boost)	25
2.5.3. Etude du hacheur survolteur d'un système photovoltaïque	27
2.5.3.1. Représentation d'un hacheur survolteur PV	27

2.5.3.2. Modélisation d'un hacheur survolteur : [24].....	28
2.6. Commande MLI du hacheur	29
2.7. Technique de commande de l'MPPT	30
2.7.1. Définition	30
2.7.2. Convertisseur Pour la poursuite du point de puissance maximum (MPPT)..	30
2.7.3. Le principe de fonctionnement du MPPT d'un générateur PV	31
2.7.4. Différentes techniques d'MPPT.....	33
2.7.4.1. Les méthodes indirectes.....	33
2.7.4.2. Les méthodes directes.....	33
2.7.4.2.1. Méthode Perturbation et Observation (P&O)	34
2.11 Conclusion.....	42
Chapitre 3 simulations et implémentation de commandes MPPT sur le système PV	
3.1 Introduction	44
3.2 Banc d'essai et mesures	44
3.3 Simulation du système.....	47
3.3.1 Résultats de simulation :	48
3.3.2 Résultats expérimentaux	49
3.4 Conclusion	53
Conclusion Générale.....	54

Table des Figures

Chapiter .1Généralités sur les systèmes photovoltaïque

Figure 1.1 : Absorption de photons et génération d'une tension électrique	9
Figure 1.2 : Cellule solaire	10
Figure 1.3 : Photos de cellules et panneaux des différentes technologies solaires : Monocristallin ; Polycristallin ; Couche mince	11
Figure 1.4 : Caractéristiques P-V d'une cellule PV lorsque : (a) T augmente ; (b) G augmente ; Caractéristiques I-V : (c) T augmente ; (d) G augmente.....	12
Figure 1.5 : Caractéristique électrique I-V d'une cellule PV.....	13
Figure 1-6 : Différents composants de rayonnement.....	14
Figure 1-7-a /b	15
Figure 1-8- a /b	15
Figure 1-9- a /b	15

Chapiter .2 Modélisation d'un système photovoltaïque et la méthode MPPT

Figure 2.1 – Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale	20
Figure. 2.2 – Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle (modèle à une diode avec R_s et R_{sh}).....	21
Figure. 2.3 – Association de N_s cellules photovoltaïques en série	22
Figure. 2.4 – Association de N_p cellules photovoltaïques en parallèle	24
Figure 2.5 – Association mixte (N_s cellules en série $\times$ N_p branches en parallèle).....	24
Figure. 2.6 – Caractéristiques électriques I(V) et P(V) d'un module photovoltaïque (STC : $G = 1000 \text{ W/m}^2$, $T = 25^\circ\text{C}$)	25
Figure 2.7: Schéma de principe d'un hacheur parallèle (boost)	26
Figure 2.8: Schéma d'un hacheur parallèle (boost) raccordé au GP	27
Figure 2.9: Formes typiques des ondes du convertisseur boost.	28
Figure 2.10: Génération des impulsions de commande du hacheur.	30
Figure 2.11: Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque associée à une commande MPPT.....	31
Figure 2.12: Chaîne de conversion photovoltaïque	32
Figure 2.13: Caractéristiques de fonctionnement de la méthode de P&O.	34
Figure 2.14: schéma du contrôleur à logique floue	36
Fig. 2. 15. Fonctions d'appartenance des variables d'entrée et de sortie du contrôleur à logique floue	37
Figure. 2. 16. PSO algorithm.	41

Chapiter .3 simulations et implémentation de commandes MPPT sur le système PV

Figure 3.1. Schéma synoptique de la chaîne de conversion photovoltaïque réalisée	44
Figure 3.2 Banc d'essai experimental.....	46
Figure. 3.3. Schéma fonctionnel d'acquisition, de traitement, de commande et de visualisation en temps réel des résultats expérimentaux.....	47
Figure 3.4. Données des caractéristiques électriques du module PV extraites de Matlab/Simulink.....	47
Figure. 3.5. Schéma MATLAB/Simulink du système photovoltaïque avec les méthodes MPPT étudiées.....	48
Figure. 3.6 . Puissance de sortie PV utilisant l'algorithme P&O avec un pas fixe de 0,005 et 0,00005.	49
Figure. 3.7 Puissance de sortie PV utilisant le PID et le PSO-PID.....	50
Figure. 3.8. Puissance de sortie PV pour toutes les méthodes proposées (Système photovoltaïque avec les méthodes MPPT étudiées).	50
Figure. 3.9. Résultats pratiques pour une journée ensoleillée.....	51
Figure. 3.10. Résultat pratique lors d'une journée nuageuse.....	51
Figure. 3.11. Résultats pratiques du panneau ombragé.	52

Introduction Générale

Introduction générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures.

Par opposition, une énergie dite renouvelable doit se régénérer naturellement et indéfiniment à l'échelle temporelle de notre civilisation. Parmi ces énergies, l'énergie issue du soleil répond actuellement à ces critères à la fois d'abondance à la surface terrestre et de régénération infinie à notre échelle. Elle peut ainsi être utilisée directement sous forme thermique et depuis la découverte de l'effet photovoltaïque, convertie en énergie électrique.

Cette dernière, bien qu'elle soit connue depuis de nombreuses années, comme source pouvant produire de l'énergie allant de quelques milliwatts au mégawatt, reste à un stade anecdotique et ne se développe pas encore dans de grandes proportions, notamment à cause du coût trop élevé des capteurs mis en œuvre [1].

La conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, a été découverte par E. Becquerel en 1839. Cette conversion d'énergie peut s'effectuer par le biais d'un capteur constitué de matériaux sensibles à l'énergie contenue dans les photons.

Ce capteur se présente à l'échelle élémentaire sous forme d'une cellule nommée cellule photovoltaïque (PV). La quantité d'énergie électrique ainsi générée peut varier en fonction du matériau utilisé, des paramètres géométriques du capteur et de sa capacité à collecter les électrons avant qu'ils ne se recombinent dans le matériau. L'association possible de plusieurs cellules PV en série/parallèle permet d'adapter théoriquement la production d'énergie photovoltaïque à la demande. Ces associations constituent un générateur photovoltaïque (GPV) avec des caractéristiques courant-tension $I(V)$ spécifiques, non-linéaires et présentant des points de puissance maximale (PPM) dépendant du niveau d'éclairement, de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble.

En effet, le développement des systèmes de conversion rentables et économiquement viables, passe nécessairement par la compréhension des différents composants du système à leur tête le panneau solaire. Ce dernier est composé de plusieurs cellules solaires qui nécessitent étude et compréhension. Plusieurs modèles ont été présentés dans la littérature

pour étudier le comportement d'une cellule solaire et déterminer ses caractéristiques en particulier la caractéristique courant- tension et la caractéristique puissance tension. Ces modèles peuvent être classés en deux groupes : les modèles à deux diodes et les modèles à une diode. De plus, le point donnant la puissance maximale a suscité un intérêt supplémentaire car l'obtention de modèles simplifiés modélisant le comportement de la photocellule en fonction des conditions climatiques (température, éclairement) s'avère nécessaire surtout lors de l'étape de dimensionnement. Quatre modèles établis dans la littérature ont été revus et leurs résultats comparés.

Chapiter .1

Généralités sur les systèmes photovoltaïque

1.1. Introduction

Les ressources naturelles telles que l'ensoleillement, le vent, les précipitations, les marées et la chaleur issue des profondeurs terrestres constituent les sources des énergies dites renouvelables. À l'opposé des énergies fossiles qui s'épuisent progressivement, ces ressources se régénèrent de façon naturelle et continue. L'essor de la demande énergétique mondiale a conduit à un regain d'intérêt considérable pour les filières propres et durables. Outre la raréfaction des hydrocarbures conventionnels, les nuisances environnementales liées à leur combustion constituent une contrainte supplémentaire qui freine leur utilisation. En revanche, les sources d'énergie renouvelables se distinguent par leur faible impact environnemental, offrant une production électrique quasi exempte de rejets polluants. L'énergie solaire peut être exploitée selon deux approches distinctes : d'une part, la chaleur captée peut être valorisée thermiquement pour le chauffage des bâtiments ; d'autre part, le rayonnement solaire peut être converti directement en énergie électrique, qui représente la forme d'énergie la plus répandue. Cette conversion est assurée soit par des cellules photovoltaïques, soit par des centrales solaires à concentration.

L'objectif de ce chapitre est de présenter les principes de l'effet photovoltaïque ainsi que les différentes technologies de cellules solaires, de décrire l'architecture d'un système photovoltaïque et d'en expliquer le fonctionnement de chaque constituant, notamment la cellule photovoltaïque, le convertisseur continu-continu (DC-DC), les algorithmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) et les accumulateurs. Par la suite, une étude est menée sur l'influence des paramètres climatiques tels que l'irradiance solaire et la température ambiante sur les performances des modules photovoltaïques.

Dans le cadre de ce travail, la mise en œuvre pratique du système photovoltaïque sera réalisée à l'aide de la carte microcontrôleur Arduino. Ce choix se justifie par plusieurs atouts majeurs que présente cette plateforme : son faible coût, sa grande accessibilité, la richesse de son environnement de développement open-source, ainsi que sa capacité à interfacer aisément une large gamme de capteurs analogiques et numériques. L'Arduino permettra d'assurer l'acquisition en temps réel des grandeurs électriques et climatiques du système telles que le courant, la tension, la température et l'irradiance solaire et d'en assurer le traitement numérique. Il constituera ainsi le cœur du système de surveillance et de commande, offrant la possibilité d'implémenter des algorithmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) et de visualiser les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ du générateur photovoltaïque sous différentes conditions de fonctionnement. Cette approche expérimentale permettra de

confronter les résultats obtenus aux modèles théoriques étudiés, et d'en valider la pertinence dans des conditions réelles d'utilisation.

1.2. Bref historique

La technologie solaire possède des racines historiques profondes, remontant au 7ème siècle avant notre ère. Les premières utilisations consistaient à concentrer les rayons du soleil à l'aide de verres et de miroirs afin d'allumer des flammes.

Le premier capteur solaire fut conçu par le scientifique helvétique Horace de Saussure, puis mis en œuvre par Sir John Herschel lors de son expédition en Afrique australe dans la décennie 1830 pour la cuisson des aliments.

C'est en 1839 qu'Edmond Becquerel, physicien français, mit en évidence l'effet photovoltaïque en menant des expériences sur une cellule d'électrolyse dotée de deux électrodes métalliques plongées dans une solution électrolytique. Il constata que l'exposition à la lumière augmentait la production d'électricité. En 1873, Willoughby Smith révéla les propriétés photoconductrices du sélénium. Quelques décennies plus tard, en 1908, William J. Bailey, ingénieur chez Carnegie Steel Company, mit au point un capteur solaire intégrant des serpents en cuivre dans un caisson thermiquement isolé.

En 1954, Daryl Chapin, Calvin Fuller et Gerald Pearson, chercheurs aux laboratoires Bell, réalisèrent la première cellule photovoltaïque à base de silicium suffisamment performante pour alimenter des appareils électriques courants. Cette cellule affichait initialement un rendement de 4 %, qui fut porté ultérieurement à 11 %. Hoffmann Electronics atteignit de son côté un rendement de 9 % en 1958. Cette période vit également le lancement des premiers satellites propulsés par l'énergie solaire. En 1973, l'Université du Delaware inaugura l'un des premiers systèmes PV résidentiels sous le nom de « Solar One », combinant production photovoltaïque et récupération thermique.

En 1975, Werner Von Siemens présenta devant l'Académie des Sciences de Berlin ses travaux sur l'exploitation de l'effet photovoltaïque dans les matériaux semi-conducteurs. Néanmoins, ces recherches restèrent confinées au milieu académique jusqu'à l'issue du second conflit mondial.

En 1983, sur le continent australien, un véhicule entièrement alimenté par des panneaux solaires réussit à parcourir une distance de 4 000 kilomètres. [2].

1.3. Production électrique mondiale par les modules PV

D'après les statistiques récentes d'Ember (figure 1.1), la consommation électrique planétaire s'est élevée à 27 520,5 TWh en 2021, enregistrant une hausse de 1 414 TWh par rapport à l'année précédente, soit une progression de 5,4 %. Cette augmentation est comparable à l'ajout de la totalité de la consommation indienne à la demande mondiale.

La quasi-totalité des économies avancées ont retrouvé leurs niveaux de consommation d'avant la pandémie. La Chine s'est imposée comme le principal moteur de cette reprise, avec une hausse de 13 % de sa consommation électrique en 2021 par rapport à 2019. Selon Ember, l'éolien et le solaire ont respectivement contribué à hauteur de 6,6 % et 3,7 % de la production mondiale d'électricité en 2021. Cinquante pays ont désormais recours à ces filières pour couvrir plus de 10 % de leurs besoins électriques, dont sept nouveaux entrants en 2021 parmi lesquels la Chine et le Japon.

La production solaire mondiale a progressé de 23 % et la production éolienne de 14 % par rapport à 2020. Afin de contenir le réchauffement climatique en deçà de 1,5 °C, ces deux secteurs doivent maintenir des taux d'expansion annuels d'environ 20 % jusqu'en 2030 [3].

1.4. Développement des énergies renouvelables en Algérie

L'Algérie s'est engagée dans une transition énergétique ambitieuse à travers la mise en œuvre d'un programme national de développement des énergies renouvelables et d'amélioration de l'efficacité énergétique, impulsant ainsi une dynamique de croissance verte.

Au cœur de cette vision se trouve la valorisation des ressources inépuisables, notamment l'énergie solaire, dans le but de diversifier le mix énergétique national et d'anticiper les besoins futurs. Le programme national fixe un objectif d'installation de quelque 22 000 MW d'origine renouvelable à l'horizon 2030 pour le marché intérieur, tout en envisageant l'exportation comme perspective stratégique. En parallèle, le volet efficacité énergétique vise à économiser 63 millions de TEP d'ici 2030, en intervenant dans tous les secteurs bâtiment, énergie, transport et industrie au moyen de l'éclairage performant, de l'isolation thermique, des chauffe-eaux solaires, des carburants propres et des équipements industriels optimisés. Ce dispositif permettra une réduction des émissions de CO₂ estimée à 193 millions de tonnes. En intégrant la biomasse, la cogénération, la géothermie et le solaire thermique, l'Algérie ambitionne de s'affirmer comme un acteur incontournable de la production d'électricité renouvelable, notamment via les filières solaires et éoliennes.

Ces activités sont appelées à engendrer un développement économique durable, à l'horizon 2030, 37 % de la capacité installée et 27 % de la production électrique nationale proviendront de sources renouvelables. En raison de la prédominance du potentiel solaire, l'Algérie perçoit cette énergie comme un vecteur de développement économique et social, notamment via la création d'industries génératrices de valeur ajoutée et d'emplois. Des initiatives portant sur des fermes éoliennes et des projets pilotes en biomasse, géothermie et cogénération sont également prévus.

La mise en œuvre des projets de production d'électricité renouvelable destinés au marché national se décline en deux tranches :

La première tranche (2015–2020) prévoyait le déploiement de 4 010 MW issus des filières photovoltaïque et éolienne, auxquels s'ajoutaient 515 MW provenant de la biomasse, de la cogénération et de la géothermie.

La seconde tranche (2021–2030) vise l'établissement d'une interconnexion électrique entre le Nord et le Sahara (Adrar), facilitant l'implantation de grandes installations renouvelables dans les régions d'In Salah, Adrar, Timimoune et Bécharr, et leur raccordement au réseau énergétique national. La stratégie algérienne aspire à l'émergence d'une véritable industrie nationale des énergies renouvelables, adossée à un programme de formation et de transfert de compétences (Figure 1.2). Le programme EnR devrait générer plusieurs milliers d'emplois directs et indirects [4].

1.5. Effet photovoltaïque et technologies des cellules photovoltaïques

L'effet photovoltaïque a été mis en évidence pour la première fois par le physicien français Alexandre Edmond Becquerel en 1839. Ce phénomène se manifeste lorsque des photons sont captés par un matériau semi-conducteur, générant ainsi une différence de potentiel électrique. Les cellules photovoltaïques assurent la transformation du rayonnement solaire en courant continu, lequel peut être utilisé pour alimenter des équipements électriques ou pour charger des accumulateurs.

Les dispositifs photovoltaïques réalisent donc une conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Diverses voies technologiques exploitent ce phénomène, et certaines avancées récentes telles que les colorants photosensibles [5], les polymères organiques [6] ou encore les pérovskites photovoltaïques [7] ouvrent des perspectives prometteuses.

Toutefois, les technologies photovoltaïques dominantes sur le plan commercial font appel à un semi-conducteur solide formant une jonction p-n (positif-négatif), sur laquelle est

focalisée l'énergie lumineuse. Lors de la formation de cette jonction, un champ électrique interne se constitue et attire les porteurs de charge à travers l'interface sous l'effet de l'énergie solaire incidente [8]. Lorsque la jonction p-n éclairée est reliée à un circuit extérieur, un courant continu (DC) est produit.

L'intensité du courant généré par les cellules solaires est directement liée au niveau d'irradiation : plus la lumière incidente est importante, plus le nombre de photons absorbés et d'électrons libérés est élevé. De ce fait, le courant de court-circuit (I_{sc}) varie proportionnellement à l'irradiance solaire (G).

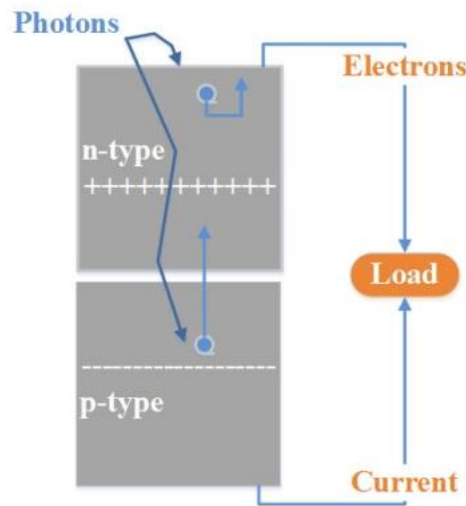


Figure 1.1 : Absorption de photons et génération d'une tension électrique

1.6. Cellule photovoltaïque

La cellule solaire constitue l'élément fondamental du système PV, et sa conception détermine en grande partie les performances globales de l'installation.

La cellule solaire (figure 1.2) est un composant semi-conducteur à jonction p-n dont le comportement s'apparente à celui d'une diode, mais avec la particularité de générer un flux d'électrons sous l'effet de l'exposition lumineuse. Les photons solaires pénètrent dans le matériau semi-conducteur et arrachent les électrons de leurs orbites atomiques.

La jonction p-n résulte de la mise en contact des semi-conducteurs de type n et de type p. Lorsque des photons sont absorbés avec une énergie supérieure à la largeur de la bande interdite du semi-conducteur, des paires électron-trou sont générées. La mise en contact du matériau de type p (silicium dopé au bore) avec le matériau de type n (silicium dopé au phosphore) induit une diffusion d'électrons vers la zone d'appauvrissement. Quand les

électrons migrent du côté p vers le côté n, un courant électrique circule dans le circuit extérieur connecté à une charge.

Les propriétés physiques des cellules solaires ont fait l'objet de nombreuses investigations. Les caractéristiques de fonctionnement de la cellule dans diverses conditions se révèlent suffisantes pour la mise en œuvre des méthodes de détection des défauts. [9]



Figure 1.2 : Cellule solaire

1.6.1. Types de cellules photovoltaïques

Parmi les technologies photovoltaïques disponibles sur le marché, trois grandes familles se distinguent : le silicium monocristallin, le silicium polycristallin et les cellules à couches minces [T30]. D'autres technologies existent également, comme les cellules hybrides associant du silicium cristallin et amorphe (figure 1.3), mais les trois premières restent les plus répandues. Le tableau suivant synthétise les caractéristiques des différentes technologies de cellules solaires

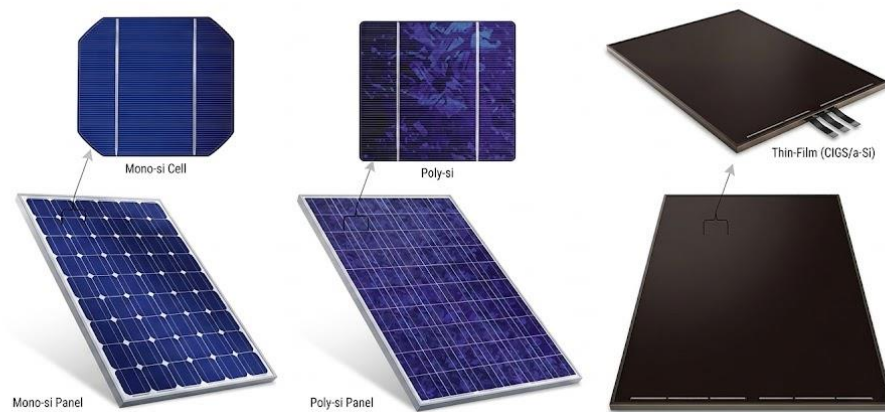


Figure 1.3 : Photos de cellules et panneaux des différentes technologies solaires : Monocristallin ; Polycristallin ; Couche mince

Tableau 1.1 : Types et propriétés des différentes technologies solaires [10]

	Monocristallin	Polycristallin	Couche mince
Avantages	Rendement supérieur. Adapté aux surfaces limitées et aux toitures.	Coût de fabrication inférieur. Meilleures performances sous hautes températures.	Efficacité préservée sous forte chaleur. Flexible et adaptable à des surfaces non planes. Prix de revient le plus bas.
Inconvénients	Coût élevé. Sensible aux ombres et aux variations thermiques.	Rendement inférieur au monocristallin.	Efficacité globalement faible. Fiabilité encore insuffisamment éprouvée.
Applications	Installations résidentielles. Systèmes connectés au réseau.	Installations résidentielles. Systèmes connectés au réseau.	Très adapté aux toitures en raison de sa flexibilité. Systèmes connectés au réseau.

1.6.2. Caractéristiques électriques d'une cellule PV

Les grandeurs électriques courant et tension disponibles aux bornes d'une cellule PV dépendent essentiellement du niveau d'irradiance reçu par la surface cellulaire ainsi que de la température ambiante, une élévation de l'éclairement se traduit par une augmentation de la puissance de sortie, tandis qu'une montée en température conduit à une réduction de la tension produite.

1.6.2.1. Courbes I-V et P-V d'une cellule photovoltaïque

Une hausse de la température T provoque un glissement des courbes I-V et P-V vers la gauche, tel que représenté aux figures 1.4.a et 1.6.c. À l'inverse, une augmentation de l'irradiance G entraîne un déplacement vers le haut de ces mêmes courbes, comme illustré aux figures 1.6.b et 1.6.d.

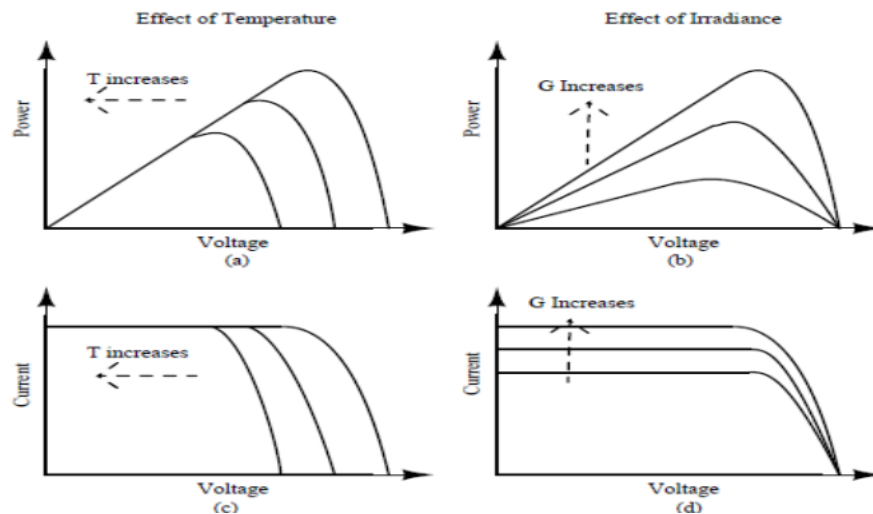


Figure 1.4 : Caractéristiques P-V d'une cellule PV lorsque : (a) T augmente ; (b) G augmente ; Caractéristiques I-V : (c) T augmente ; (d) G augmente

1.6.2.2. Caractéristiques de sortie des cellules PV

La courbe I-V d'une cellule solaire traduit son comportement électrique pour l'ensemble des charges possibles, à des conditions de température et d'irradiance données. Elle se caractérise par trois points de fonctionnement particuliers [11] représentés à la figure 1.7 :

- Courant de court-circuit (I_{cc}) : point A où la tension est nulle et le courant atteint sa valeur maximale sous ensoleillement standard.
- Tension de circuit ouvert (V_{co}) : point C où la tension est maximale et le courant est nul.

- Puissance maximale (P_{ppm}) : point B, dit point de puissance maximale (PPM), où la cellule délivre sa puissance de sortie la plus élevée, défini par les grandeurs I_{ppm} et V_{ppm} , telles que :

$$p_{ppm} = I_{ppm} \times V_{ppm} \quad (1.1)$$

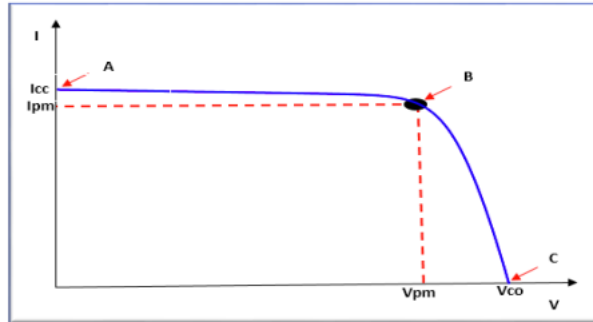


Figure 1.5 : Caractéristique électrique I-V d'une cellule PV

- Facteur de forme (FF) : rapport entre la puissance maximale délivrée et le produit $V_{co} \times I_{cc}$. Sa valeur avoisine 0,7 pour les cellules haute performance et diminue avec la température :

$$FF = \frac{V_{ppm} \times I_{ppm}}{V_{co} \times I_{cc}} \quad (1.2)$$

- Rendement de conversion (η) : fraction de la puissance lumineuse reçue effectivement transformée en énergie électrique :

$$\eta = \frac{V_{ppm} \times I_{ppm}}{E \times S} = \frac{P_{ppm}}{P_{optimale}} \quad (1.3)$$

Où E désigne le rayonnement solaire incident et S la surface active de la cellule.

1.7 Différents types de rayonnement

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol, on distingue plusieurs composantes.

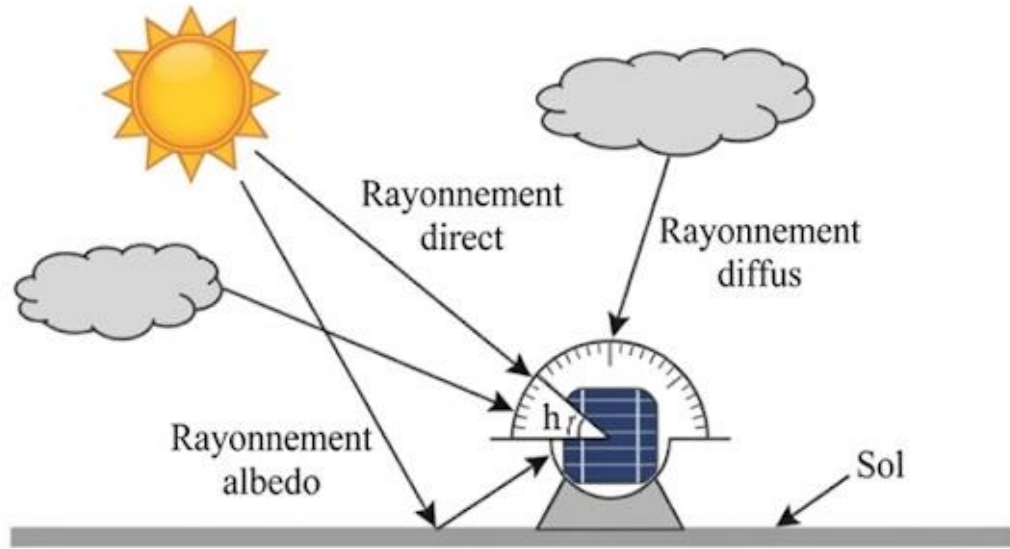


Figure 1-6 : Différents composants de rayonnement

1.7.1 Rayonnement direct

Le rayonnement direct est le rayonnement reçu directement du Soleil. Il peut être mesuré par un pyrhéliomètre.

Le rayonnement direct reçu dans le plan du capteur est

$$A_{(\alpha,\gamma)} = I \cdot \cos(i) \quad (1.4)$$

Avec : I : rayonnement direct normal

i (Angle d'incidence) : c'est l'angle entre la direction du soleil et la normale au plan, Cet angle peut être déterminé par la connaissance des cosinus directeurs du rayon incident $\vec{u}$ et la normale $\vec{n}$ en coordonnées horizontales [12]

$$\vec{n} \begin{cases} \cos(\gamma) \cdot \sin(\alpha) \\ \cos(\gamma) \cdot \cos(\alpha) \\ \sin(\gamma) \end{cases} \quad \vec{u} \begin{cases} \cos(h) \cdot \sin(a) \\ \cos(h) \cdot \cos(a) \\ \sin(h) \end{cases} \quad (1.5)$$

Cette équation peut être écrite d'une autre manière, à l'aide de l'équation des passages d'un système de coordonnées à un autre. On peut écrire l'angle d'incidence en coordonnées horaires, équation

$$\begin{cases} \sin(h) = \cos(\gamma) \cdot \cos(h) \cdot \cos(\varphi) + \sin(\delta) \cdot \sin(\varphi) \\ \sin(a) = \frac{\cos(\gamma) \cdot \cos(h)}{\cos(h)} \end{cases}$$

L'expression du rayonnement direct dépend de l'azimut du capteur α , la hauteur du capteur γ , l'angle d'incidence γ , la hauteur du soleil h , et l'angle d'inclinaison β .
Soleil à midi (azimut nul $\alpha = 0$) :

Pour un plan horizontal orienté sud ($\beta = 0 \Rightarrow \gamma = 90^\circ$, et $\alpha = 0$) suivant la figure (I-12- a) [12]

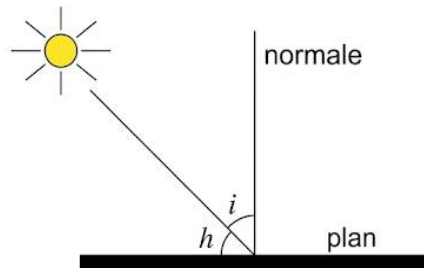


Figure 1-7-a

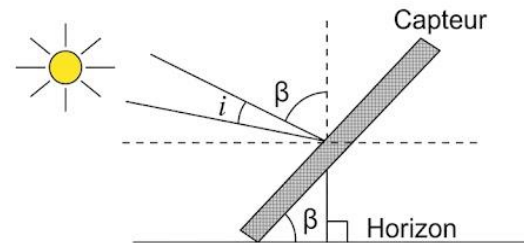


Figure 1-7-b

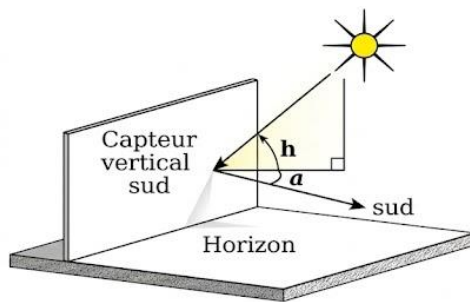


Figure 1-8-a

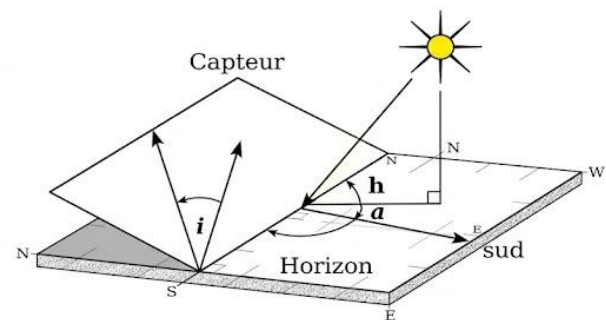


Figure 1-8-b

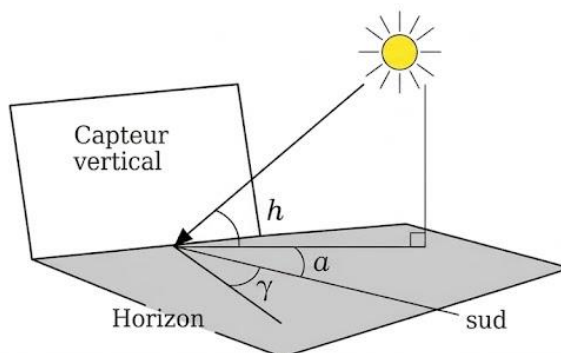


Figure 1-9-a

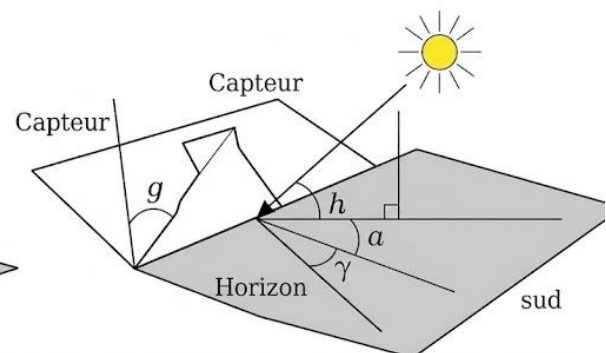


Figure 1-9-b

1.7.2 Rayonnement diffuse

Le rayonnement diffus résulte de la diffraction de la lumière par les molécules atmosphériques, et de sa réfraction par le sol, il parvient de toute la voute céleste [13].
Le rayonnement diffus (D_h) est le rayonnement émis par des obstacles (nuages, sol,

bâtiments) et provient de toutes les directions, Il peut être mesuré par un pyranomètre avec écran masquant le soleil [14].

Dans le plan du capteur le Rayonnement diffus est donné par [15]

$$D_{(a,y)} = \left(\frac{1 + \cos a}{2} \right) \cdot D_h + alb \left(\frac{1 - \cos a}{2} \right) \cdot G_h \quad (1.6)$$

Avec :

Alb: albédo (coefficient de réflexion du sol)

h: hauteur de soleil [degré]

Dh: diffus sur plan horizontal

Gh : global horizontal

Pour un plan vertical $\Rightarrow D_v = 0,5 \cdot (H_h + a \cdot G_h)$

1.7.3 L'albédo ou Réfléchi

C'est la fraction d'un rayonnement incident diffusée ou réfléchi par un obstacle. Ce terme étant généralement réservé au sol et aux nuages, c'est une valeur moyenne de leur réflecteur pour le rayonnement considéré, et pour tous les angles d'incidences possibles. Par définition, le corps noir possède un albédo nul.

$$L'albédo(alb) = \frac{\text{nergie réfléchi}}{\text{nergie reçue}}$$

1.7.4 Rayonnement global

Le rayonnement global au sol est donc fonction de la composition et de l'épaisseur de l'atmosphère traversée par les rayons lumineux au cours de la journée. Il se décompose en rayonnement direct et rayonnement diffus, et ce sont ces deux rayonnements qui sont exploités par les générateurs solaires [16].

Dans le cas d'une surface horizontale, le rayonnement global s'écrit:

$$G = I \cdot \sin(h) + D_h \quad (1.7)$$

1.8 Conclusion

Les données météorologiques concernant le rayonnement solaire ne sont généralement pas suffisantes pour pouvoir quantifier tous les phénomènes qui se produisent lorsqu'un

panneau photovoltaïque reçoit de la lumière. Une bonne connaissance du gisement solaire s'avère nécessaire.

Dans ce chapitre, nous avons présenté des notions importantes sur le gisement solaire comme les coordonnées terrestres et horaires, les temps de base et le mouvement de la terre autour de soleil. Ensuite, nous avons présenté les différents types de rayonnements (direct, diffus, albédo et global) et les expressions mathématiques de chaque rayonnement selon la variation d'inclinaison et d'orientation.

Chapitre 2

Modélisation d'un système photovoltaïque et la méthode MPPT

2 .1. Introduction

Une cellule photovoltaïque (ou photopile) est un dispositif qui transforme l'énergie lumineuse en courant électrique. La première photopile a été développée aux États-Unis en 1954 par les chercheurs du laboratoire Bell [17]. Mais en dépit de l'intérêt des scientifiques au cours des quelques années suivantes, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quitté les laboratoires. En effet, les photopiles représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites, ainsi que dans tout site isolé. Actuellement, l'objectif essentiel est devenu la production de l'électricité, sans pollution, pour l'alimentation des réseaux de distribution.

Le système photovoltaïque se compose d'un générateur électrique et de plusieurs composants électriques qui adaptent l'énergie électrique produite aux dispositifs récepteurs. La modélisation de ces systèmes, et en particulier des cellules photovoltaïques, est un élément crucial pour la conception, la simulation et l'optimisation de systèmes d'énergie solaire.

2 .2. Circuit équivalent d'une cellule solaire

La modélisation des cellules photovoltaïques passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents. Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule ainsi que les caractéristiques électriques de chaque élément. Plusieurs modèles mathématiques sont développés pour représenter un comportement fortement non linéaire, résultant de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations.

2 .2.1. Cas d'une cellule idéale

Le modèle idéal d'une cellule photovoltaïque est constitué simplement d'une source de courant en parallèle avec une diode. La source de courant représente le courant généré par l'effet photovoltaïque (I_{ph}), dont la valeur dépend de l'intensité lumineuse et des caractéristiques de la cellule. La diode idéale modélise la jonction p-n de la cellule. Dans ce modèle simplifié, on néglige les pertes internes.

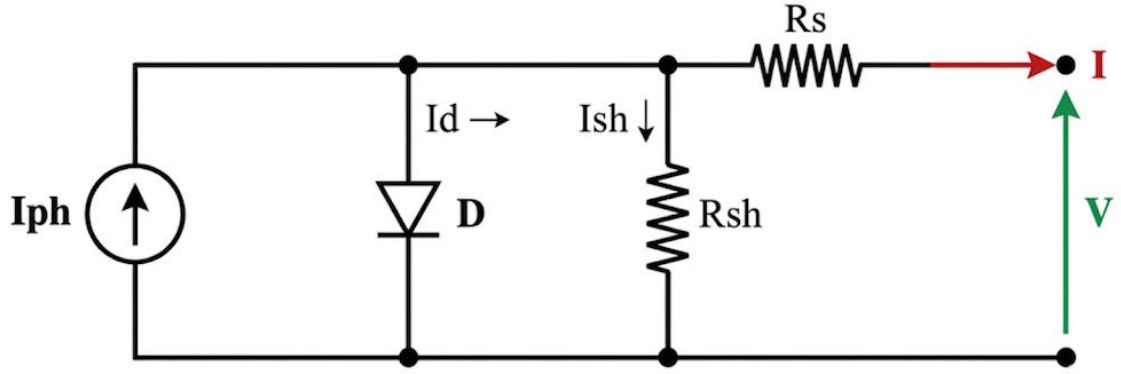


Figure 2.1 – Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale

Les équations retenues de ce modèle sont :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (2.1)$$

$$I_{ph} = I_{sc} = E/E_{ref} \quad (2.2)$$

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right) \quad (2.3)$$

$$V_t = \frac{NKT}{q} \quad (2.4)$$

Avec :

- **I** : courant fourni par la cellule (A).
- **V** : tension aux bornes de la cellule (V).
- **I_{ph}** : courant photo-généré (A).
- **I_s** : courant de saturation inverse de la diode (A).
- **q** : charge de l'électron ($1,602 \times 10^{-19}$ C).
- **k** : constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K).
- **T** : température absolue en Kelvin (K).
- **A** : facteur d'idéalité de la diode (sans dimension).

2.2.2. Cas d'une cellule réelle

Pour tenir compte des effets dissipatifs présents dans une cellule réelle, le modèle idéal est complété par l'introduction de deux résistances parasites : une résistance série (R_s) et une résistance shunt (R_{sh}), formant ainsi le modèle à une diode.

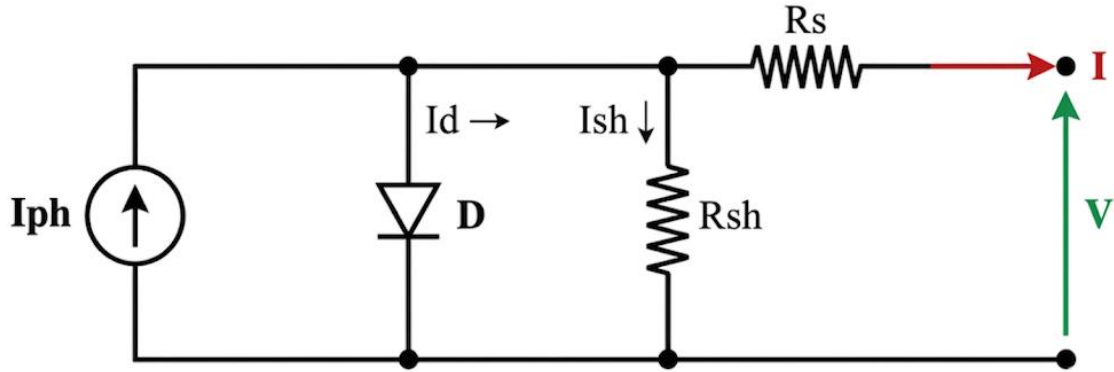


Figure. 2.2 – Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle (modèle à une diode avec R_s et R_{sh})

- **Résistance série (R_s)** : elle représente les pertes ohmiques internes dans la cellule dues à la résistance des matériaux semi-conducteurs et des contacts métalliques.
- **Résistance shunt (R_{sh})** : elle modélise les fuites de courant parasites dans la cellule au niveau de la jonction p-n.

Les équations décrivant ce modèle réel s'écrivent :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_p \quad (2.5)$$

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right) \quad (2.6)$$

$$I_0 = I_{or} \left(\frac{T}{T_n} \right)^3 e^{\left[\frac{E_g}{Bk} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right]} \quad (2.7)$$

$$V_p = V_{pv} + R_s I_{pv} \quad (2.8)$$

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{V_t}} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_p} \quad (2.9)$$

Certains auteurs expriment l'équation à l'aide de la conductance shunt $G_{sh} = 1/R_{sh}$:

Donc:

$$I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{V_t}} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_p} - I_{pv} = 0 \quad (2.10)$$

2.3. Mode de connexion du PV

Une cellule individuelle ne produisant qu'une faible tension (environ 0,6 V) et un courant limité, il est nécessaire de les associer pour augmenter la tension et le courant produits, afin d'obtenir une puissance électrique utilisable pour alimenter divers appareils ou pour l'injection dans le réseau électrique.

La connexion en série augmente la tension pour un même courant, alors que la connexion en parallèle augmente le courant pour une tension identique.

2.3.1. Association des cellules en série

Dans un groupement en série, les cellules sont connectées les unes à la suite des autres (la borne positive d'une cellule reliée à la borne négative de la suivante), de sorte que le courant circule à travers toutes les cellules en série.

La tension du panneau est la somme des tensions individuelles, tandis que le courant reste égal à celui d'une seule cellule.

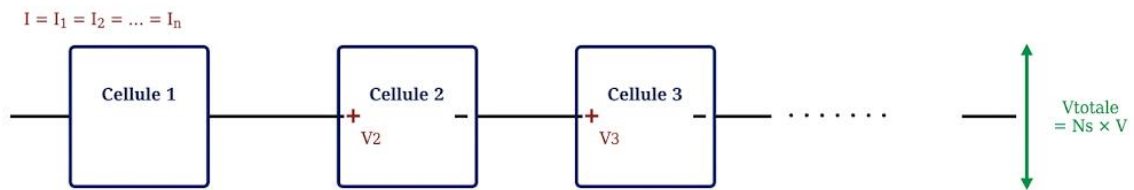


Figure. 2.3 – Association de N_s cellules photovoltaïques en série

Les équations caractéristiques de cette association sont :

$$I_{scc} = I_{cc} \quad \text{et} \quad V_{sco} = N_s \times V_{co} \quad (2.11)$$

Avec N_s le nombre de cellules en série.

2 .3.2. Association des cellules en parallèle

Dans un groupement en parallèle, les cellules sont connectées de manière à ce que toutes leurs bornes positives soient reliées entre elles et toutes leurs bornes négatives entre elles. Les courants s'ajoutent, alors que la tension reste égale à celle d'une seule cellule.

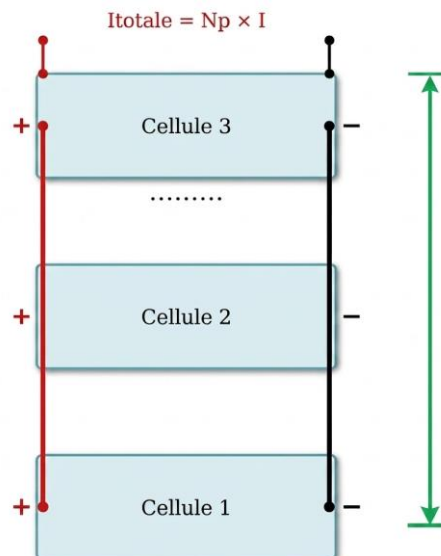


Figure. 2.4 – Association de N_p cellules photovoltaïques en parallèle

Les équations caractéristiques de cette association sont :

$$I_{pcc} = N_p \times I_{cc} \quad \text{et} \quad V_{pco} = v_{co} \quad (2.12)$$

Avec N_p le nombre de cellules en parallèle.

2 .3.3. Association mixte (série-parallèle)

Le groupement mixte est un assemblage de N_p branches de cellules photovoltaïques en parallèle, où chaque branche est l'association de N_s cellules en série. Cette configuration permet d'obtenir simultanément la tension et le courant nécessaires à l'alimentation de la charge.

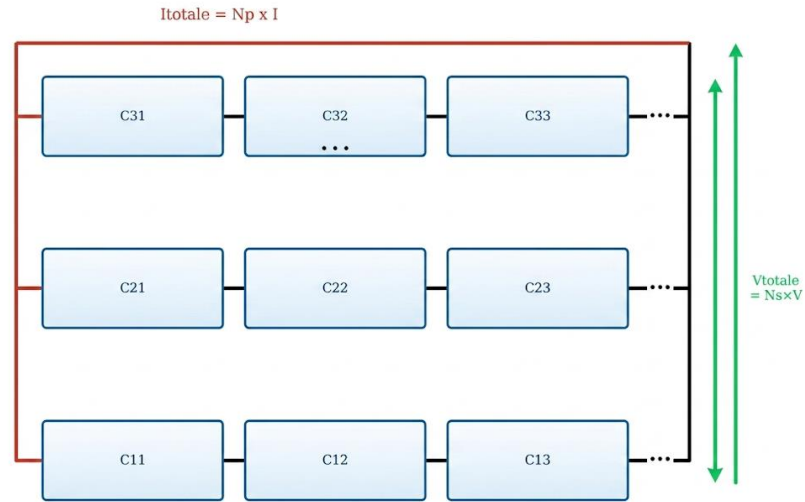


Figure 2.5 – Association mixte (N_s cellules en série $\times$ N_p branches en parallèle)

Les expressions de la tension et du courant délivrés par le groupement mixte sont :

$$V_{pv} = N_s \times V_{co} \quad (2.13)$$

$$I_{pv} = N_p \times I_{cc} \quad (2.14)$$

$$P_{pv} = N_s \times N_p \times V_{co} \times I_{cc} \quad (2.15)$$

2.4. Caractéristiques électriques du module photovoltaïque

Les caractéristiques fondamentales d'un module photovoltaïque sont représentées par les courbes courant-tension $I(V)$ et puissance-tension $P(V)$. Ces courbes sont obtenues sous des conditions standard de test (STC : $G = 1000 \text{ W/m}^2$, $T = 25^\circ\text{C}$). Elles permettent d'identifier les grandeurs caractéristiques essentielles du module : le courant de court-circuit I_{sc} , la tension en circuit ouvert V_{oc} , et le point de puissance maximale (MPP).

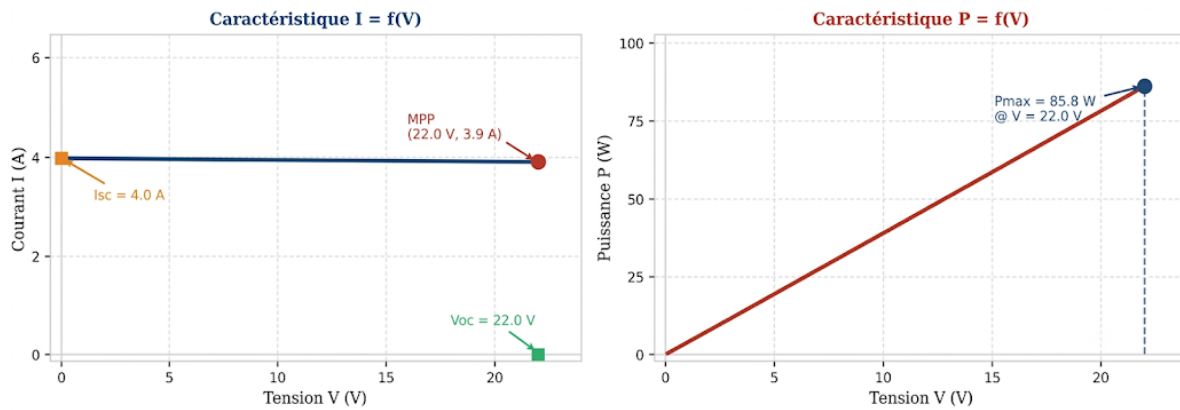


Figure. 2.6 – Caractéristiques électriques I(V) et P(V) d'un module photovoltaïque
(STC : $G = 1000 \text{ W/m}^2$, $T = 25^\circ\text{C}$)

2.5 .Les convertisseurs DC-DC (hacheurs)

Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé. Les hacheurs présentent une partie essentielle dans le dispositif de commande d'un champ photovoltaïque. Ils permettent de délivrer une tension continue variable à partir d'une source de tension continue constante [18]

2.5.1. Les type des convertisseurs DC-DC

Les convertisseurs DC-DC (ou hacheurs) sont utilisés dans les systèmes d'énergie solaire pour adapter la source continue à amplitude variable (panneau PV) à la charge qui demande en général une tension DC constante. Les trois configurations de base sont [19]:

- ❖ convertisseur survolteur (hacheur survolteur ou parallèle).
- ❖ convertisseur dévolteur (ou série).
- ❖ convertisseur dévolteur- survolteur (hacheur série-parallèle).

Dans notre travail, on se limite au convertisseur type survolteur qui est également connu sous le nom d'élévateur de tension

2.5.2. Hacheur survolteur (ou Boost)

Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie V_s est supérieure à celle de l'entrée V_e . Cette structure demande un interrupteur commandé et en parallèle avec la source, voir (Figure 2. 7). Le montage le plus simple consiste à mettre périodiquement en court circuit la résistance R pendant une durée $t = \alpha \cdot t_f$ bien déterminée ; cette mise en court-circuit est assurée par un hacheur branché en parallèle avec la résistance.

Ce hacheur comporte trois composants essentiels : Une inductance L , une capacité C et un interrupteur qui peut prendre deux états, $U=1$ et $U=0$ [20]

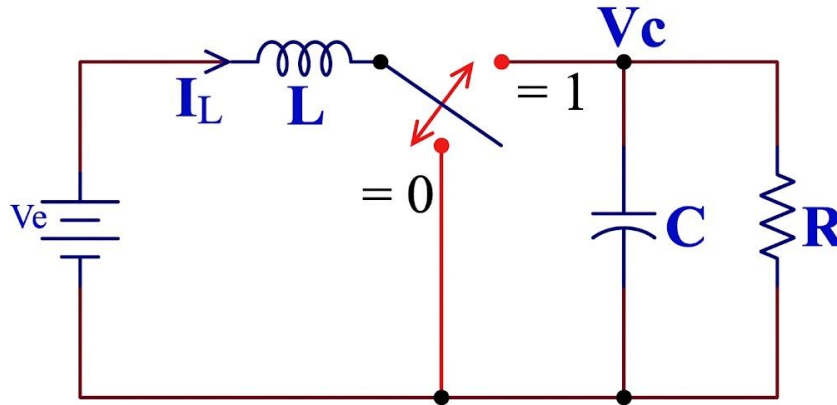


Figure 2.7: Schéma de principe d'un hacheur parallèle (boost)

Pour un rapport cyclique « α » donné, et en régime de conduction continu, la tension moyenne et le courant à la sortie sont donnés par [21].

$$V_s = \frac{V_e}{1 - \alpha} \quad (2.16)$$

$$I_s = (1 - \alpha)I_e \quad (2.17)$$

Le rapport cyclique α est compris entre 0 et 1 donc la tension de sortie V_s est nécessairement supérieure à la tension d'entrée V_e .

Les équations (2.14) et (2.15) donnent respectivement l'expression de la capacité (qui a pour rôle respectif de diminuer l'ondulation de la tension d'entrée et de sortie du convertisseur (ou de lisser)) et de l'inductance du filtre [22]

$$C = \frac{\alpha V_s}{f_s R \Delta v} \quad (2.18)$$

$$L = \frac{\alpha V_e}{f_s R \Delta i} \quad (2.19)$$

Dans ces relations :

α : le rapport de cycle.

f_s : la fréquence du mosfet.

ΔV : la limite de tension tolérable.

ΔI : la limite de courant tolérable.

R : la résistance de la charge.

On s'aperçoit que le convertisseur Boost est le sujet de nombreuses réflexions et ressort le plus fréquemment dans la littérature pour une conversion DC/DC.

En effet en prenant en compte les caractéristiques des différents convertisseurs DC/DC, le Boost, de par sa simplicité, son faible coût et son rendement élevé, est la structure retenue pour réaliser la plupart des convertisseurs DC/DC photovoltaïques.

Dans le cas où la puissance générée du générateur photovoltaïque est plus forte il faut intéresser à ce type d'hacheur pour augmenter la tension d'entrée de l'onduleur. Egalement la fréquence du MOSFET utilisée dans la littérature est généralement 50 kHz [15]. MP00

2.5.3. Etude du hacheur survolteur d'un système photovoltaïque

2.5.3.1. Représentation d'un hacheur survolteur PV

Dans ce cas, la tension d'entrée du hacheur boost représente la tension du module photovoltaïque (la Figure 2. 8)

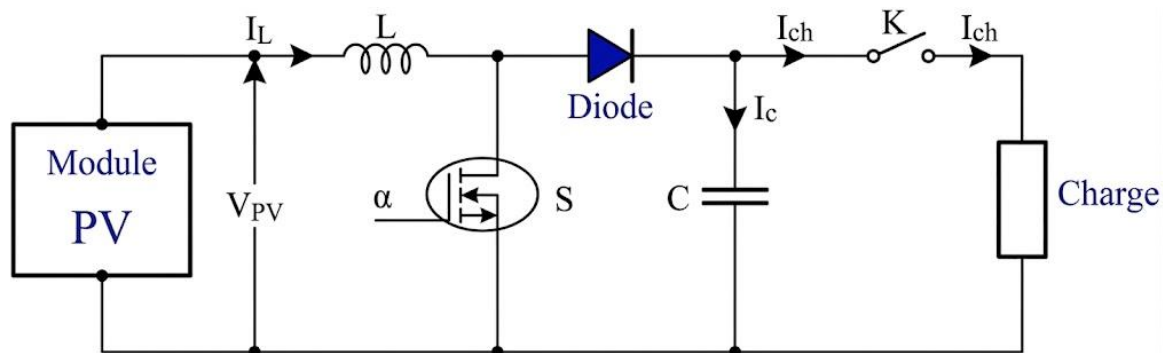


Figure 2.8: Schéma d'un hacheur parallèle (boost) raccordé au GP

L'étude qui suit est basée sur les hypothèses suivantes [23]:

- ✓ La tension d'alimentation V_{pv} est parfaitement continue et constante.
- ✓ La valeur du condensateur C est suffisamment grande afin de pouvoir considérer la tension de sortie V_s comme continue et constante.
- ✓ Les composants sont idéaux.

La résistance à la sortie du panneau PV (R_{pv}) en fonction de α et R_{ch} :

$$R_{ch} = \frac{R_{pv}}{(1 - \alpha)^2} \quad (2.20)$$

Dans les conditions optimales et pour une charge R_{ch} égale la résistance de l'entrée R_{pv} , le rapport cyclique ($\alpha = 0$)

Aussi, le rapport cyclique α s'écrit en fonction des résistances R_{pv} et R_{ch} :

$$\alpha = 1 - \sqrt{\frac{R_{pv}}{R_{ch}}} \quad (2.21)$$

Puisque le rapport α est inférieur à 1 ($\alpha < 1$) le convertisseur ne joue le rôle d'un élévateur que si la charge R_{ch} remplit la condition suivante: $R_{ch} > R_{pv}$

Les différents signaux des grandeurs de convertisseur boost sont illustrés dans la figure (2.9)

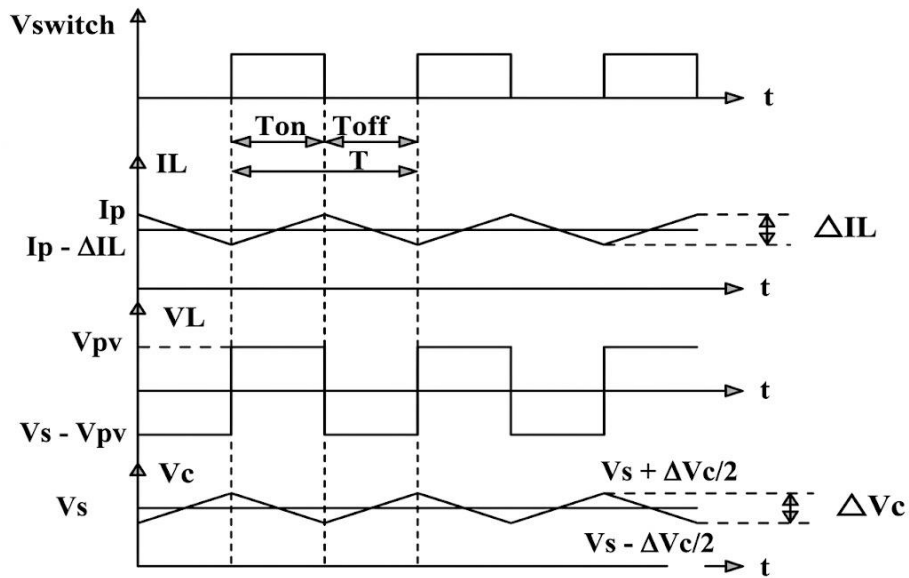


Figure 2.9: Formes typiques des ondes du convertisseur boost.

Pendant le fonctionnement du hacheur, le transistor sera commuté à une fréquence constante f_s avec un temps de fermeture $t_{on} = \alpha T_s$ et un temps d'ouvertures $t_{off} = (1 - \alpha)T_s$, où:

- $T_s = 1/f_s$: est la période de commutation.
- α : le rapport cyclique du commutateur

2.5.3.2. Modélisation d'un hacheur survolteur : [24]

La modélisation de ce convertisseur passe par l'analyse des différentes séquences de fonctionnement que nous supposons de durées fixées par la commande α

Selon l'état de l'interrupteur S, on peut distinguer deux séquences de fonctionnement :

➤ **Première séquence de conduction $[0 \text{ à } \alpha T]$** : lorsque l'interrupteur S est fermé et la diode est polarisée en inverse ($V_{\text{diode}} = -V_s$). Durant cette séquence, le courant traversant l'inductance L va augmenter linéairement et une énergie stockée dans l'inductance. La charge est totalement isolée du module PV.

➤ **Deuxième séquence de conduction $[\alpha T \text{ à } T]$** :lorsque l'interrupteur S est ouvert et la diode est fermé. Durant cette séquence, la charge est reliée directement au module PV à travers de l'inductance L

Selon sa capacité de stockage de l'énergie et la durée relative de la période de commutation, on peut distinguer trois régimes de conduction pour le hacheur

✓ La conduction continue qui correspond au cas où le courant I_L traversant l'inductance ne s'annule jamais.

✓ La conduction discontinue qui correspond au cas où le courant I_L traversant l'inductance s'annule avant la prochaine phase active

✓ La conduction critique qui définit la limite entre les deux modes de fonctionnement précédents.

Dans la suite de cette étude seulement, le régime de conduction continue est envisagé.

2.6. Commande MLI du hacheur

Le signal de contrôle de l'interrupteur S par la technique MLI (modulation de largeur d'impulsion) est le résultat de la comparaison entre le rapport cyclique α et celui généré par un générateur triangulaire, ou en dent de scie, de fréquence fixée par le fonctionnement du convertisseur comme le montre la figure (2. 10).

La génération des impulsions de commande s'effectue comme suit :

- ✓ Si $\alpha > V_{ds}$ alors $S_B = 1$, l'interrupteur S est fermé (séquence 1).
- ✓ Si $\alpha < V_{ds}$ alors $S_B = 0$, l'interrupteur S est ouvert (séquence 2).

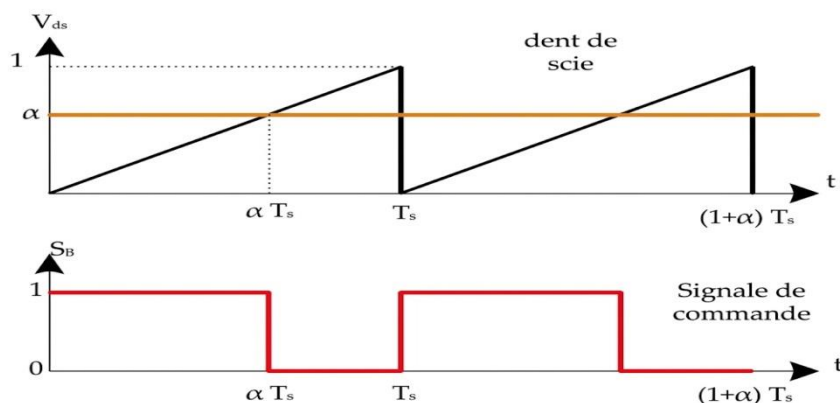


Figure 2.10: Génération des impulsions de commande du hacheur.

2.7. Technique de commande de l'MPPT

2.7.1. Définition

Dans un système photovoltaïque comprenant une source photovoltaïque et une charge, la recherche du point de fonctionnement optimal par des techniques d'optimisation représente une étape importante. Cette technique de commande est souvent nommée dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum » (Maximum Power Point Tracking, MPPT) [25]

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quelque soient les conditions météorologiques (température et irradiation), et quelle que soit la tension de la batterie, la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum.

2.7.2. Convertisseur Pour la poursuite du point de puissance maximum (MPPT)

Pour la maximisation de puissance de la source PV, en intercalant un quadripôle d'adaptation qui est un convertisseur d'énergie DC-DC entre la source PV et la charge et avec le contrôle rigoureux du rapport cyclique de ce dernier, Cette adaptation se réalise en cherchant de façon automatique le PPM du panneau PV et un suivi continu de la puissance maximale est assuré Ce type de convertisseur est destiné à adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du champ PV correspondant au point de puissance maximal. Ce système d'adaptation est couramment appelé MPPT (maximum power point tracking). Son rendement se situe entre 90 et 95% [26].

La Figure (2. 11) représente la chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque associée à une commande MPPT.

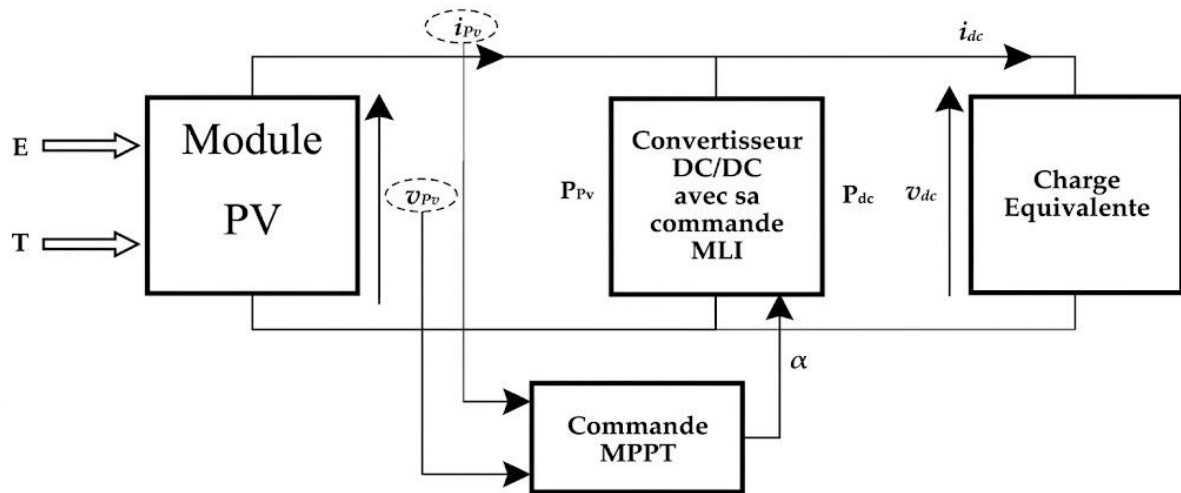


Figure 2.11: Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque associée à une commande MPPT.

On utilise le convertisseur de type DC/DC dans la partie Contrôle du système photovoltaïque car il est facile à contrôler par leurs rapports cyclique en utilisant un signal MLI. Ici, on utilise le hacheur Boost comme interface de puissance à contrôler par le régulateur MPPT, afin d'adapter la tension de sortie du hacheur à la tension requise par la charge [27].

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

En effet, ces dispositifs permettent aujourd'hui d'adapter et d'optimiser la production photovoltaïque par le biais de convertisseurs de puissance DC-DC insérés entre les modules photovoltaïques et l'entrée de l'onduleur. Généralement, ces étages disposent de commandes de gestion électrique plus ou moins complexes permettant d'adapter la tension PV à la tension d'entrée de l'onduleur [27]

2.7.3. Le principe de fonctionnement du MPPT d'un générateur PV

La commande MPPT permet de chercher le point de fonctionnement optimal du module photovoltaïque dans les conditions météorologiques variables. Ceci est basé sur la variation automatique du rapport cyclique α du signal qui commande le convertisseur d'énergie, à une valeur adéquate de manière à maximiser la puissance à la sortie du module [28].

Pour savoir l'efficacité de la technique du MPPT, on définit le rendement MPPT (η_{MPPT}) comme suit :

$$\eta_{MPPT} = \frac{P_{in}}{P_{MAX}} \quad (2.22)$$

Il donne le % de pertes de puissance d'un module PV (PIN), qui correspond à l'entrée de l'étage d'adaptation, par rapport à la fourniture de la puissance maximale qu'il pourrait produire (P_{MAX}). Pour transférer la puissance électrique produite, le mode de transfert utilisé peut présenter plus ou moins un taux de pertes lié à sa constitution. Nous définissons pour qualifier ces étages de conversion électrique-électrique et de transfert, le rendement de conversion d'un étage d'adaptation noté (η_{conv}) permettant d'évaluer les pertes liées à la conversion de puissance associée à l'étage d'adaptation.

Ce type de rendement dépend du temps et des conditions de fonctionnement. Il est nécessaire, pour obtenir une grande précision sur cette grandeur, d'effectuer les mesures de courant et de tension en entrée et en sortie de l'étage au même instant garantissant ainsi la connaissance précise du transfert de puissance effectué à un instant donné.

$$\eta_{conv} = \frac{P_{out}}{P_{pv}} \quad (2.23)$$

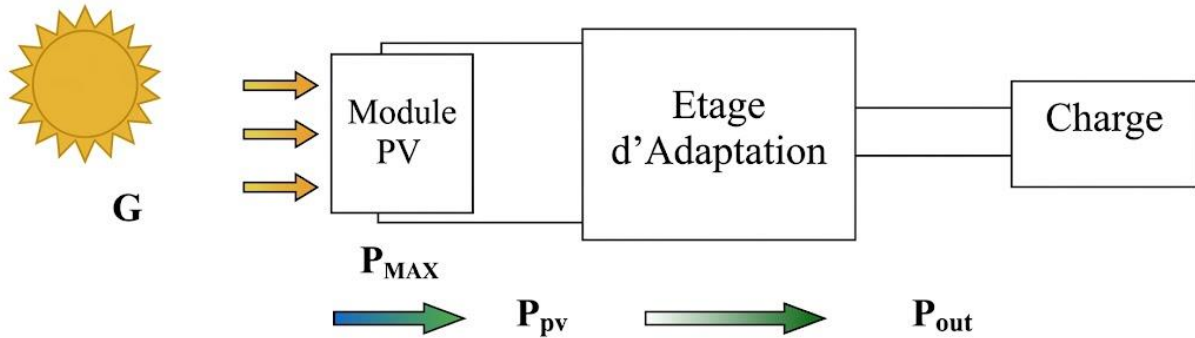


Figure 2.12: Chaîne de conversion photovoltaïque

Le rendement global de la chaîne de conversion photovoltaïque, noté (η_{total}), peut donc être défini comme le produit des trois rendements précédemment définis sur le même intervalle de temps

$$\eta_{tot} = \frac{P_{MAX}}{G \times S} \times \frac{P_{pv}}{P_{MAX}} \times \frac{P_{out}}{P_{pv}} \quad (2.24)$$

Ce rendement traduit la capacité de la totalité d'une chaîne PV à produire plus ou moins de l'énergie électrique. Cela permet également de comprendre la différence entre un rendement effectué en laboratoire sur des matériaux et des cellules PV sous température et

irradiation contrôlées et le rendement réel des GPV installés fonctionnant en conditions réelles [27]

2.7.4. Différentes techniques d'MPPT

Afin d'extraire Le maximum de puissance d'un panneau solaire, on peut raisonner sur plusieurs et différentes méthodes de commandes MPPT existent et font appel à des algorithmes plus ou moins complexes en fonction des critères de précision et de rapidité exigés.

Certains systèmes sont précis mais peu rapides, d'autres sont plus rapides mais moins efficaces, les différentes méthodes de maximisation de puissance sont classées en deux catégories: les méthodes indirectes et les méthodes directes [28].

2.7.4.1. Les méthodes indirectes

Les méthodes indirectes utilisent des bases de données regroupant les caractéristiques du champ photovoltaïque dans différentes conditions climatiques (température, ensoleillement, etc.) mais aussi des équations mathématiques empiriques permettant de déterminer le point de puissance maximum.

Ces méthodes sont souvent propres à chaque type de panneau et donc difficile à généraliser. Parmi elles, on peut citer :

- la méthode d'ajustement de courbe ;
- la méthode « look-up table » ;
- la méthode de la tension de circuit ouvert du générateur ;
- la méthode de court-circuit

2.7.4.2. Les méthodes directes

Les méthodes directes sont des méthodes qui utilisent les mesures de tension et de courant du champ et dont l'algorithme est basé sur la variation de ces mesures. L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas une connaissance préalable des caractéristiques du champ PV. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de différenciation, la méthode Perturbation & Observation (P&O) et l'incrémentation de conductance.

Chacune de ces techniques à ces propres avantages et inconvénients du point de vue simplicité, efficacité et robustesse.

Toutes ces méthodes sont présentées dans la référence [29]. Dans notre travail, on se limite à la méthode de Perturbation et observation (P&O), qui est facile, très simple à implanter, et de bon rendement.

2.7.4.2.1. Méthode Perturbation et Observation (P&O)

a. Définition

C'est l'algorithme de poursuite du PPM le plus utilisé, et comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de **V_{ref}** où en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC/DC, puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie du panneau. Si la valeur de la puissance actuelle $P(k)$ du Panneau est supérieure à la valeur précédente $P(k-1)$, alors on garde la même direction de perturbation précédente sinon on inverse la perturbation du cycle précédent.

b. Le fonctionnement de l'algorithme P&O

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension V_{pv} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{pv} qui en résulte.

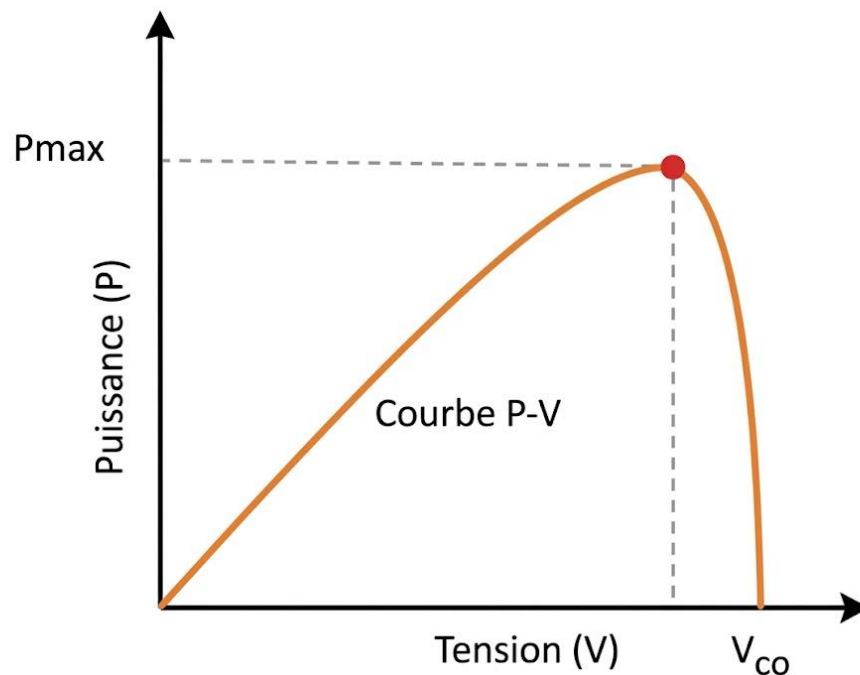


Figure 2.13: Caractéristiques de fonctionnement de la méthode de P&O.

Ainsi, comme l'illustre la **Figure (2. 13)** pour différentes zones de fonctionnement, on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre un accroissement de la puissance P_{pv} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du MPP. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le MPP. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au MPP, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande [30]. On résume cette figure dans quatre cas:

➤ **Premier cas : $\Delta P_{pv} > 0$ et $\Delta V_{pv} > 0$**

Dans ce cas le point de fonctionnement se trouve à gauche du MPP ; en plus ΔV_{pv} est positive, on est donc dans la bonne direction. Pour la prochaine itération, on augmente la tension du champ photovoltaïque. Ceci peut être réalisé par une diminution du rapport cyclique. Soit donc

$$a(k) = a(k - 1) - \Delta a \quad (2.25)$$

➤ **Deuxième cas : $\Delta P_{pv} > 0$ et $\Delta V_{pv} < 0$**

Le point de fonctionnement se trouve à droite du MPP ; en plus ΔV_{pv} est négative, la recherche du MPP se fait dans la bonne direction. On va donc pour la prochaine itération continuer à diminuer la tension (donc à augmenter le rapport cyclique). Soit donc,

$$a(k) = a(k - 1) + \Delta a \quad (2.26)$$

➤ **Troisième cas : $\Delta P_{pv} < 0$ et $\Delta V_{pv} < 0$**

Le point de fonctionnement se trouve à gauche du MPP ; et comme ΔV_{pv} est négative on se dirige dans le mauvais sens. Lors de la prochaine itération on doit corriger le sens de la recherche en augmentant la tension. Soit donc,

$$a(k) = a(k - 1) - \Delta a \quad (2.27)$$

➤ **Quatrième cas : $\Delta P_{pv} < 0$ et $\Delta V_{pv} > 0$**

Le point de fonctionnement actuel est à droite du MPP ; en plus ΔV_{pv} est positive, la recherche se fait donc dans la mauvaise direction. Pour la prochaine itération, on va diminuer la tension (donc augmenter le rapport cyclique). Soit donc:

$$a(k) = a(k - 1) + \Delta a \quad (2.28)$$

La figure (2. 14) représente l'algorithme de la commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du champ PV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du champ PV à chaque instant. Avec cet algorithme la tension de fonctionnement V_{pv} est perturbée à chaque cycle du MPPT. Dès que le MPP sera atteint, V_{pv} oscillera autour de la tension idéale V_{mpp} de fonctionnement. Ceci cause une perte de puissance qui dépend de la largeur du pas d'une perturbation simple [29]

2.8 Logique floue

La logique floue représente l'une des techniques de commande les plus appropriées pour le MPPT, suscitant un vif intérêt de la part de nombreux chercheurs au cours des dernières années.

L'avantage des contrôleurs à logique floue réside dans le fait qu'ils n'exigent aucun modèle mathématique exact et qu'ils sont capables de fonctionner de manière optimale même avec des données d'entrée imprécises. De plus, ils permettent de gérer les systèmes non linéaires et de maîtriser les systèmes instables [31].

Comme l'illustre la Fig. 6, l'architecture fondamentale de tout contrôleur à logique floue s'articule autour des étapes suivantes : la fuzzification, la base de règles, le moteur d'inférence et, enfin, la défuzzification. Dans le modèle que nous proposons, les variables d'entrée correspondent à la variation de la tension (ΔV_{pv}) et à la variation de la puissance (ΔP_{pv}) du générateur photovoltaïque. Quant à la sortie du contrôleur, il s'agit de la modification de la tension de référence (ΔV_{ref}).

Il est important de souligner qu'une grande variété de variables floues, tant en entrée qu'en sortie, peut être exploitée [32]. À titre d'exemple, la pente de la caractéristique P-V et la variation de cette pente constituent les entrées les plus fréquemment rencontrées, alors que le rapport cyclique du convertisseur sert le plus souvent de variable de sortie [33].

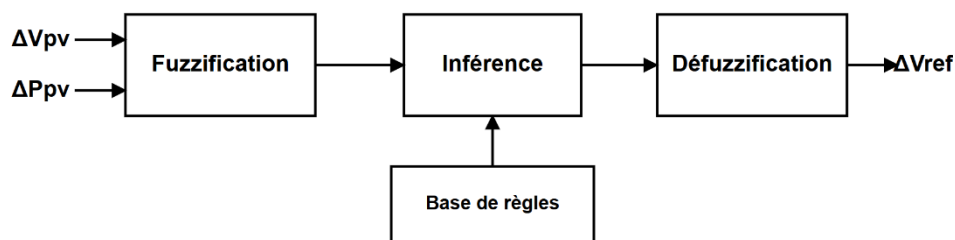


Figure 2.14: schéma du contrôleur à logique floue

Lors de l'étape de fuzzification, les variables numériques d'entrée sont converties en variables linguistiques, telles que NB (Grand Négatif), NS (Petit Négatif), ZE (Zéro), PS (Petit Positif) et PB (Grand Positif), en s'appuyant sur un sous-ensemble flou de base [34]. Chacune de ces variables est caractérisée par une fonction d'appartenance triangulaire (Fig. 10).

À titre d'alternative, l'utilisation d'une fonction d'appartenance gaussienne est également envisageable [35]–[36].

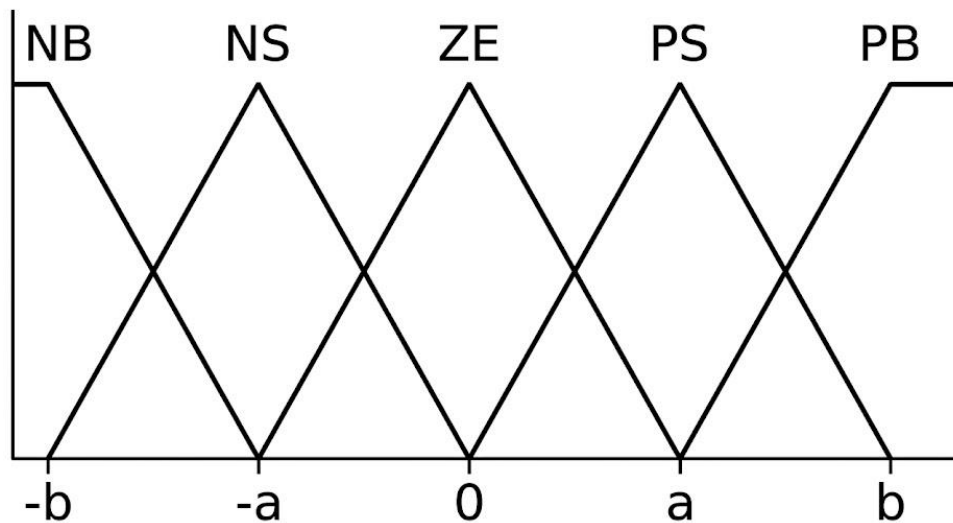


Fig. 2. 15. Fonctions d'appartenance des variables d'entrée et de sortie du contrôleur à logique floue

Le moteur d'inférence floue traite les données d'entrée en s'appuyant sur la table de règles de base (Tableau 2) afin de générer une sortie linguistique. Ensuite, l'étape de défuzzification intervient pour reconvertir cette variable de sortie linguistique en une grandeur numérique. Pour cette opération, la méthode du centre de gravité (ou centroïde), qui est la plus couramment adoptée, est utilisée.

La sortie ainsi obtenue, AV_{ref} est alors additionnée à la valeur de tension précédente dans le but d'établir la nouvelle tension du générateur. Finalement, cette nouvelle valeur de tension est réinjectée en tant qu'entrée au niveau du champ photovoltaïque.

Tableau (II,1) : Base de règles de la logique floue

CE	CE	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
E							
NB							
NB	ZB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NM	NB	NB	NB	NM	PS	ZE	PS
NS	NB	NM	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	PB	NM	PB	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PB	PB	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	ZE
PB	PB	PB	PS	PM	PB	PB	PB

2.9 Optimisation par essaim de particules (PSO):

L'algorithme PSO (Particle Swarm Optimization) figure parmi les méthodes les plus couramment employées pour la commande MPPT. Développé en 1995 par Eberhart et Kennedy, cet algorithme est largement plébiscité par la communauté scientifique en raison de sa simplicité conceptuelle et de sa facilité de mise en œuvre. Son principe de fonctionnement s'inspire directement du comportement social collectif observé dans la nature, tel que le déplacement en nuées d'oiseaux ou en bancs de poissons.

Il s'agit d'un algorithme d'optimisation globale capable de trouver la solution optimale au sein d'un espace de recherche multidimensionnel. Par conséquent, il est en mesure de poursuivre le point de puissance maximale globale (GMPP) parmi tous les optimums locaux (MPP), et ce, même lorsque le panneau photovoltaïque est soumis à des conditions d'ombrage partiel générant des pics de puissance multiples.

La méthode PSO s'appuie sur une multitude d'agents coopératifs, désignés sous le nom de particules, qui échangent des informations concernant leurs comportements de recherche respectifs. Ainsi, un certain nombre de particules évoluent dans l'espace de recherche afin d'atteindre la solution optimale. Lors de l'exploration de nouvelles solutions, chaque particule ajuste son déplacement en se basant sur sa meilleure performance personnelle ainsi que sur la meilleure solution trouvée par l'essaim [35]. Dans ce contexte d'application, la particule peut représenter soit la tension, soit le rapport cyclique du convertisseur. Afin

d'aboutir à la solution optimale, la particule s'oriente vers sa propre meilleure position historique ou vers la meilleure position de son voisinage.

La représentation mathématique de l'algorithme PSO est définie par les équations suivantes [36, 37] :

$$U_i(k+1) = qU_i(k) + c_1r_1(P_{best,i} - g_i(k)) + c_2r_2(g_{best,i} - g_i(k)) \quad (2.29)$$

$$g_i(k+1) = g_i(k) + U_i(k+1) \quad (2.30)$$

Où:

- $i = 1, 2, 3, \dots, N$: vitesse de la particule
- K : nombre d'itérations
- q : poids d'inertie (ou facteur d'inertie)
- r_1r_2 : variables aléatoires uniformément distribuées sur l'intervalle
- c_1c_2 : coefficients cognitif et social, respectivement
- $p_{best,i}$: meilleure position individuelle de la particule
- $p_{best,i}$: meilleure position globale parmi toutes les meilleures positions individuelles des particules

L'algorithme PSO détermine le point de tension maximale globale correspondant à la puissance maximale sur la caractéristique P-V. Pour ce faire, il est nécessaire d'initialiser les paramètres du PSO, tels que les valeurs de la puissance et de la tension, la taille de l'essaim, ainsi que le nombre d'itérations.

L'algorithme mémorise la meilleure performance individuelle sous l'appellation p_{best} et poursuit son processus de mise à jour itérative jusqu'à ce qu'il converge vers le point optimal global G_{best} ou qu'il satisfasse le critère de la fonction objectif [37, 38, 38] :

$$p_{best,i} = g_i(k) \quad (2.31)$$

$$f(g_i(k)) > f(g_i(k+1)) \quad (2.32)$$

où la fonction f représente la puissance de fonctionnement du module photovoltaïque. En cas d'ombrage partiel, les particules sont réinitialisées afin de rechercher le nouveau point optimal global G_{best} et ce processus doit satisfaire la condition suivante.

L'organigramme de l'algorithme PSO est illustré sur la Fig (2.16)

$$\left| \frac{P(g_i+1) - P(g_i)}{P(g_i)} \right| > \Delta P \quad (2.33)$$

La référence [40] présente un algorithme PSO pratique qui utilise une seule paire de capteurs pour contrôler plusieurs champs photovoltaïques. Cet algorithme a également été comparé à de multiples techniques conventionnelles, démontrant ainsi que l'approche proposée est plus efficace et qu'elle parvient à poursuivre le point de puissance maximale (MPP) même en présence d'ombrage partiel.

Les auteurs de la référence [41] ont, quant à eux, présenté un algorithme PSO couplé à un algorithme de distribution générale (OD). La technique OD est employée pour assurer une poursuite efficace du MPP lors de conditions d'ombrage, et a été enrichie par l'approche PSO afin d'améliorer la précision de la commande MPPT.

Une nouvelle stratégie MPPT basée sur un algorithme PSO à deux étapes est proposée dans la référence [42]. Dans ce contexte, un algorithme SFLA doté d'un facteur de vitesse adaptatif est combiné au PSO pour traiter les conditions d'ombrage partiel et obtenir une vitesse de convergence accrue. De même, pour les systèmes photovoltaïques soumis à un ombrage partiel, un algorithme PSO modifié est présenté dans la référence [30], dont l'efficacité est amplement démontrée dans l'étude.

En somme, de nombreuses recherches ont mis en œuvre le PSO comme technique MPPT, aussi bien sous un éclairage uniforme que sous des conditions d'ombrage partiel. Néanmoins, les performances du PSO standard sont souvent optimisées par le biais de l'hybridation et de la modification de l'algorithme [25, 28, 31-35], ce qui permet d'augmenter le rendement global du système et de garantir une plus grande fiabilité.

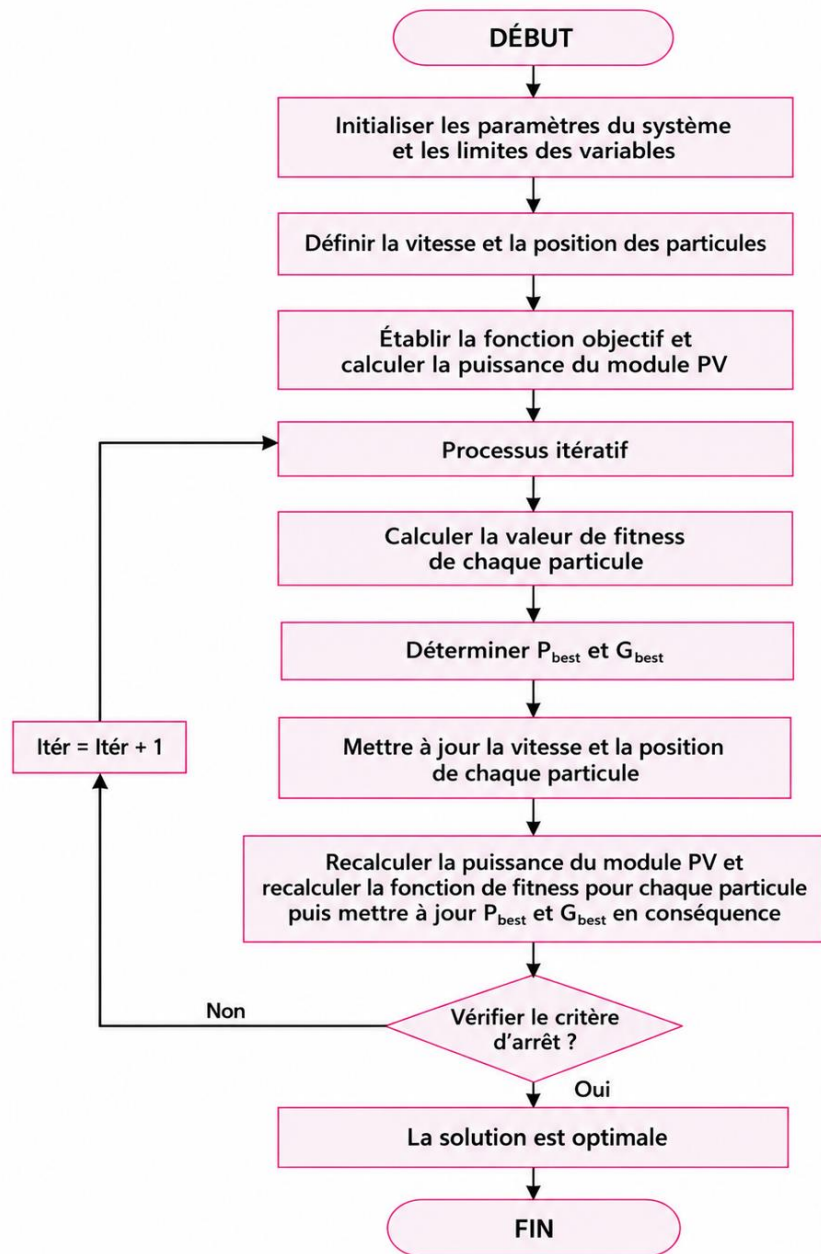


Figure. 2. 16. PSO algorithm.

2.10 Régulateur PID

Le régulateur PID (Proportionnel-Intégral-Dérivé) figure parmi les tout premiers contrôleurs industriels classiques. Il présente de multiples avantages, notamment son faible coût, sa simplicité de conception et sa facilité de réglage. Le modèle Simulink appliqué à un système non linéaire utilisant un régulateur PID conventionnel a été développé.

L'expression mathématique correspondante est définie par l'équation :

$$U(t) = K_{p,e}(t) + K_i f e(t) dt + K_d \quad (2.34)$$

Où:

- $U(t)$: Signal de commande
- $e(t)$: Erreur de poursuite (ou erreur de suivi)
- K_p : Gain proportionnel
- K_i : Gain intégral
- K_d : Gain dérivé

2.11 Conclusion

L'association de plusieurs cellules en série et/ou en parallèle donne lieu à un module photovoltaïque possédant une caractéristique courant-tension non linéaire présentant un point de puissance maximale. Nous avons présenté, dans ce chapitre, les modèles équivalents de la cellule PV idéale et réelle ainsi que les différents modes de connexion des cellules et leurs caractéristiques électriques. Ces éléments constituent le socle théorique indispensable à la modélisation et à la simulation du système étudié dans les chapitres suivants.

Chapiter .3

simulations et implémentation de commandes MPPT sur le système PV

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons l'implémentation de commandes MPPT numériques à l'aide d'une carte Arduino Méga. Les deux commandes MPPT proposées sont basées sur l'algorithme de perturbation et d'observation (P&O), InC, la logique floue et un PID basé sur l'optimisation par essaim de particules (PSO). Les résultats de simulation montrent que le contrôleur à logique floue offre de bonnes performances et est le plus efficace comparé aux algorithmes P&O, InC et PSO. Les résultats expérimentaux confirment que les algorithmes P&O et InC donnent de bons résultats.

3.2 Banc d'essai et mesures

La chaîne de conversion actuelle, qui représente notre banc d'essai, se compose d'un générateur photovoltaïque (GPV) qui alimente une charge continue via un convertisseur élévateur. Ce dernier est commandé par un contrôleur MPPT de type « P&O, InC » afin que la puissance fournie par le GPV corresponde à la puissance maximale générée. Le schéma-bloc de ce système est illustré à la Figure 3.1.

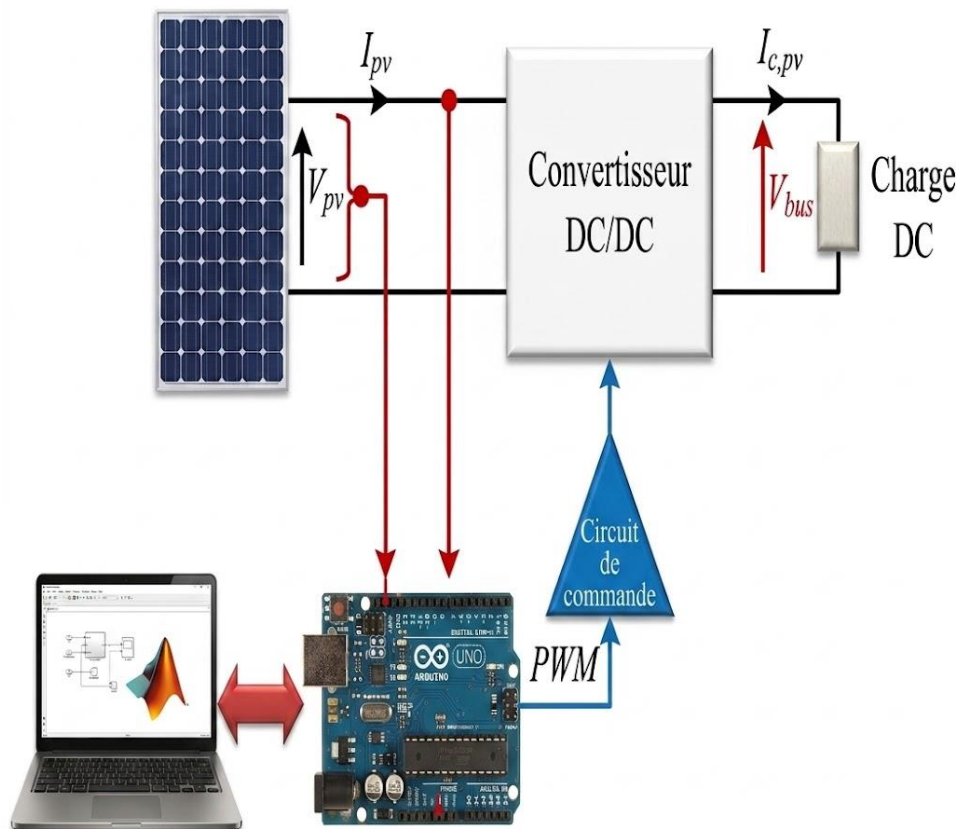


Figure 3.1. Schéma synoptique de la chaîne de conversion photovoltaïque réalisée

Le principe adopté pour ce banc d'essai consiste à acquérir le courant généré par le générateur photovoltaïque (GPV), ainsi que la tension à ses bornes (V_{pv}). Ces variables, I_{pv} et V_{pv} , sont délivrées par des capteurs de courant et de tension connectés aux entrées du convertisseur analogique-numérique intégré à une carte de type Arduino Mega 2560. Cette dernière est programmée pour fonctionner comme une carte d'acquisition, transmettant les données collectées à un ordinateur par l'intermédiaire d'un convertisseur série RS232/USB. La Fig. 9 illustre le prototype expérimental réalisé dans le but de valider les algorithmes MPPT proposés.

La Figure. 2.14 et le Tableau 3.1 répertorient les paramètres liés à la gestion du convertisseur survolteur (Boost) en fonction des grandeurs I_{pv} et V_{pv} . La Figure. 3.3 présente, quant à elle, le schéma-bloc du programme que nous avons développé sous l'environnement Matlab-Simulink. Ce dispositif nous permet de visualiser en temps réel les caractéristiques $I_{pv} = f(t)$, $V_{pv} = f(t)$, $I_{pv} = f(V_{pv})$, ainsi que l'évolution de la puissance $P_{pv} = f(V_{pv})$ du module photovoltaïque.

Tableau 3.1 : Paramètres du convertisseur survolteur

Hacheur survolteur	Valeurs
Capacité d'entrée (C_{in})	4000 μF
Inductance (L)	0.1 mH
Capacité (C)	50 μF
Charge résistive(R)	15 Ω

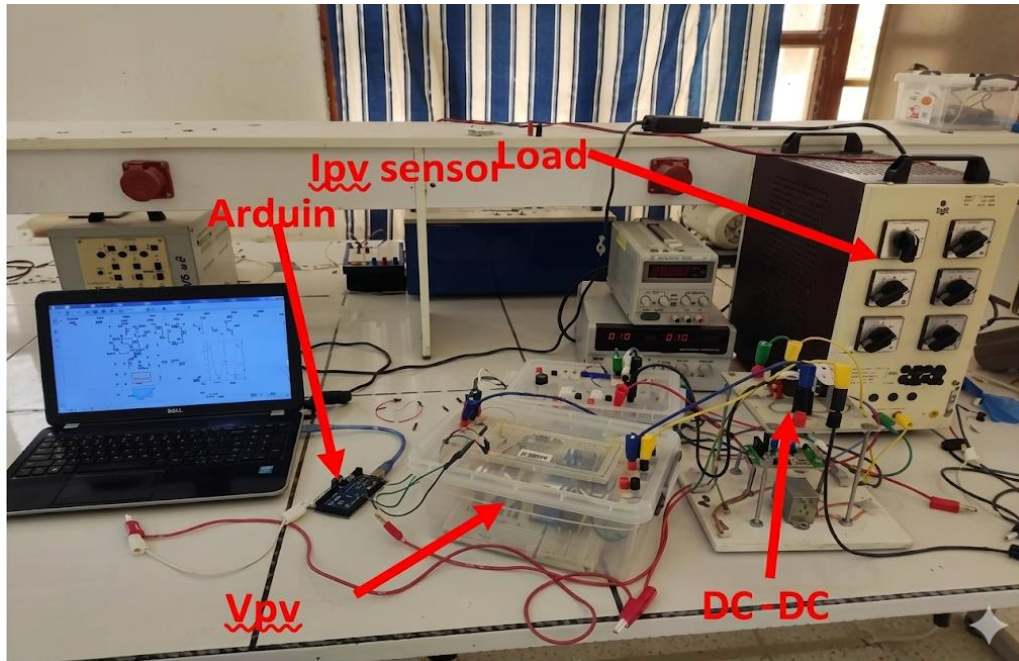


Figure 3.2 Banc d'essai expérimental

Quant à l'unité de traitement, nous avons développé, sous l'environnement Matlab-Simulink, un programme chargé de l'acquisition des données I_{pv} , V_{pv} qui serviront d'entrées aux algorithmes MPPT que nous avons élaborés. Ces algorithmes déterminent le rapport cyclique adéquat afin que la carte Arduino génère un signal PWM (Modulation de Largeur d'Impulsion - MLI). Ce dernier pilote ensuite un circuit de commande (driver) qui amplifie le courant pour commander le transistor MOSFET du convertisseur survolteur (Boost).

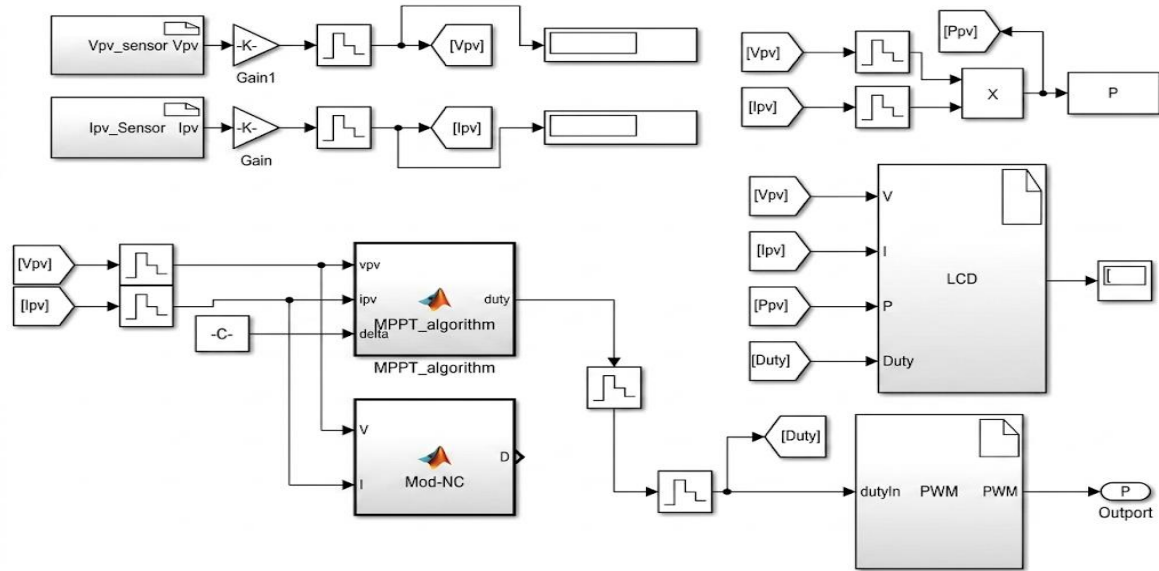


Figure. 3.3. Schéma fonctionnel d'acquisition, de traitement, de commande et de visualisation en temps réel des résultats expérimentaux.

3.3 Simulation du système

Afin de vérifier les performances des algorithmes proposés (P&O, INC, logique floue, PSO-PID), la simulation du système PV présenté à la Figure.3.5 a été développée et implémentée sous l'environnement MATLAB/Simulink®. Le champ photovoltaïque se compose d'un unique module PV (Kyocera Solar SU53BU de 53W, comme le montre la Figure 3.4), dont les caractéristiques courant-tension et puissance-tension sont illustrées dans les composants du convertisseur.

Module data		Model parameters
Module:	Kyocera Solar SU53BU	Light-generated current I_L (A)
Maximum Power (W)	53.0596	3.3853
Cells per module (Ncell)	36	Diode saturation current I_0 (A)
Open-circuit voltage V_{oc} (V)	22.1	$2.071e-08$
Short-circuit current I_{sc} (A)	3.38	Diode ideality factor
Voltage at maximum power point V_{mp} (V)	17.4	1.0349
Current at maximum power point I_{mp} (A)	3.05	Shunt resistance R_{sh} (ohms)
Temperature coefficient of V_{oc} (%/deg.C)	-0.36	209.5284
Temperature coefficient of I_{sc} (%/deg.C)	0.05	Series resistance R_s (ohms)
		0.51013

Figure 3.4. Données des caractéristiques électriques du module PV extraites de Matlab/Simulink.

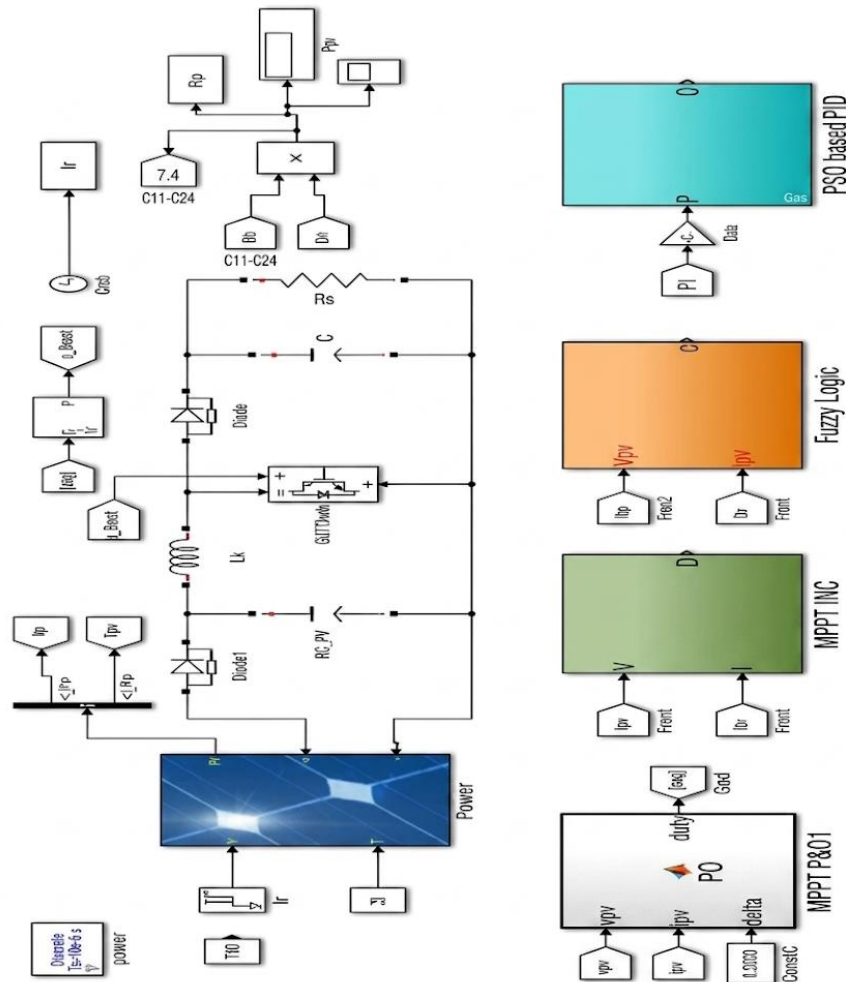


Figure. 3.5. Schéma MATLAB/Simulink du système photovoltaïque avec les méthodes MPPT étudiées.

3.3.1 Résultats de simulation :

Dans cette partie, une analyse comparative par simulation est réalisée afin de démontrer les performances des algorithmes MPPT proposés. Les études de simulation ont été menées en régime permanent et en régime dynamique, en configurant les simulations sous des conditions météorologiques identiques.

L'attention principale est portée sur la rapidité de poursuite du MPP (Point de Puissance Maximale) en régime dynamique, ainsi que sur l'ondulation de puissance causée par les oscillations autour du MPP en régime permanent.

À la Figure. 3.8, la logique floue et le PSO-PID affichent d'excellentes performances en régime permanent par rapport aux algorithmes P&O et INC. Ces deux méthodes permettent de réduire les perturbations de tension une fois le MPP atteint. Toutefois, en régime dynamique, la logique floue s'avère être la plus rapide de toutes.

3.3.2 Résultats expérimentaux

Les résultats expérimentaux de deux des algorithmes précédemment étudiés sont présentés aux figures 3.9 , 3.10 et 3.11.

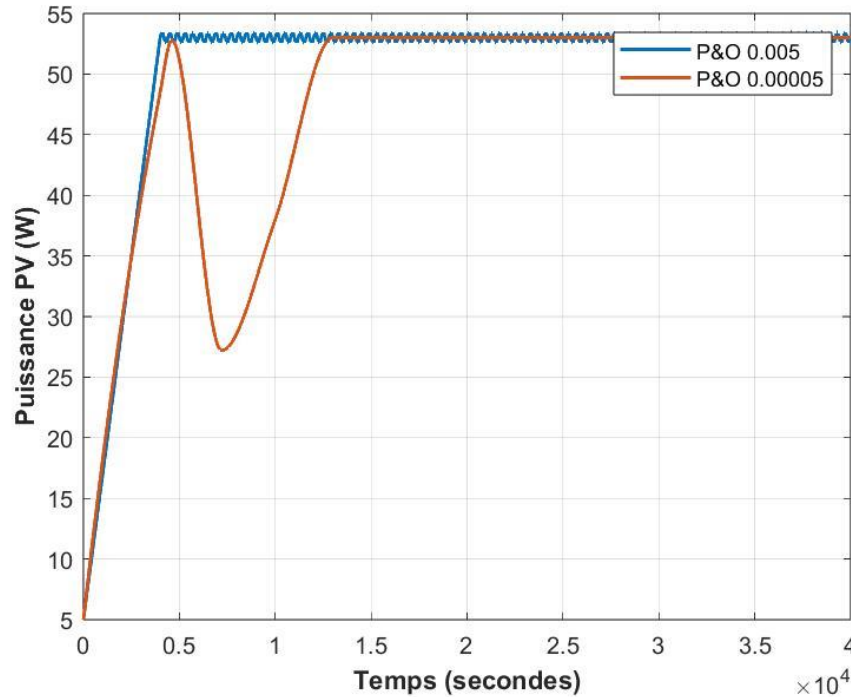


Figure. 3.6 . Puissance de sortie PV utilisant l'algorithme P&O avec un pas fixe de 0,005 et 0,00005.

D'après la figure 3.6, nous constatons que l'algorithme P&O avec un pas fixe de 0,005 présente de bonnes performances dynamiques par rapport au P&O à 0,00005 qui souffre d'un problème de dérive. Il converge plus rapidement vers le régime permanent, mais les oscillations en régime statique sont beaucoup plus importantes. Il lui faut 0,4 s pour atteindre le MPP, alors que le P&O avec un pas de 0,005 met 1,2 s pour l'atteindre, comme le montre la figure . 3.6 Les performances dynamiques de l'algorithme P&O peuvent être encore améliorées par un pas plus grand. Cependant, cela aura un effet négatif sur les performances en régime permanent.

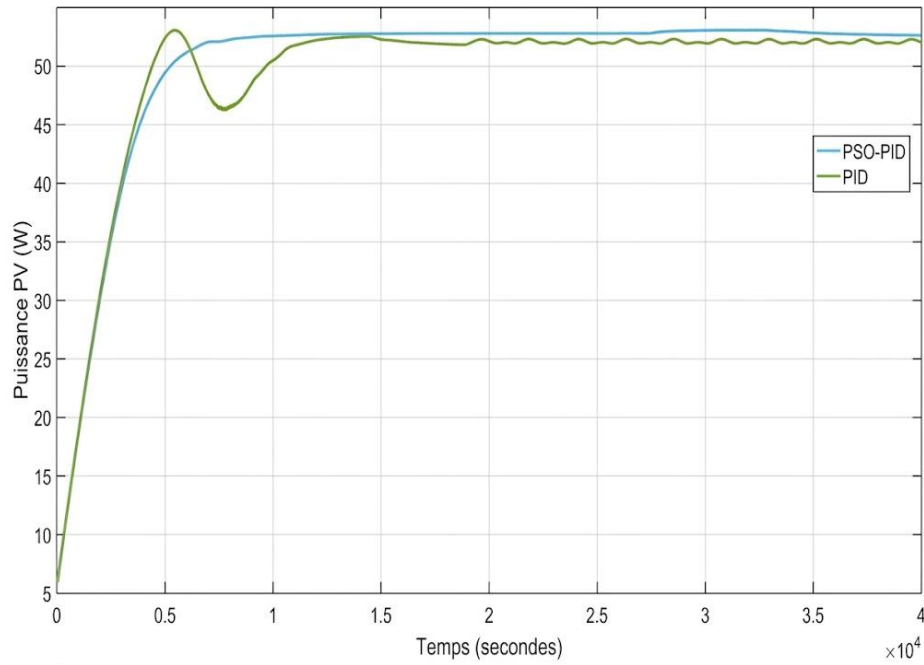


Figure. 3.7 Puissance de sortie PV utilisant le PID et le PSO-PID.

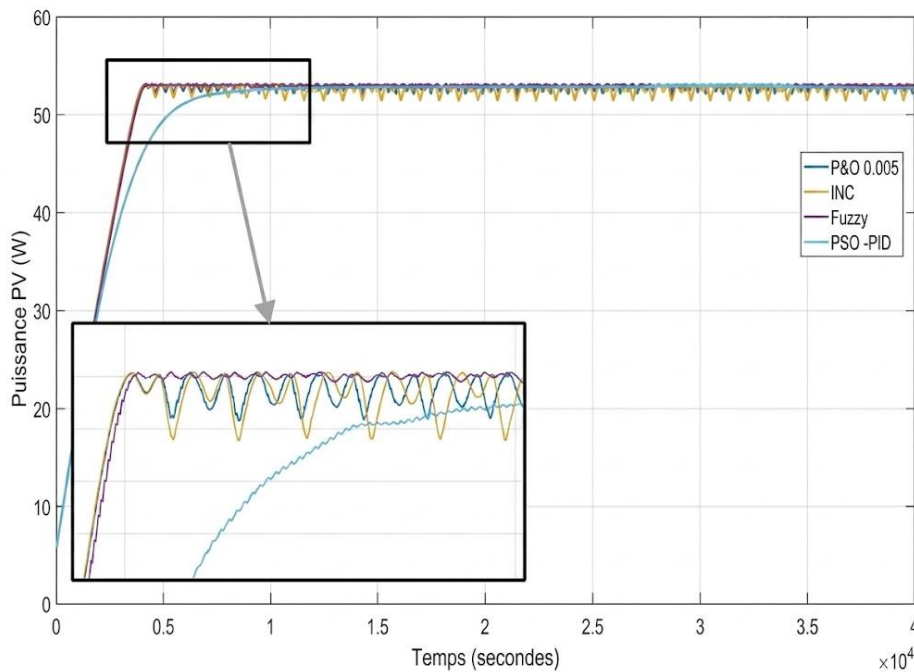


Figure. 3.8. Puissance de sortie PV pour toutes les méthodes proposées (Système photovoltaïque avec les méthodes MPPT étudiées).

Sur la figure 3.8, la logique floue et le PSO-PID affichent d'excellentes performances en régime permanent par rapport aux algorithmes P&O et INC. Ces deux méthodes permettent

de réduire les perturbations de tension une fois le MPP identifié. Toutefois, en régime dynamique, la logique floue s'avère être la plus rapide de toutes.

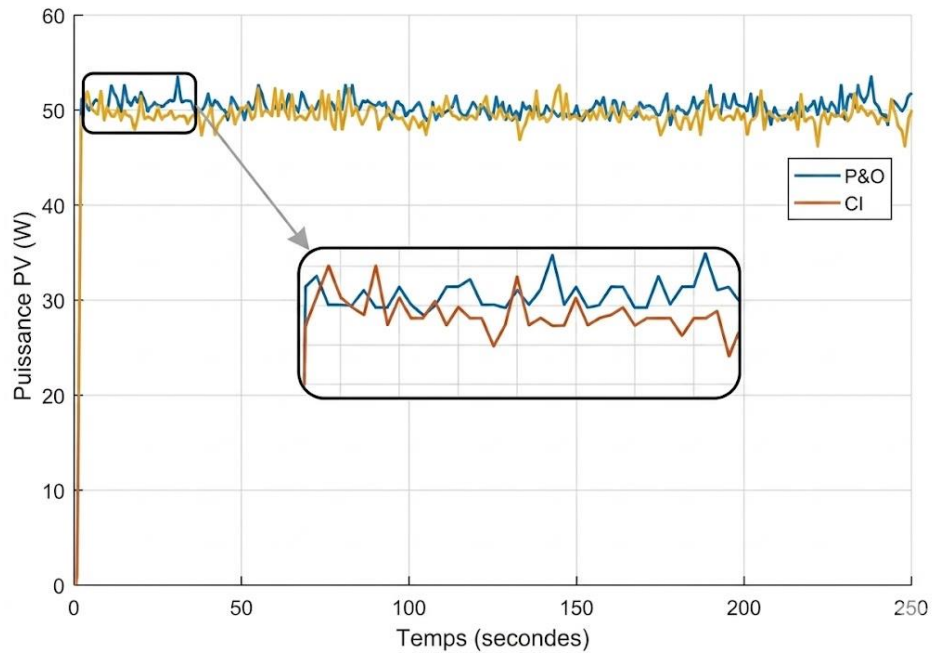


Fig. 3.9. Résultats pratiques pour une journée ensoleillée.

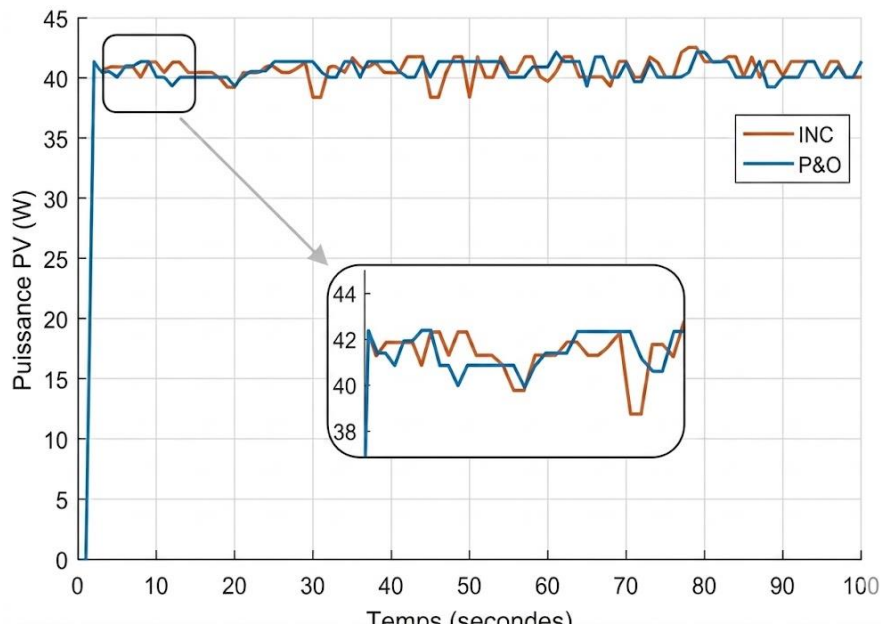


Fig. 3.10. Résultat pratique lors d'une journée nuageuse.

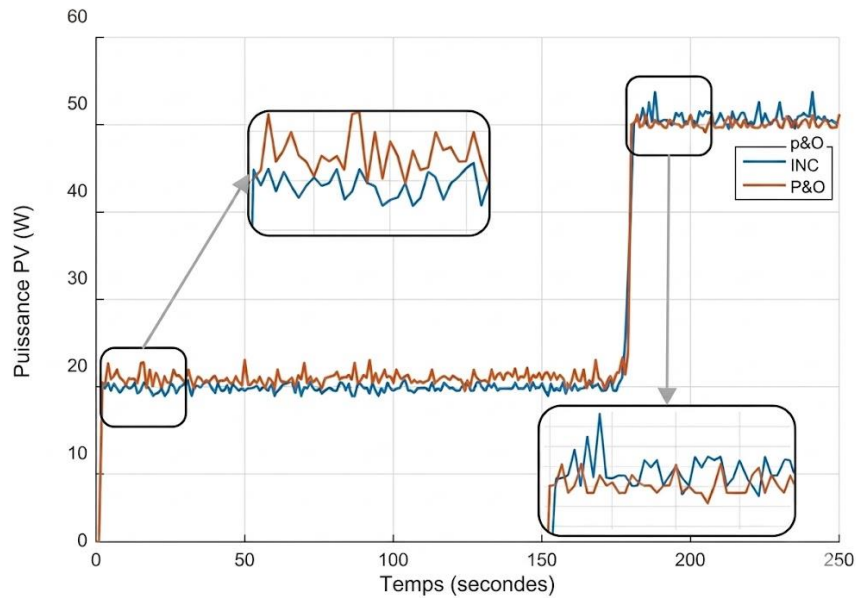


Figure. 3.11. Résultats pratiques du panneau ombragé.

Tableau 3.2. Affichage des résultats pratiques sur l'écran LCD

Résultats pour une journée ensoleillée	
Résultats pour une journée nuageuse	
Résultats pour le panneau ombragé	

Les résultats montrent que les deux algorithmes MPPT démontrent une bonne aptitude à poursuivre le MPP et à améliorer les performances du système PV lors d'une variation rapide de l'irradiation. L'algorithme P&O présente de meilleures performances dans les cas de journées ensoleillées et nuageuses. Cependant, dans le cas d'un panneau artificiellement ombragé, l'algorithme INC se révèle plus performant que le P&O. La commande assurée par ces deux algorithmes permet d'adapter le générateur photovoltaïque (GPV) à la charge en transférant la puissance maximale fournie par ce dernier.

3.4 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'implémentation et à la simulation d'un système photovoltaïque sous l'environnement Matlab/Simulink, que nous avons commandé à l'aide de différents types d'algorithmes MPPT. Il ressort de cette étude qu'avec les algorithmes proposés, le panneau PV est capable de fournir sa puissance maximale. Comme l'illustrent les résultats expérimentaux, les méthodes P&O et INC présentent des performances très proches.

Cependant, les résultats de simulation démontrent que les performances de la logique floue et du PSO-PID surpassent celles des algorithmes traditionnels. Ces méthodes avancées permettent notamment de réduire les perturbations de tension une fois le MPP identifié. Cette action garantit le maintien d'une puissance de sortie nettement plus stable comparativement aux commandes MPPT conventionnelles, où la puissance de sortie a tendance à osciller continuellement autour du point de puissance maximale

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Les travaux présentés dans ce mémoire ont porté sur la modélisation, la simulation et l'implémentation expérimentale d'un système de conversion photovoltaïque commandé par quatre algorithmes MPPT : P&O, INC, PSO-PID et Logique Floue. Parmi ces méthodes, c'est la commande par Logique Floue qui s'est imposée tout au long de cette étude comme la plus performante, la plus stable et la mieux adaptée aux contraintes réelles d'un système photovoltaïque soumis à des conditions climatiques variables.

L'algorithme P&O, bien que simple à implémenter, souffre d'une contradiction fondamentale qui limite ses performances : un pas de perturbation élevé accélère la convergence vers le MPP mais génère des oscillations permanentes importantes autour de ce point, entraînant des pertes de puissance continues. À l'inverse, un pas faible réduit ces oscillations mais ralentit considérablement la convergence et expose le système à un risque de dérive. Cette dépendance rigide au pas fixe constitue une faiblesse structurelle qui empêche P&O d'assurer simultanément rapidité et stabilité. La méthode INC partage les mêmes limitations en régime permanent et en régime dynamique. Si elle présente un léger avantage dans les situations d'ombrage partiel grâce à une meilleure évaluation du gradient de puissance, elle reste tout autant tributaire du choix du pas d'incrémentation et ne parvient pas à offrir une puissance de sortie stable sans oscillations résiduelles. Quant à l'algorithme PSO-PID, malgré sa capacité à explorer globalement l'espace de recherche, il présente un retard de convergence en régime dynamique lié à sa phase d'exploration itérative, et sa complexité d'implémentation élevée nécessite une initialisation soignée de nombreux paramètres ce qui le rend moins réactif face aux variations rapides des conditions climatiques.

La commande par Logique Floue s'est distinguée comme la méthode la plus aboutie de cette étude, et ce sur plusieurs plans complémentaires. Contrairement à P&O et INC qui appliquent une perturbation d'amplitude fixe indépendamment de la distance au MPP, le contrôleur à logique floue adapte en permanence l'amplitude de sa correction en fonction de l'état réel du système. Lorsque le point de fonctionnement est loin du MPP, la correction appliquée est grande ce qui accélère la convergence, et lorsqu'il s'en approche, la correction devient progressivement plus fine, ce qui élimine les oscillations en régime permanent. C'est précisément cette intelligence adaptative qui lui confère sa double supériorité : la plus rapide en régime dynamique et la plus stable en régime permanent. Les résultats de simulation ont clairement établi que la logique floue converge vers le MPP plus rapidement que toutes les autres méthodes étudiées lors de changements brusques d'irradiance ou de température, là

où P&O et INC subissent des pertes de puissance importantes dues à leurs oscillations continues et où PSO-PID accuse un retard lié à sa phase d'exploration itérative.

Un autre avantage décisif de la logique floue réside dans le fait qu'elle ne nécessite aucun modèle mathématique précis du système photovoltaïque. Elle fonctionne directement à partir des variables mesurées : variation de tension ΔV_{pv} et variation de puissance ΔP_{pv} et traite naturellement la non-linéarité de la caractéristique P-V sans approximation. Elle est également robuste face aux données d'entrée imprécises ou bruitées, ce qui la rend particulièrement adaptée aux conditions réelles de terrain où les capteurs présentent inévitablement des erreurs de mesure.

En définitive, la logique floue représente la méthode MPPT qui offre le meilleur compromis global entre rapidité de convergence, stabilité en régime permanent, robustesse face aux perturbations et adaptabilité aux conditions climatiques variables. Elle surmonte les deux limitations fondamentales des méthodes classiques et apporte une réponse plus intelligente et plus fiable au problème de la maximisation de puissance dans les systèmes photovoltaïques réels. En perspectives, l'hybridation de la logique floue avec le PSO pour combiner sa réactivité dynamique avec la capacité d'optimisation globale de l'essaim de particules, ainsi que son intégration dans des systèmes de microréseau intelligent associant stockage et gestion prédictive de l'énergie, constituent des axes d'amélioration naturels et prometteurs pour de futurs travaux.

Bibliographie

- [1] Alonso Corinne « Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie ». Mémoire d'habilitation à diriger les recherches, Université Paul Sabatier Toulouse III, 2003.
- [2] Ma, Shao-Chao, Jin-Hua Xu, and Ying Fan. "Characteristics and key trends of global electric vehicle technology development: A multi-method patent analysis. *Journal of Cleaner Production* 338 (2022): 130502.
- [3] Zahraoui, Younes et al. "Current Status, Scenario, and Prospective of Renewable Energy in Algeria: A Review." *Energies* 14, no. 9: 2354, 2021.
<https://doi.org/10.3390/en14092354>
- [4] Ministère de l'énergie et des mines. <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie>
- [5] M. H. Upadhyaya et al., "Recent progress and the status of dye-sensitised solar cell (DSSC) technology with state-of-the-art conversion efficiencies." *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Volume 119, 2013.
- [6] J. You, L. Dou, and K. Yoshimura, "A polymer tandem solar cell with 10.6% power conversion efficiency." *Nature Communications* 4, 1446 (2013)..
- [7] Zhou, Huanping, et al. "Interface engineering of highly efficient perovskite solar cells." *Science* 345.6196 (2014): 542–546.
- [8] C. Wang, J. Wu, J. Ekanayake, and N. Jenkins (Eds.). *Smart Electricity Distribution Networks*, CRC Press, 2017.
- [9] Helali, K. (2012). Modelisation d'une cellule photovoltaïque: étude comparative. Master en Electrotechnique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou..
- [10] Araujo, G. L., & Sanchez, E. (1982). A new method for experimental determination of the series resistance of a solar cell. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 29(10), 1511–1513.
- [11] T. Boutaba, "Contribution à la modélisation et à la commande d'un système de génération hybride Solaire-Eolien." Thèse de Doctorat, Université Abbès Laghrour, Khenchela, Algérie, 2018.
- [12] Benis Halouma, « Contribution à la modélisation du problème de Hot Spot dans les modules solaires PV occultées ». Mémoire de magister, Université Mentouri de Constantine, 2008.
- [13] Souad Saadi, « Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan ». Mémoire de magister en Physique, Université Mentouri de Constantine, 2010.

- [14] Bouden Abdmalek, « Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque ». Mémoire de magister, Université Mentouri de Constantine, 2008..
- [15] Amina Benhammou, « Optimisation d'un nouveau système de séchage solaire modulaire pour plantes aromatiques et médicinales ». Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2010..
- [16] Souad Saadi, « Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan ». Mémoire de magister en Physique, Université Mentouri de Constantine, 2010.
- [17] Chegaar, M., Ouennoughi, Z., & Hoffmann, A. (2001). A new method for evaluating illuminated solar cell parameters. *Solid-state electronics*, 45(2), 293–296..
- [18] B. Abdelkader, « Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur Triphasé par l'Approche Bond Graph ». Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif, 02/12/2009..
- [19] F. Slama, « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique ». Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas - Sétif, 01/04/2011..
- [20] B. Abdelkader, « Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur Triphasé par l'Approche Bond Graph ». Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif, 02/12/2009.
- [21] F. Slama, « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique ». Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas - Sétif, 01/04/2011.
- [22] A. Meflah, « Modélisation et commande d'une chaine de pompage photovoltaïque ». Mémoire de Magister, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen, 2011.
- [23] B. Abdelkader, « Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur Triphasé par l'Approche Bond Graph ». Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif, 02/12/2009.
- [24] A. Meflah, « Modélisation et commande d'une chaine de pompage photovoltaïque ». Mémoire de Magister, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen, 2011..
- [25] F. Slama, « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique ». Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas - Sétif, 01/04/2011.
- [26] B. Messaoud et L. M. Islam, « Commande par mode glissant des systèmes photovoltaïques ». Mémoire Master, Université Mohammed Seddik Benyahia – Jijel, 2018.
- [27] S. Diaf, « Intégration des systèmes à sources renouvelables d'énergie pour la production décentralisée d'électricité en site isolé ». Thèse de Doctorat, École Nationale Polytechnique, Alger, 2009.
- [28] G. Obeidi, « Commande des hacheurs MPPT par la logique floue ». Mémoire de Magister, École Nationale Polytechnique, Alger, 2006.

- [29] H. Rezzouk, « Simulation et implémentation d'algorithmes de recherche du point de maximum de puissance pour un système PV sur un circuit FPGA ». Mémoire de Magister, Université de Jijel, 2010.
- [30] B. Abdelkader, « Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur Triphasé par l'Approche Bond Graph ». Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif, 02/12/2009.
- [31] A. El Khateb, N. Abd Rahim, J. Selvaraj, and M. N. Uddin, "Fuzzy-logic-controller-based SEPIC converter for maximum power point tracking." *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 4, pp. 2349–2358, 2014.
- [32] M. F. N. Tajuddin, S. M. Ayob, Z. Salam, and M. S. Saad, "Evolutionary based maximum power point tracking technique using differential evolution algorithm." *Energy and Buildings*, vol. 67, pp. 245–252, 2013.
- [33] Solarex MSX60 and MSX-64 photovoltaic modules datasheet. <https://www.solarelectricsupply.com/media/custom/upload/Solarex-MSX64.pdf>
- [34] R. X. Fan, J. R. Miao, W. B. Wang, and D. Xie, "Quick MPPT method of centralized PV inverter." *Electric Machines and Control*, vol. 23, no. 7, pp. 113–119, 2019.
- [35] J. Ahmed and Z. Salam, "An improved perturb and observe (P&O) MPPT algorithm for higher efficiency." *Applied Energy*, vol. 150, pp. 97–108, 2015.
- [36] A. K. Abdelsalam et al., "High-Performance adaptive Perturb and Observe MPPT technique for photovoltaic-Based Microgrids." *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 4, pp. 1010–1021, 2011.
- [37] J. Ahmed and Z. Salam, "An improved perturb and observe (P&O) maximum power point tracking (MPPT) algorithm for higher efficiency," *Applied Energy*, vol. 150, pp. 97–108, 2015.
- [38] Vidhya K, Arfan G, Erping Z (2016) *Modelling and simulation of maximum power point tracking algorithms and review of MPPT techniques for PV applications. In: 5th international conference on electronic devices, systems and applications (ICEDSA), 6–8 Dec 2016, pp 1–4*
- [39] Babaa SE et al (2014) *Overview of maximum power point tracking control methods for PV systems. J Power Energy Eng 2:59–72*
- [40] R. X. Fan, J. R. Miao, W. B. Wang, and D. Xie, "Quick MPPT method of centralized PV inverter," *Electric Machines and Control*, vol. 23, no. 7, pp. 113–119, 2019.

- [41] N. M. A. A. Shannan, N. Z. Yahaya, and B. Singh, "Single-Diode Model and Two-Diode Model of PV Modules : A Comparison," *Proc. - 2013 IEEE Int. Conf. Control Syst. Comput. Eng. ICCSCE 2013*, pp. 210–214, 2013
- [42] M. Seyedmahmoudian et al., "Maximum power point tracking for photovoltaic systems under partial shading conditions using bat algorithm." *Sustainability*, vol. 10, no. 5, pp. 1347–1362,

