

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Filière Électronique
Spécialité Instrumentation

présenté par

Moussous Rafik

Amrane Mohamed Abderraouf

Conception et réalisation d'une commande MPPT sur microcontrôleur 32 bits à base de P&O et filtrage numérique de type RIF

Proposé par : Mr. Adnane Hassani & Mr. Mountassar Maamoun

Année Universitaire 2023-2024

REMERCIEMENT :

Nous tenons à exprimer notre plus profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire de fin d'études.

Tout d'abord, nous remercions sincèrement M. Mountassar Maamoun pour son encadrement, ses conseils avisés et son soutien constant tout au long de ce travail. Sa disponibilité et ses encouragements ont été essentiels pour mener à bien cette recherche.

Nous souhaitons également remercier monsieur le président de jury, ainsi que les membres du jury, d'avoir accepté de juger ce travail. Nous exprimons également notre reconnaissance à l'ensemble des enseignants et professeurs du département électronique, qui ont su éveiller notre curiosité et nous ont transmis des connaissances précieuses durant ces années d'études.

Nous n'oublions pas non plus nos familles, pour leur amour et leur soutien indéfectible. Merci à nos parents pour leur patience et leur compréhension, et à nos frères et sœurs pour leurs encouragements constants.

Un merci tout particulier à nos collègues et amis, ainsi qu'à toutes les personnes que nous avons pu interviewer ou consulter pour leurs précieuses informations et leur disponibilité.

DEDICACE :

Je dédie ce mémoire à mes parents, dont l'amour inconditionnel, le soutien et les encouragements constants ont été ma plus grande source de force et de motivation. Merci pour vos sacrifices et votre foi inébranlable en mes capacités.

À mon frère Zakaria et à mes sœurs Fatima Zohra, Dallel, Rima, qui m'ont accompagné tout au long de ce voyage avec leur affection, leur patience et leur soutien. Vos mots d'encouragement et votre présence bienveillante ont été d'un grand réconfort.

À Ikram Lardjane, qui m'a aidé et soutenu tout au long de cette expérience.

Et enfin, à toute la promotion Instrumentation 2024, pour les moments partagés, les défis relevés ensemble, et la solidarité qui a marqué ces années d'études. Nous avons grandi et appris ensemble, et je suis fier de faire partie de cette formidable équipe.

Merci à vous tous.

MOUSSOUS RAFIK

DEDICACE :

À celui qui a été la raison de mon existence et de ma réussite, à celui qui m'a inculqué les valeurs et la morale, à celui qui m'a appris la résilience et la persévérance, à celui qui a été mon pilier et mon soutien à chaque étape. Tu me manques énormément, Papa, mais je sens ta présence à chaque instant. Tes conseils m'ont guidé et ta force m'a donné le courage d'atteindre cette étape. Que Dieu te bénisse et te donne le repos éternel. Ce moment est le fruit de tes sacrifices et de ton soutien incommensurable, et chaque réussite est un prolongement de ton héritage précieux. À ta mémoire bien-aimée, je dédie cet accomplissement.

À ma mère, pour son amour inconditionnel, sa patience et son soutien constant tout au long de mon parcours académique.

À mon frère et mes sœurs, pour leurs encouragements et leur présence réconfortante qui ont été d'une grande aide pendant cette aventure.

À mes amis, pour leur amitié sincère, leur soutien et les moments partagés qui ont rendu cette expérience inoubliable.

Merci à vous tous pour votre amour, votre soutien et vos encouragements.

AMRANE MOHAMED ABDERRAOUF

ملخص :

تعد تقنية تعقب نقطة القدرة القصوى (MPPT) استراتيجية تحكم أساسية لتحسين القدرة التي يوفرها المولد الكهروضوئي (GPV) من خلال متابعة نقطة القدرة القصوى بالرغم من التغيرات في الظروف البيئية. تسمح تقنية MPPT بالتحكم في محول التيار المستمر (DC-DC) الذي يربط بين الحمولة والمولد الكهروضوئي لضمان توفير أقصى قدرة ممكنة للحمولة بشكل مستمر. يتناول هذا البحث تحسين أداء الأنظمة الكهروضوئية باستخدام طريقة الاضطراب والمراقبة (P&O) مع إضافة مرشح الاستجابة النبضية المحدودة (FIR). يهدف البحث إلى تقييم تأثير دمج هذا المرشح على أداء متحكم P&O وكذلك على الكفاءة الإجمالية لإنتاج الطاقة في الأنظمة الكهروضوئية. أخيراً، تم تنفيذ هذا النهج على متحكم دقيق ESP32 لإثبات جدواه وعملياته في التطبيقات الواقعية. أظهرت النتائج أن دمج مرشح FIR يحسن بشكل كبير من أداء متحكم P&O. بالمقارنة مع طريقة P&O دون ترشيح، لاحظنا زيادة في كفاءة متابعة MPPT وزيادة في الإنتاج الكلي للطاقة.

الكلمات المفتاحية: GVP؛ MPPT؛ محول DC-DC؛ الاضطراب والملاحظة (P&O)؛ FIR؛ ESP32.

RESUMER :

La MPPT, ou Maximum Power Point Tracking, est une stratégie de commande essentielle pour optimiser la puissance délivrée par un générateur photovoltaïque (GPV), en suivant le point de puissance maximale malgré les variations de conditions environnementales. La commande MPPT permet donc de piloter le convertisseur DC-DC reliant la charge et le générateur photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge. Ce mémoire explore l'amélioration des performances des systèmes PV en utilisant la méthode de Perturbe et Observe (P&O) avec l'ajout d'un filtre à réponse impulsionnelle finie (FIR). L'objectif est d'évaluer l'impact de cette intégration sur les performances du contrôleur P&O ainsi que sur l'efficacité globale de la production d'énergie dans les systèmes photovoltaïques. Enfin, cette approche est mise en œuvre sur un microcontrôleur ESP32 pour démontrer sa faisabilité et sa praticité dans des applications réelles. Les résultats obtenus montrent que l'intégration du filtre FIR améliore significativement les performances du contrôleur P&O. En comparaison avec la méthode P&O sans filtrage, nous avons observé une augmentation de l'efficacité de suivi du MPPT et une augmentation de la production d'énergie globale.

Mots clés : GVP ; MPPT ; convertisseur DC DC ; Perturbe et Observe (P&O) ; FIR, ESP32.

ABSTRACT:

MPPT, or Maximum Power Point Tracking, is an essential control strategy for optimizing the power delivered by a photovoltaic generator (PVG) by tracking the maximum power point despite variations in environmental conditions. The MPPT control thus allows for driving the DC-DC converter connecting the load and the photovoltaic generator in a way that continuously provides the maximum power to the load. This thesis explores the improvement of PV system performance using the Perturb and Observe (P&O) method with the addition of a Finite Impulse Response (FIR) filter. The objective is to evaluate the impact of this integration on the performance of the P&O controller as well as the overall efficiency of energy production in photovoltaic systems. Finally, this approach is implemented on an ESP32 microcontroller to demonstrate its feasibility and practicality in real-world applications. The results obtained show that integrating the FIR filter significantly improves the performance of the P&O controller. Compared to the P&O method without filtering, we observed an increase in MPPT tracking efficiency and an increase in overall energy production.

Keywords: PVG; MPPT; DC-DC converter; Perturb and Observe (P&O); FIR; ESP32.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1:GENERALITE SUR SYSTE ME PHOTOVOLTAÏQUE	3
1.1. INTRODUCTION.....	4
1.2. LE PHOTOVOLTAÏQUE FONCTIONNEMENT ET TECHNOLOGIES	4
1.2.1. L'EFFET PHOTOVOLTAÏQUE	4
1.2.2. CELLULE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE	5
1.2.3. TECHNOLOGIES DES CELLULES PV.....	7
1.2.3.1. <i>La cellule en silicium monocristallin</i>	7
1.2.3.2. <i>La cellule en silicium poly-cristalline</i>	7
1.2.3.3. <i>La cellule en silicium Amorphe</i>	8
1.3. GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE	8
1.3.1. LE MODULE PHOTOVOLTAÏQUE.....	8
1.3.2. ASSOCIATION DES CELLULES	9
1.3.2.1. <i>Association en série</i>	9
1.3.2.2. <i>Association parallèle</i>	9
1.3.2.3. <i>Association hybride (série parallèle)</i>	10
1.4. CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE	11
1.4.1. <i>La Tension A Circuit Ouvert (Voc)</i>	11
1.4.2. <i>Le Courant De Court-Circuit (Icc)</i>	11
1.4.3. <i>La Puissance Maximale (Pmax)</i>	12
1.4.4. <i>Le Facteur De Forme (FF)</i>	12
1.4.5. <i>Le Rendement</i>	12
1.5. INFLUENCE DE L'ECLAIREMENT ET TEMPERATURE SUR LE COMPORTEMENT DU MODULE PV	12
1.5.1. <i>Influence De L'éclairnement</i>	12
1.5.2. <i>Influence De Température</i>	13
1.6. LES CONVERTISSEURS DC-DC.....	14
1.6.1. TYPE DE CONVERTISSEUR DC-DC.....	15
1.6.1.1. <i>Hacheur série (Buck)</i>	15
1.6.1.2. <i>Hacheur parallèle (Boost)</i>	16
1.6.1.3. <i>Le convertisseur Buck- Boost</i>	18
1.7. LA COMMANDE MPPT	20
1.7.1. DEFINITION DE MPPT	20
1.7.2. PRINCIPE DE MPPT.....	20
1.7.3. METHODES DE COMMANDE MPPT	21
1.7.4. LES DIFFERENTS ALGORITHMES MPPT	22
1.7.4.1. <i>La méthode de la tension de circuit ouvert du générateur (Voc)</i>	22
1.7.4.2. <i>La méthode de court-circuit (Icc)</i>	22
1.7.4.3. <i>La méthode Incremental Conductance</i>	23
1.7.4.4. <i>La méthode P&O (Perturb and Observe)</i>	26
1.8. CONCLUSION.....	28
CHAPITRE 2 : SYNTHESE ET SIMULATION D'UNE COMMANDE MPPT P&O	29
2.1. INTRODUCTION.....	30
2.2. MATLAB & SIMULINK.....	30

2.3.	IMPLEMENTATION D'UNE COMMANDE MPPT P&O DE BASE SUR MATLAB SIMULINK	31
2.3.1.	LE PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE	31
2.3.2.	LE CONVERTISSEUR ELEVATEUR (BOOST)	32
2.3.3.	CONTROLEUR PWM	33
2.3.4.	LE SCHEMA DE LA COMMANDE P&O SUR MATLAB SIMULINK	33
2.3.5.	RESULTAT ET INTERPRETATION	34
2.4.	SYNTHESE D'UN FITRE FIR	38
2.5.	IMPLEMENTATION D'UNE COMMANDE P&O AVEC UN FILTRE FIR SUR MATLAB SIMULINK.....	40
2.5.1.	SYNTHESE D'UNE COMMANDE P&O AVEC FILTRAGE FIR.....	40
2.5.2.	CONCEPTION DES COEFFICIENTS ET LE FILTRE FIR	41
2.5.3.	LE SCHEMA DU SYSTEME PV AVEC LA COMMANDE P&O AVEC FILTRAGE FIR SUR SIMULINK.....	42
2.5.4.	RESULTAT ET INTERPRETATION	42
2.5.5.	COMPARAISON DES RESULTATS AVEC ET SANS FILTRE	46
2.6.	CONCLUSION.....	47
CHAPITRE 3 : IMPLEMENTATION ET TEST DE COMMANDE P&O SUR ESP32		48
3.1.	INTRODUCTION.....	49
3.2.	ÉTAPES DE REALISATION ET IMPLEMENTATION	49
3.2.1.	EMULATEUR PV	49
3.2.2.	MICROCONTROLEUR WEMOS D1 R32 ESP32.....	50
3.2.3.	CONVERTISSEUR DC/DC DE TYPE BUCK XL4015.....	51
3.2.4.	CIRCUIT ADAPTATION DC-DC ET DE MESURE	57
3.2.5.	CHARGE DU SYSTEME : LED 10W 9V-12V PLUS MCC 12V (VENTILATEUR)	61
3.3.	IMPLEMENTAION ET TEST DE LA COMMANDE P&O DE BASE SUR SYSTEME PV.....	62
3.3.1.	RESULTATS ET INTERPRETATION	63
3.4.	IMPLEMENTAION ET TEST DE LA COMMANDE P&O AVEC FILTRE FIR SUR SYSTEME PV.....	66
3.4.1.	RESULTATS ET INTERPRETATIONS	66
3.4.2.	COMPARAISON DES RESULTATS AVEC ET SANS FILTRE	69
3.5.	CONCLUSION.....	70
CONCLUSION GENERALE		71
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES		72

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE 1: GENERALITE SUR SYSTE ME PHOTOVOLTAÏQUE

FIGURE (1- 1): LE PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE CELLULE SOLAIRE	5
FIGURE (1- 2): SCHEMA EQUIVALENT D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE.....	6
FIGURE (1- 3): INFLUENCE DES RESISTANCES SERIE ET SHUNT SUR LA CARACTERISTIQUE COURANT-TENSION D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE [3].	7
FIGURE (1- 4): LES TYPES DES CELLULES PV.....	8
FIGURE (1- 5): COMPOSITION DU MODULE PHOTOVOLTAÏQUE.....	9
FIGURE (1- 6): CARACTERISTIQUE RESULTANTE D'UN GROUPEMENT EN SERIE DE NS CELLULES IDENTIQUES	9
FIGURE (1- 7): CARACTERISTIQUES RESULTANT D'UN GROUPEMENT DE NP CELLULES EN PARALLELE.	10
FIGURE (1- 8): CARACTERISTIQUES RESULTANT D'UN GROUPEMENT DE Ns ET NP CELLULES [8].....	10
FIGURE (1- 9): CARACTERISTIQUE COURANT-TENSION D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE [3].....	11
FIGURE (1- 10) : INFLUENCE DE L'ECLAIREMENT (B) ET DE LA TEMPERATURE (A) SUR $I = f(V)$ ET $P = f(V)$	13
FIGURE (1- 11): PRINCIPE DE BASE D'UN CONVERTISSEUR DC-DC [10].....	14
FIGURE (1- 12): SCHEMA D'UN HACHEUR SERIE (BUCK) [12].....	15
FIGURE (1- 13): SCHEMA EQUIVALENT DU HACHEUR SERIE (BUCK) A L'ETAT PASSANT [12].	16
FIGURE (1- 14): SCHEMA EQUIVALENT DU HACHEUR (BUCK) A L'ETAT BLOQUE [12].	16
FIGURE (1- 15): SCHEMA D'UN HACHEUR PARALLELE (BOOST).	17
FIGURE (1- 16): SCHEMA D'UN HACHEUR PARALLELE (BOOST) A L'ETAT PASSANT.	17
FIGURE (1- 17): SCHEMA D'UN HACHEUR PARALLELE (BOOST) A L'ETAT BLOQUE.	18
FIGURE (1- 18): SCHEMA D'UN HACHEUR BUCK-BOOST.	19
FIGURE (1- 19):SCHEMA D'UN HACHEUR SERIE-PARALLELE (BUCK-BOOST) A L'ETAT PASSANT.	19
FIGURE (1- 20): SCHEMA D'UN HACHEUR SERIE-PARALLELE (BUCK-BOOST) A L'ETAT BLOQUE.....	20
FIGURE (1- 21): CHAINE ELEMENTAIRE DE CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE AVEC ETAGE D'ADAPTATION DC-DC CONTROLE PAR UNE COMMANDE MPPT SUR CHARGE DC.	21
FIGURE (1- 22): POSITIONNEMENT DU POINT DE FONCTIONNEMENT SUIVANT LE SIGNE DE LA DERIVEE DE LA CONDUCTANCE G ET DE LA PUISSANCE P.....	24
FIGURE (1- 23): L'ORGANIGRAMME DE LA METHODE LA CONDUCTANCE INCREMENTALE.....	25
FIGURE (1- 24): RECHERCHE DU MPP PAR LA METHODE (P&O).	26
FIGURE (1- 25): L'ORGANIGRAMME DE LA METHODE P&O.....	27

CHAPITRE 2: SYNTHESE ET SIMULATION D'UNE COMMANDE MPPT P&O

FIGURE (2- 1): MODELE PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE SUR SIMULINK.	31
FIGURE (2- 2): CARACTERISTIQUES I-V ET P-V DU MODULE PV UTILISE.	32
FIGURE (2- 3): MODELE BOOST SUR SIMULINK.	33
FIGURE (2- 4): SCHEMA DE LA COMMANDE P&O SUR MATLAB SIMULINK.....	33
FIGURE (2- 5): LA VARIATION DE LA TENSION (V) EN FONCTION DU TEMPS (s).	34
FIGURE (2- 6): LA VARIATION DU COURANT (A) EN FONCTION DU TEMPS (s).	35
FIGURE (2- 7): LA VARIATION DE LA PUISSANCE (W) EN FONCTION DU TEMPS (s).	36
FIGURE (2- 8): LA VARIATION DU RAPPORT CYCLIQUE EN FONCTION DU TEMPS (s).	37
FIGURE (2- 9): REALISATION DIRECTE DE TYPE 1 D'UN FILTRE FIR.	39
FIGURE (2- 10): ORGANIGRAMME DE L'ALGORITHME P&O AVEC UN FILTRE.	40
FIGURE (2- 11): LE SCHEMA SIMULINK DU SYSTEME PV AVEC LA COMMANDE P&O AVEC FILTRAGE FIR.	42
FIGURE (2- 12): LA VARIATION DE COURANT FILTREE (A) EN FONCTION DU TEMPS (s).....	42
FIGURE (2- 13): LA VARIATION DE LA TENSION FILTREE (V) EN FONCTION DU TEMPS (s).....	43
FIGURE (2- 14): LA VARIATION DE LA PUISSANCE FILTREE (W) EN FONCTION DU TEMPS (s).....	44
FIGURE (2- 15): LA VARIATION DE RAPPORT CYCLIQUE EN FONCTION DU TEMPS (s).....	45
FIGURE (2- 16): VARIATION DE LA PUISSANCE (WATT) EN FONCTION DU TEMPS (S) AVEC ET SANS FILTRE.	46

CHAPITRE 3: IMPLEMENTATION ET TEST DE COMMANDE P&O SUR ESP32

FIGURE (3- 1): SCHEMA DE EMULATEUR PV.	50
FIGURE (3- 2):DESCRIPTION DE LA CARTE ESP32.	51
FIGURE (3- 3): SCHEMA FONCTIONNEL DE CONVERTISSEUR BUCK XL4015.....	52
FIGURE (3- 4): CONFIGURATIONS DES BROCHES DE BUCK XL4015.	52
FIGURE (3- 5): SCHEMA FONCTIONNEL DE BUCK XL4015.....	53
FIGURE (3- 6): SCHEMA DE CONVERTISSEUR XL4015E1 DANS LE CAS FIXE.....	54
FIGURE (3- 7): SCHEMA DE CONVERTISSEUR XL4015E1 DANS LE CAS VARIABLE.....	55
FIGURE (3- 8): MONTRE LA RELATION ENTRE VFB ET VOUT.....	56
FIGURE (3- 9): CIRCUIT D'ADAPTATION DE CONVERTISSEUR DC-DC.....	57
FIGURE (3- 10): CIRCUIT DE MESURE DE TENSION (VPV).....	58
FIGURE (3- 11): CIRCUIT DE MESURE DE COURANT (IPV).....	60
FIGURE (3- 12): CIRCUIT FINAL D'ADAPTATION ET DE MESURE COURANT ET TENSION AVEC REGULATEUR DE TENSION.....	61
FIGURE (3- 13): LA CHARGE DU SYSTEME PV (A) L'AMPOULE LED 10W (B) VENTILATEUR 12V.....	62
FIGURE (3- 14): SCHEMA FINAL DE REALISATION DE SYSTEME PV AVEC P&O.....	62
FIGURE (3- 15): LA VARIATION DE LA TENSION (V) EN FONCTION DU TEMPS (s).	63
FIGURE (3- 16): LA VARIATION DU COURANT (A) EN FONCTION DU TEMPS (s).	64
FIGURE (3- 17): LA VARIATION DE LA PUISSANCE (W) EN FONCTION DU TEMPS (s).	64
FIGURE (3- 18): LA VARIATION DE RAPPORT CYCLIQUE (D) EN FONCTION DU TEMPS (s).	65
FIGURE (3- 19): SCHEMA FINAL DE REALISATION DE SYSTEME PV AVEC P&O AVEC FILTRE FIR.....	66
FIGURE (3- 20): LA VARIATION DE LA TENSION VPV AVEC FILTRE FIR EN FONCTION DU TEMPS (s).	66
FIGURE (3- 21): LA VARIATION DU COURANT IPV AVEC FILTRE FIR EN FONCTION DU TEMPS (s).	67
FIGURE (3- 22): LA VARIATION DE LA PUISSANCE PPV AVEC FILTRE FIR EN FONCTION DU TEMPS (s).	68
FIGURE (3- 23): LA VARIATION DE RAPPORT CYCLIQUE AVEC FILTRE FIR EN FONCTION DU TEMPS (s).	68
FIGURE (3- 24): VARIATION DE LA PUISSANCE (WATT) EN FONCTION DU TEMPS (s) AVEC ET SANS FILTRE.....	69

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE 2: SYNTHÈSE ET SIMULATION D'UNE COMMANDE MPPT P&O

TABLEAU (2- 1): CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES DU MODULE PV.	31
TABLEAU (2- 2): LES VALEURS DES COMPOSANTS DU CONVERTISSEUR BOOST.....	32
TABLEAU (2- 3): LES PARAMETRES CHOISI DE REGULATEUR DE CHARGE PWM.	33
TABLEAU (2- 4):COMPARAISON LE RENDEMENT DE PUISSANCE DE COMMANDE P&O AVEC ET SANS FILTRE.	46

CHAPITRE 3: IMPLEMENTATION ET TEST DE COMMANDE P&O SUR ESP32

TABLEAU (3- 1): DESCRIPTION DES BROCHES.	53
TABLEAU (3- 2): COMPARAISON LE RENDEMENT DE PUISSANCE DE COMMANDE P&O AVEC ET SANS FILTRE.....	70

LISTE DES ABREVIATIONS

C-IN: Capacité – Entrée.

C-OUT: Capacité – Sortie.

D: rapport cyclique.

DC-DC: Convertisseur courant continu à courant continu.

EVA: Éthylène-Acétate de Vinyle.

ESP-32: Microcontrôleur ESP32.

E : Eclairage solaire.

FIR: Finite Impulse Response (filtre à réponse impulsionnelle finie).

FB: Feedback.

FF: Facteur de forme.

G: conductance.

GPV: Générateur Photovoltaïque.

I: courant (A).

ICC: Courant de Court-Circuit.

IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor.

INC-CON: Incremental Conductance.

IIR: Infinite Impulse Response.

I_{ph}: courant de photopile.

IPV: courant Photovoltaïque.

L: Inductance.

MPP: Point de Puissance Maximale.

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

NP: Nombre de Cellules en Parallèle.

NS: Nombre de Cellules en Série.

P: puissance (W).

P_{MAX}: Puissance Maximale.

PN: La jonction.

P&O: Perturb and Observe (méthode de contrôle).

PWM: Pulse Width Modulation (modulation de largeur d'impulsion).

PV: Panneau photovoltaïque.

R_{ch}: Résistance de la charge.

R_s: résistance série.

R_{sh}: résistance shunt.

T : Température.

V_{Fpv}: tension filtrée.

V_{CO}: Tension de Circuit Ouvert.

V: tension (V).

V_{OPT}: Tension Optimale.

V_{mp}: Tension du panneau à la puissance maximale.

V_{PV}: tension Photovoltaïque.

ΔG: variation de la conductance.

ΔI: variation de courant.

ΔP: variation de puissance.

ΔV: variation de tension.

η: le rendement.

INTRODUCTION GENERALE

L'humanité évolue au rythme de son utilisation croissante de l'énergie, pilier essentiel de son développement. Cependant, cette quête énergétique est confrontée à des défis majeurs, notamment l'épuisement progressif des ressources fossiles et les préoccupations croissantes concernant les émissions de gaz à effet de serre. Dans ce contexte, l'exploration de sources d'énergie renouvelables et durables est devenue une priorité mondiale. Parmi ces solutions, l'énergie photovoltaïque se distingue comme une solution prometteuse. Elle exploite le potentiel illimité du soleil en convertissant le rayonnement solaire en électricité à travers des panneaux solaires. Cette technologie offre des avantages significatifs, tels que la disponibilité continue de la source d'énergie et son impact environnemental réduit, faisant d'elle un choix attrayant pour répondre aux besoins énergétiques actuels et futurs.

Cependant, la maximisation de l'efficacité des systèmes photovoltaïques pose un défi majeur. Le suivi du point de puissance maximale (MPPT) est une fonction cruciale dans ces systèmes, visant à ajuster en temps réel les conditions de fonctionnement des panneaux solaires pour garantir une production d'énergie optimale. Parmi les techniques de MPPT les plus couramment utilisées, on trouve la méthode Perturb and Observe (P&O). La méthode P&O, basée sur une observation continue des variations de la puissance et une perturbation du point de fonctionnement pour suivre le point de puissance maximale, est largement adoptée pour sa simplicité et son efficacité. Cependant, cette méthode présente des limites, notamment en termes de temps de réponse et de stabilité, ce qui a conduit à des recherches intensives visant à améliorer ses performances.

Notre problématique réside sur Comment peut-on optimiser le suivi du point de puissance maximale dans les systèmes photovoltaïques, y compris en améliorant les performances de la méthode P&O ? Et comment peut-on réaliser réellement cette approche sur système PV ?

Dans cette optique, l'intégration d'un filtre à réponse impulsionnelle finie (FIR) au sein du contrôleur P&O pourrait offrir une solution prometteuse pour optimiser le suivi du MPP et optimiser la production d'énergie dans les systèmes photovoltaïques. Ce filtre pourrait efficacement filtrer les variations de puissance observées, offrant ainsi une réponse plus précise et stable dans le processus de suivi du MPP.

L'objectif principal de cette étude est d'explorer les avantages potentiels de l'intégration d'un filtre FIR dans le contrôleur P&O utilisé dans les systèmes photovoltaïques. Plus précisément, nous cherchons à évaluer l'impact de l'ajout du filtre FIR sur les performances du contrôleur P&O en termes de suivi du point de puissance maximale (MPP). De plus, nous analyserons les effets de ce filtrage sur l'efficacité globale de la production d'énergie dans les systèmes photovoltaïques. Enfin, nous mettrons en œuvre cette approche sur un microcontrôleur ESP32 afin de démontrer sa faisabilité et sa praticité dans des applications réelles.

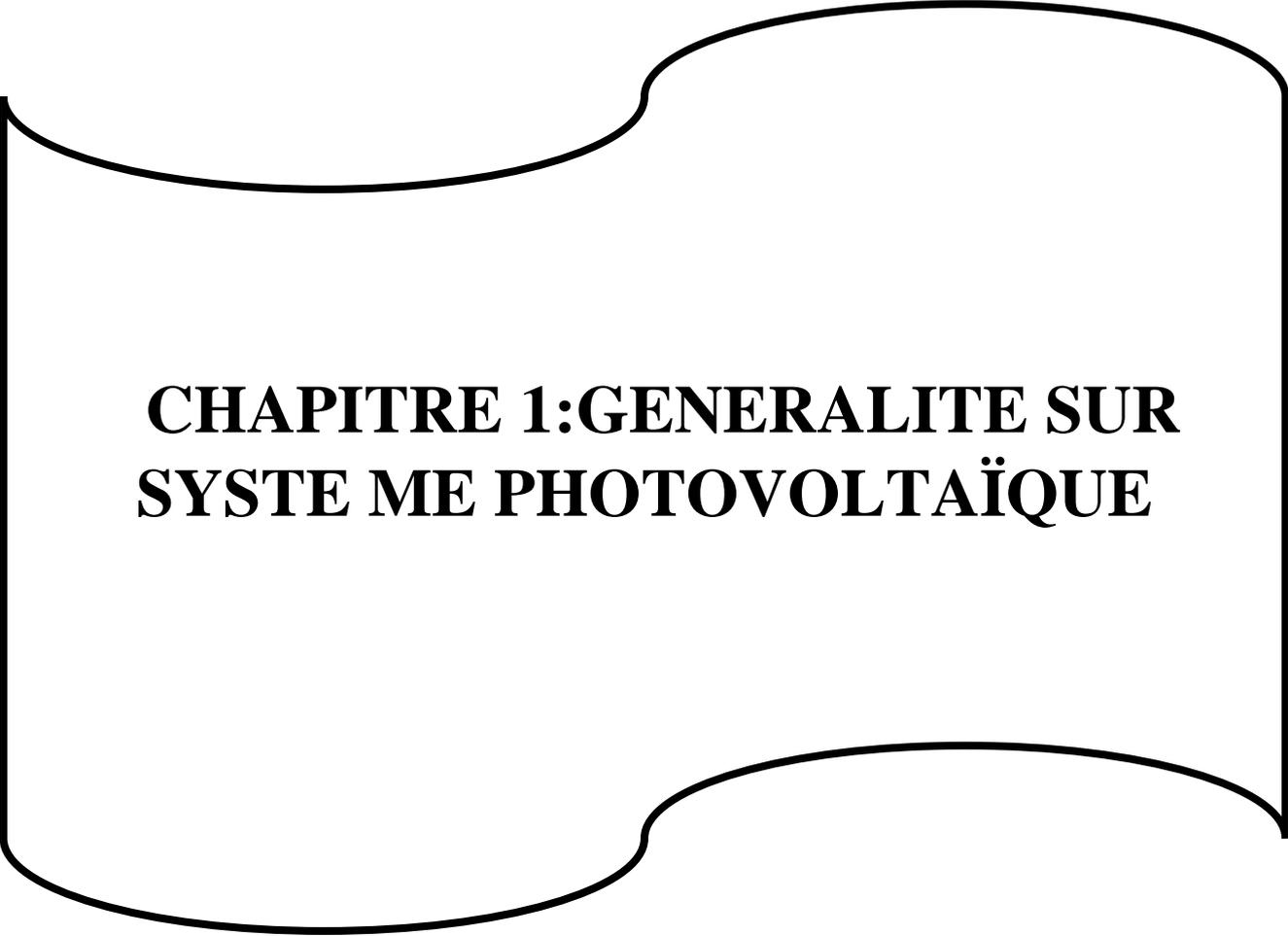
Pour atteindre ces objectifs, ce mémoire est structuré en trois chapitres :

Le premier chapitre de notre étude explore les bases des systèmes photovoltaïques, couvrant l'énergie solaire, l'effet photovoltaïque, les technologies des cellules solaires, les générateurs et modules photovoltaïques, les méthodes d'association des cellules solaires, les convertisseurs DC-DC tels que le hacheur série (Buck), le hacheur parallèle (Boost) et le convertisseur Buck-Boost, ainsi que les méthodes de poursuite du point de puissance maximale (MPPT).

Dans deuxième chapitre, nous nous concentrons sur la synthèse et la simulation en utilisant MATLAB d'une commande MPPT P&O, ainsi que sur l'intégration d'un filtrage FIR dans cette commande. Nous commençons par décrire le processus de synthèse et de simulation de la commande P&O classique, en mettant l'accent sur son efficacité dans le suivi du point de puissance maximale. Ensuite, nous explorons l'ajout d'un filtrage FIR à cette commande, examinant comment cela peut améliorer encore ses performances.

Dans le troisième chapitre nous passons à l'implémentation pratique de notre approche sur le microcontrôleur ESP32 et sur l'évaluation de ses résultats. Nous effectuons une étude et des essais pour l'adaptation du convertisseur DC/DC. Après nous débutons en mettant en œuvre et testant la commande P&O sur un système photovoltaïque réel, observant son fonctionnement dans des conditions réelles. Ensuite, nous procédons à l'implémentation et au test de la commande avec filtrage FIR, afin de mesurer son efficacité dans le suivi du point de puissance maximale. Enfin, nous présentons les résultats obtenus et comparons les performances des deux approches, mettant en lumière les avantages et les limitations de chacune.

A la fin de ce mémoire, une conclusion générale présente les résultats de notre travail, et offre une brève synthèse des idées traitées dans le document.



CHAPITRE 1:GENERALITE SUR SYSTE ME PHOTOVOLTAÏQUE

1.1. INTRODUCTION

Dans un monde où la transition vers des sources d'énergie renouvelables est devenue cruciale, les systèmes photovoltaïques se démarquent comme une solution prometteuse pour répondre aux besoins énergétiques tout en réduisant notre empreinte environnementale. Ce chapitre vise à plonger dans l'essence même de cette technologie, explorant les concepts théoriques sous-jacents aux systèmes photovoltaïques, ainsi que les éléments essentiels tels que les convertisseurs DC-DC et la commande MPPT.

Le développement de systèmes photovoltaïques efficaces repose sur une compréhension approfondie des principes fondamentaux de la conversion d'énergie solaire en électricité utilisable. À cet égard, nous explorerons les aspects théoriques du fonctionnement des cellules solaires, mettant en lumière les mécanismes de génération de courant continu (DC) à partir de la lumière du soleil, ainsi que les facteurs qui influent sur leur rendement et leur fiabilité.

En parallèle, nous plongerons dans l'univers des convertisseurs DC-DC, des éléments cruciaux pour l'intégration efficace des systèmes photovoltaïques dans les réseaux électriques. Ces dispositifs jouent un rôle essentiel dans la transformation de l'énergie solaire en une forme compatible avec les exigences de charge et de stockage. Notre exploration examinera les différents types de convertisseurs, leurs caractéristiques et fonctionnements.

Par ailleurs, la maximisation de la production d'énergie solaire devient un objectif majeur pour améliorer l'efficacité des systèmes photovoltaïques. C'est là qu'intervient la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking), une technologie qui optimise en temps réel le point de fonctionnement des panneaux solaires pour obtenir le maximum de puissance disponible. Nous analyserons les principes de fonctionnement de la commande MPPT, ses algorithmes de contrôle, et son impact sur les performances globales des systèmes photovoltaïques.

1.2. LE PHOTOVOLTAÏQUE FONCTIONNEMENT ET TECHNOLOGIES

1.2.1. L'effet Photovoltaïque

Le phénomène de l'effet photovoltaïque est un type des phénomènes photoélectriques. Il est utilisé dans les cellules photovoltaïques pour produire de l'électricité à partir du rayonnement du soleil. Elle se produit lorsque des particules lumineuses entrent en collision avec un matériau semi-conducteur, transférant leur énergie aux électrons qui, à leur tour, produisent un potentiel électrique. L'effet photovoltaïque est obtenu par l'absorption de particules lumineuses dans un

CHAPITRE 1 : GENERALITE SUR SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

matériau semi-conducteur, ce qui entraîne la création de paires électron-trou (excitation d'un électron de la bande de valence à la bande de conduction) entraînant un potentiel électrique ou un flux de charge électrique. Différents types d'appareils peuvent être développés sur la base de ce principe. Ces dispositifs sont appelés photodiodes, phototransistors ou des photopiles. Ce phénomène photovoltaïque particulier est largement utilisé dans les panneaux solaires photovoltaïques [1].

1.2.2. Cellule Solaire Photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un dispositif semi-conducteur sensible à la lumière, conçu avec des couches minces. Une face de la cellule est dopée avec des atomes de type N (par exemple du phosphore), tandis que l'autre est dopée avec des atomes de type P (comme du bore). Des électrodes métalliques sont positionnées sur chacune des deux faces afin de collecter les électrons et d'établir un circuit électrique. La face supérieure de la cellule est traitée pour maximiser la pénétration de la lumière en appliquant une couche anti-reflet. Les deux faces, supérieure et inférieure, sont munies d'électrodes pour la collecte des électrons [2].

Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN, ce qui libère des électrons (charges N) et des trous (charges P). Cela crée une différence de potentiel entre les deux couches, mesurable entre 0,3 V et 0,7 V en fonction du matériau utilisé, entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. Une cellule PV présente essentiellement des caractéristiques non linéaires, car on peut l'imaginer comme une combinaison d'une source de courant en parallèle avec une diode idéale.

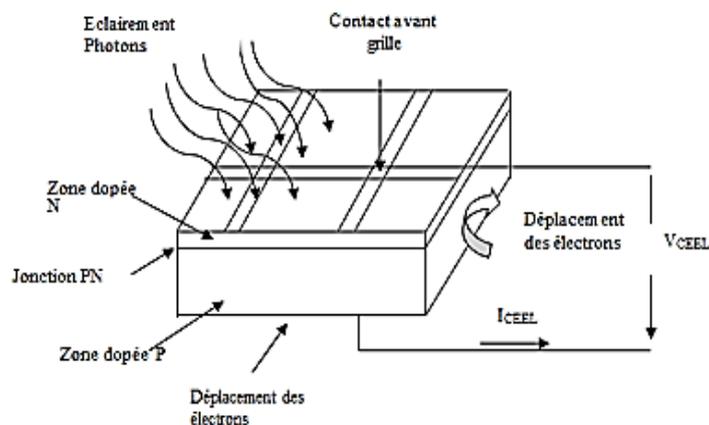


Figure (1- 1): Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire.

CHAPITRE 1 : GENERALITE SUR SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

Le schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque peut être représenté par un circuit électrique simple, comme le montre la figure (1-2):

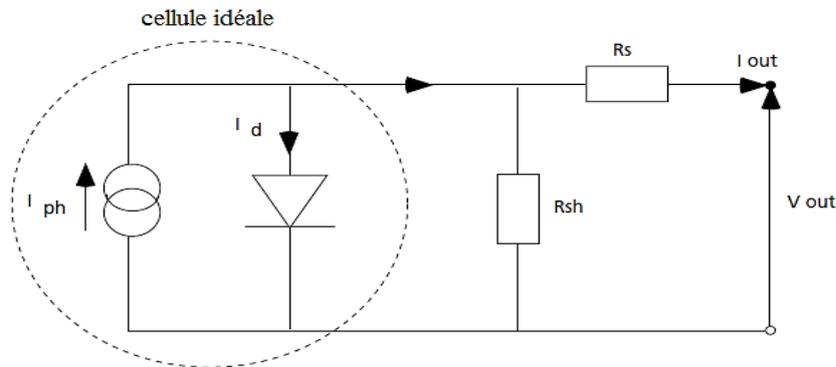


Figure (1- 2): Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

➤ Pour la cellule idéale:

$$I(V) = I_{ph}(\phi) - I_d(V) \quad (1-1)$$

$I(V)$: courant disponible

V : tension aux bornes de la jonction

$I_{ph}(\phi)$: courant produit par la photopile, ce courant est proportionnel au flux lumineux (ϕ).

$I_d(V)$: courant de diode.

$$I_d(V) = I_S \left(\exp \frac{V}{\alpha V_T} - 1 \right) \quad (1-2)$$

Avec : $V_T = kT/q$; $V_T = 26$ mV à $T = 300$ K pour le silicium.

α : facteur technologique dépendant du type de diode et de la manière dont elle est fabriquée ;
 $1 < \alpha < 2$ pour les diodes

I_S : courant de saturation inverse de la diode

➤ Une photopile comporte en réalité une résistance série (R_s) et une résistance en dérivation ou shunt (R_{sh}).

$$I = I_{ph} - I_S \exp \left(\frac{q(V + R_s I)}{\alpha \cdot kT} \right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (1-3)$$

CHAPITRE 1 : GENERALITE SUR SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

- Ces résistances influencent la caractéristique $I=f(V)$ de la photopile :

La résistance série (R_s) est la résistance interne de la cellule, dépendant du semi-conducteur, de la résistance de contact des grilles collectrices et de leur résistivité.

La résistance shunt (R_{sh}) résulte d'un courant de fuite à la jonction, dépendant de sa réalisation [3].

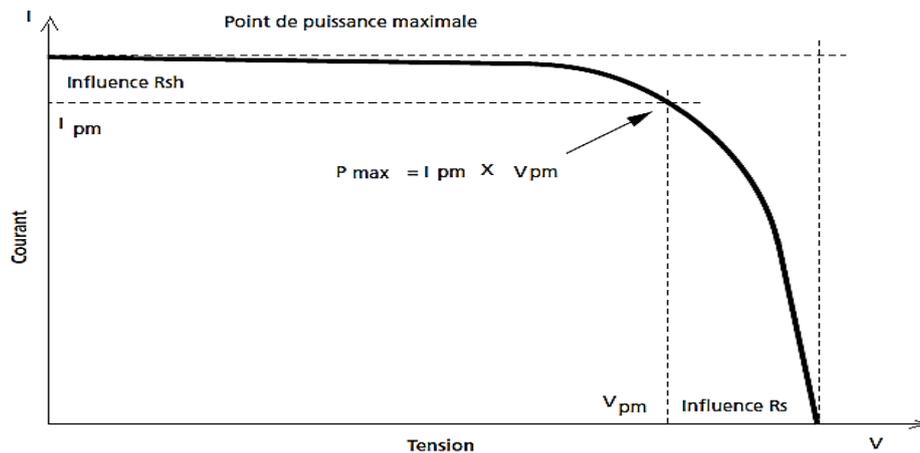


Figure (1- 3): Influence des résistances série et shunt sur la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque [3].

1.2.3. Technologies Des Cellules PV

1.2.3.1. La cellule en silicium monocristallin

Les cellules photovoltaïques en silicium monocristallin sont parmi les plus répandues. Elles offrent un rendement élevé d'environ 25 % et une durée de vie d'environ 30 ans. Leur couleur est généralement bleue, sans traces de cristaux visibles. Cependant, elles sont moins efficaces en cas de faible ensoleillement et sont donc mieux adaptées aux régions très ensoleillées [4].

1.2.3.2. La cellule en silicium poly-cristalline

Les cellules photovoltaïques en silicium poly-cristallin se distinguent par leur couleur bleue et les motifs de cristaux visibles. Elles sont fabriquées à partir de silicium fondu dans une lingotière métallique, ce qui les rend moins coûteuses à produire que les cellules monocristallines. Leur rendement se situe généralement entre 10 et 15 %, inférieur à celui des cellules monocristallines, mais elles offrent une meilleure performance par temps nuageux grâce à leur capacité à capturer la lumière diffusée [4].

CHAPITRE 1 : GENERALITE SUR SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

1.2.3.3. La cellule en silicium Amorphe

Les cellules photovoltaïques au silicium amorphe se distinguent par leur composition en une fine couche de silicium, obtenue à partir de gaz de silicium vaporisé sur divers supports. Leur couleur est généralement gris foncé. Bien qu'elles soient peu coûteuses à produire et polyvalentes en termes d'intégration sur différents supports, elles offrent un rendement relativement faible d'environ 7 %. Elles ont cependant l'avantage de capter les rayons solaires même par temps nuageux. Cependant, pour être rentables, elles nécessitent une surface de panneau solaire importante, et leur performance tend à diminuer avec le temps [4].

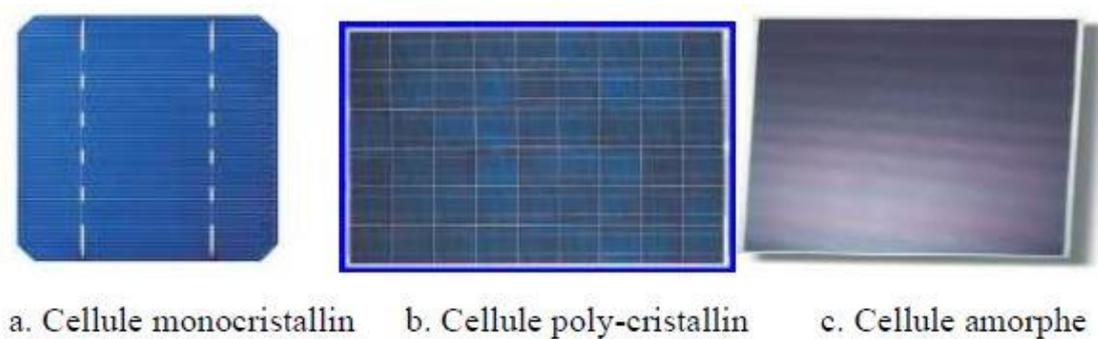


Figure (1- 4): Les types des cellules PV.

1.3. GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

Le générateur photovoltaïque comprend un ensemble d'équipements conçus pour exploiter l'énergie photovoltaïque afin de répondre aux exigences de charge. L'assemblage des modules dans des panneaux pour créer un champ photovoltaïque dépend de la puissance de sortie souhaitée. Lorsqu'il est directement connecté au récepteur sans composants supplémentaires, le panneau solaire fonctionne en conjonction avec la lumière du soleil, la sortie électrique vers le récepteur étant déterminée par l'intensité de la lumière solaire. Ainsi, elle atteint son apogée lorsque le soleil est au sommet et est nulle la nuit [5].

1.3.1. Le Module Photovoltaïque

Un module solaire photovoltaïque est composé de six éléments essentiels : un cadre en aluminium pour la structure, un joint pour la fixation, du verre pour la protection, une couche d'EVA pour la résistance aux intempéries, des cellules photovoltaïques pour la conversion de la lumière en électricité, et une feuille de Tedlar blanc pour renforcer la résistance mécanique [4].

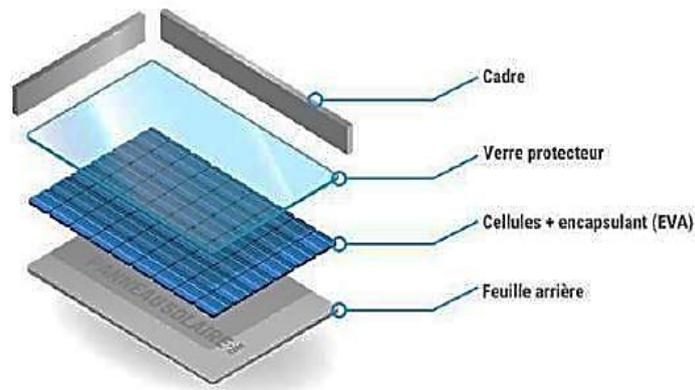


Figure (1- 5): Composition du module photovoltaïque.

1.3.2. Association Des Cellules

1.3.2.1. Association en série

L'association en série de cellules photovoltaïques consiste à les connecter bout à bout, reliant la borne positive de chaque cellule à la borne négative de la suivante. Cela permet d'additionner les tensions individuelles pour augmenter la tension de sortie totale du système tout en maintenant le courant constant. Cette technique vise à adapter la tension de sortie aux besoins spécifiques de l'application, ce qui améliore l'efficacité et la performance globale du système photovoltaïque [6].

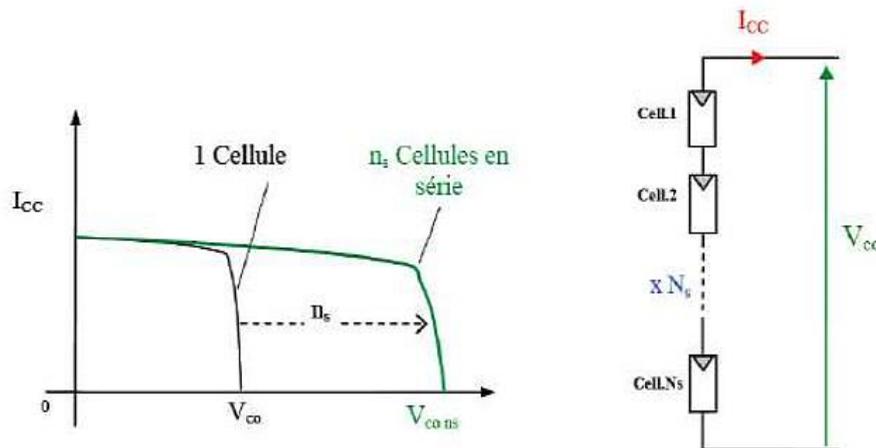


Figure (1- 6): Caractéristique résultante d'un groupement en série de n_s cellules identiques

1.3.2.2. Association parallèle

L'association en parallèle de cellules photovoltaïques consiste à connecter les bornes positives ensemble et les bornes négatives ensemble. Cette méthode permet d'additionner les

CHAPITRE 1 : GENERALITE SUR SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

courants de sortie individuels des cellules tout en maintenant la tension constante. Son objectif principal est d'augmenter le courant de sortie total du système, adaptant ainsi la capacité de production à des charges électriques plus importantes ou à des applications nécessitant une puissance accrue [6].

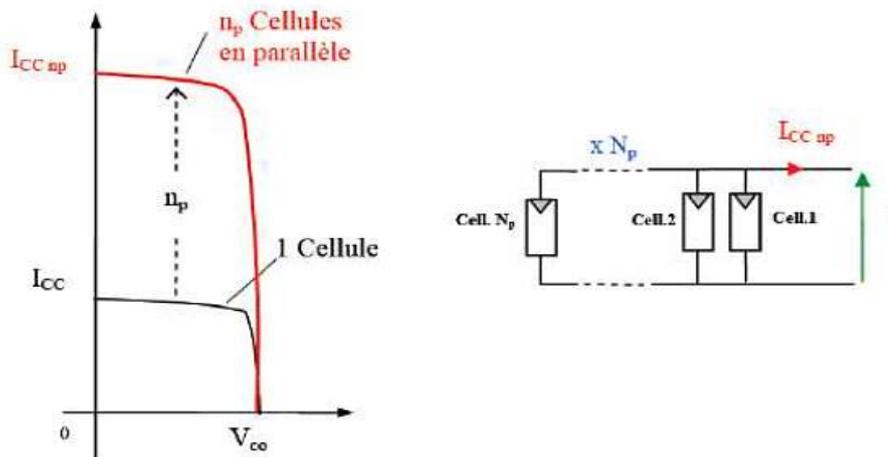


Figure (1- 7): Caractéristiques résultant d'un groupement de N_p cellules en parallèle.

1.3.2.3. Association hybride (série parallèle)

Les configurations hybrides sont souvent utilisées pour améliorer les avantages des connexions en série et en parallèle. La combinaison de cellules en série et en parallèle permet d'atteindre l'équilibre de tension et de courant souhaité pour une application spécifique. Cette approche garantit une efficacité accrue de la récupération d'énergie et une fiabilité accrue du système [7].

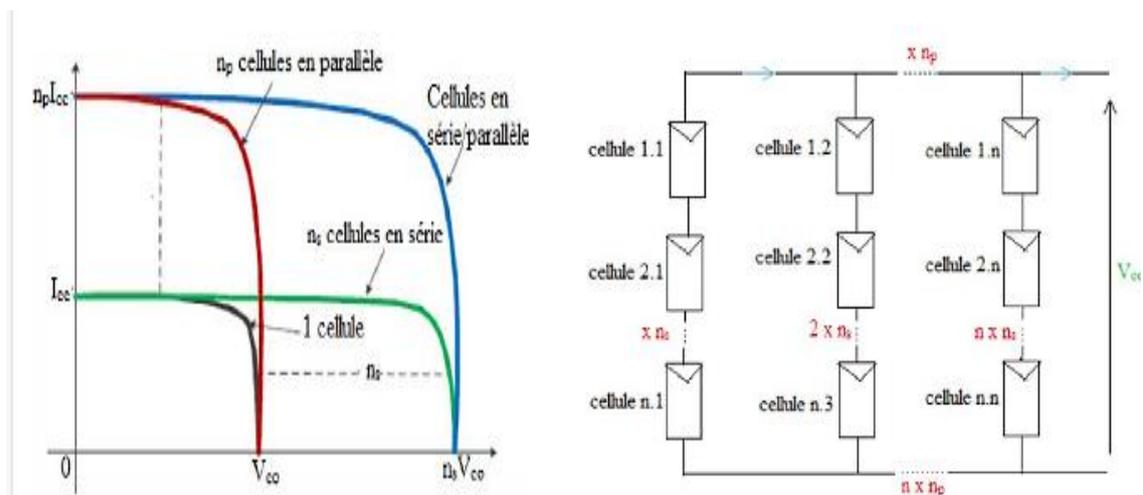


Figure (1- 8): Caractéristiques résultant d'un groupement de N_s et N_p cellules [8].

1.4. CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE

1.4.1. La Tension A Circuit Ouvert (V_{oc})

La tension à circuit ouvert (V_{oc}) d'une cellule photovoltaïque représente sa tension maximale lorsqu'aucun courant ne circule dans le circuit. Cette valeur est cruciale car elle détermine la production d'énergie maximale de la cellule. La tension à circuit ouvert peut fluctuer en fonction du type de cellule et des conditions environnementales telles que la lumière incidente et la température. Une lumière plus intense ou une température plus basse peut entraîner une tension à circuit ouvert plus élevée.

1.4.2. Le Courant De Court-Circuit (I_{cc})

Le courant de court-circuit (I_{cc}) d'une cellule solaire est le courant qui traverse la cellule lorsqu'elle est court-circuitée, c'est-à-dire lorsque sa tension est nulle. En l'absence de charge connectée à la cellule, les électrons libérés par l'effet photoélectrique circulent librement, créant ainsi un courant électrique. Ce courant atteint son maximum lorsque le circuit est court-circuité, permettant un flux maximal d'électrons. Le courant de court-circuit est directement influencé par l'intensité de la lumière solaire incidente sur la cellule et par son efficacité à convertir cette lumière en courant électrique.

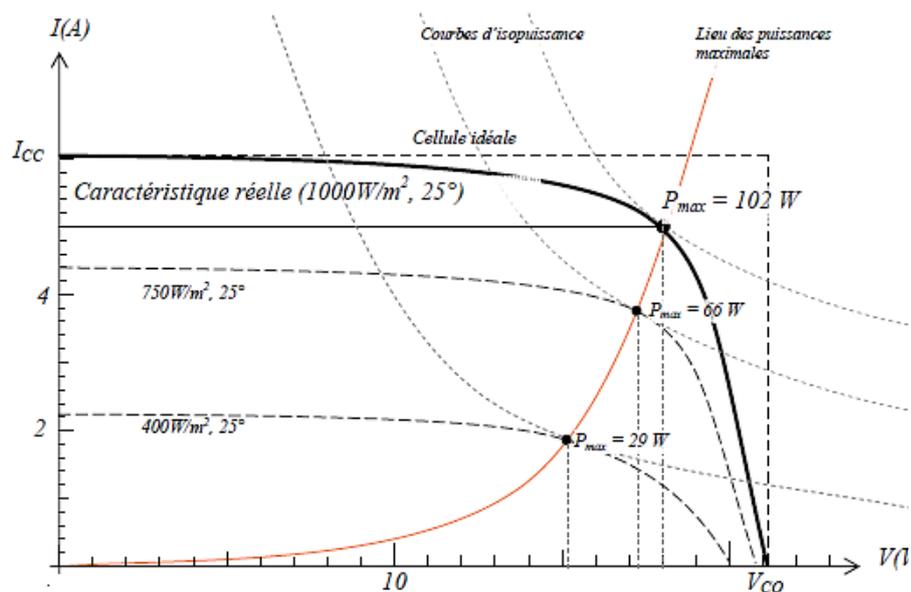


Figure (1- 9): Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque [3].

CHAPITRE 1 : GENERALITE SUR SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

1.4.3. La Puissance Maximale (Pmax)

La puissance maximale (Pmax) d'un système photovoltaïque représente sa sortie électrique maximale sous des conditions spécifiques, généralement atteinte au Point de Puissance Maximale (PPM) sur la courbe courant-tension (I-V). C'est un paramètre crucial pour évaluer les performances des panneaux solaires, indiquant la quantité maximale d'énergie électrique pouvant être collectée à partir du rayonnement solaire incident. Son calcul implique le produit de la tension (V) et du courant (I) au PPM, généralement géré par des algorithmes MPPT. Des facteurs tels que l'irradiance solaire, la température et la conception du système influencent la Pmax.

1.4.4. Le Facteur De Forme (FF)

Est un paramètre crucial utilisé pour évaluer la qualité d'une cellule solaire ou d'un générateur photovoltaïque (PV) à partir de sa caractéristique I-V. Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule (Pmax) et la puissance formée par le produit du courant maximal (Imax) et de la tension maximale (Vmax). Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également [3].

$$ff = \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (1-4)$$

Pmax : puissance maximale, Vco : tension en circuit ouvert (Vco), Icc : courant de court-circuit.

1.4.5. Le Rendement

Le rendement d'un photo-générateur est le rapport entre la puissance électrique générée et la puissance lumineuse reçue par le photo-générateur [9].

$$\eta = \frac{P_{max}}{S \cdot E} \quad (1-5)$$

Où S est la surface du photo-générateur [m²], E est l'éclairement [W/m²], P_{max} est la puissance électrique du photo-générateur [W].

1.5. INFLUENCE DE L'ECLAIREMENT ET TEMPERATURE SUR LE COMPORTEMENT DU MODULE PV

1.5.1. Influence De L'éclairement

L'éclairement solaire a un impact significatif sur les performances des cellules photovoltaïques, déterminant le taux de génération de courant et de tension. Le coefficient de

CHAPITRE 1 : GENERALITE SUR SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

température du courant de court-circuit (I_{cc}) quantifie cet effet, généralement une augmentation de l'éclairement entraîne une augmentation du courant de court-circuit, contribuant ainsi à une augmentation de la puissance de sortie. Par ailleurs, Les courbes des cellules solaires sont étroitement liées à l'intensité du rayonnement solaire, une augmentation se traduit par un ensoleillement accru, augmentant la puissance de sortie pour une même valeur de tension. De plus, la tension de circuit ouvert augmente légèrement avec l'augmentation de l'irradiation solaire, favorisant la mobilité des électrons et augmentant la production de puissance.

1.5.2. Influence De Température

L'effet de la température sur les performances d'une cellule solaire peut être quantifié par le coefficient de température, qui est le pourcentage de changement de la puissance de sortie par degré Celsius de changement de température. Le coefficient de température est généralement négatif pour la tension et le facteur de remplissage, ce qui indique qu'une augmentation de température réduit la tension V_{co} et le point de puissance maximale. Le coefficient de température est généralement positif pour le courant, ce qui indique qu'une augmentation de température augmente le courant I_{cc} .

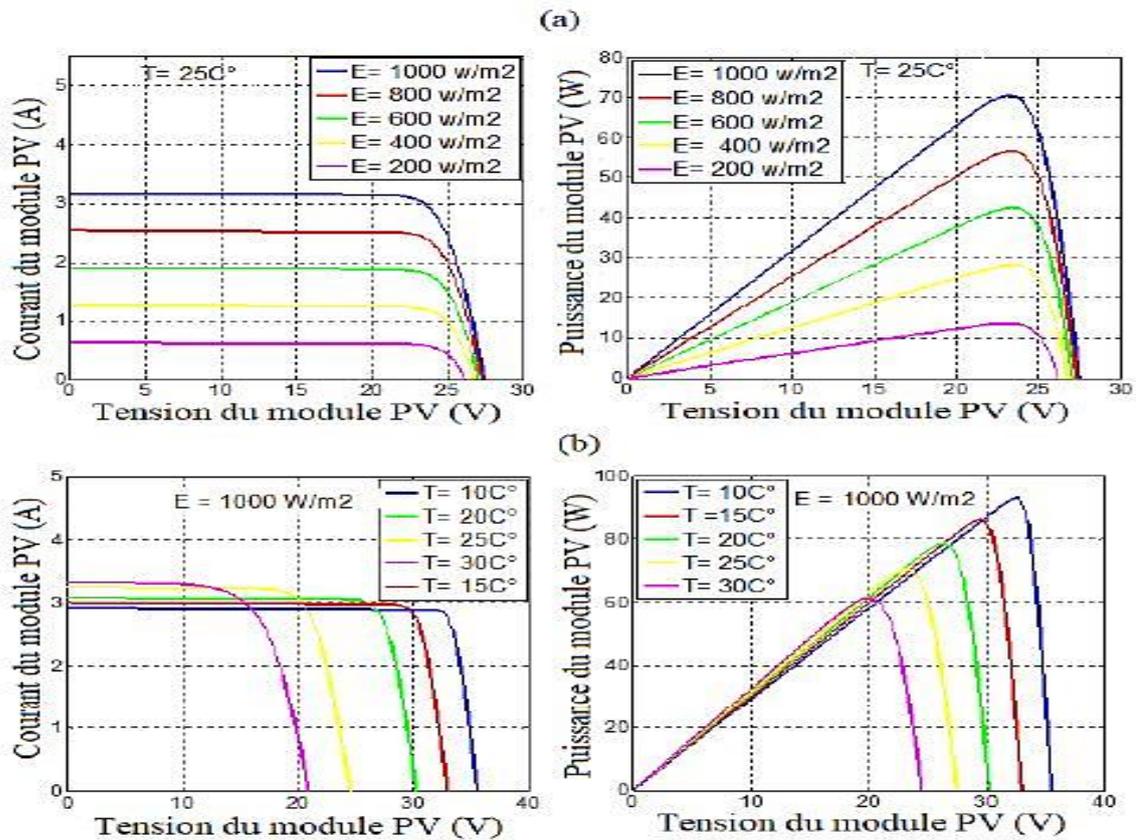


Figure (1- 10) : Influence de l'éclairement (b) et de la température (a) sur $I=f(V)$ et $P=f(V)$.

1.6. LES CONVERTISSEURS DC-DC

Les convertisseurs DC-DC sont des composants essentiels dans de nombreuses applications électroniques, offrant la capacité de convertir efficacement une tension continue d'un niveau à un autre. Leur fonctionnement repose sur des principes électriques et magnétiques, exploitant les propriétés des composants électroniques pour réaliser la conversion de puissance. Ce convertisseur permet de convertir une tension continue fixe U en une tension continue réglable V , par le biais d'un signal de commande U_{com} de rapport cyclique variable avec une très grande souplesse et un rendement élevé.

Dans un convertisseur DC-DC typique, des composants tels que des inductances, des condensateurs et des commutateurs sont utilisés pour contrôler le flux d'énergie. Par exemple, dans un convertisseur buck, l'inductance stocke l'énergie pendant la phase de commutation et la transfère à la charge pendant la phase de conduction. Les commutateurs, généralement des transistors MOSFET, contrôlent le flux d'énergie en alternant entre des états ouverts et fermés, régulant ainsi la tension de sortie [10].

Le fonctionnement des convertisseurs DC-DC peut être décrit à l'aide de principes de modulation de largeur d'impulsion (PWM) ou de modulation de fréquence (FM). Ces techniques permettent de contrôler la tension de sortie en ajustant le rapport cyclique des signaux de commande des commutateurs, ou en modifiant la fréquence de commutation. Cela offre une régulation précise de la tension de sortie en fonction des variations de charge ou de l'entrée.

En ce qui concerne l'utilisation, les convertisseurs DC-DC sont largement intégrés dans les systèmes d'alimentation à découpage, les régulateurs de tension, les chargeurs de batterie, les convertisseurs solaires, les alimentations pour véhicules électriques, etc. Leur efficacité élevée, leur compacité et leur capacité à fournir une tension régulée en font des éléments incontournables dans de nombreux dispositifs électroniques modernes.

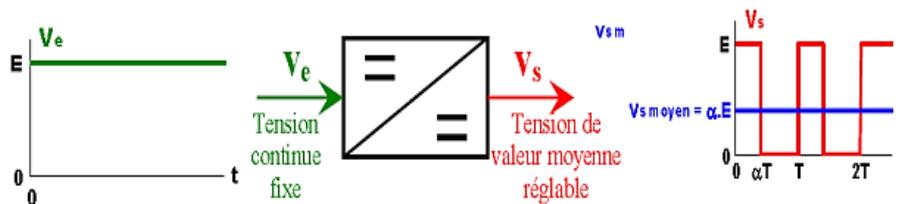


Figure (1- 11): Principe de base d'un convertisseur DC-DC [10].

1.6.1. Type De Convertisseur DC-DC

Selon la configuration du commutateur et du hacheur, divers types de convertisseurs DC-DC peuvent être réalisés :

- Le convertisseur abaisseur de tension, également appelé "Buck".
- Le convertisseur élévateur de tension, aussi connu sous le nom de "Boost".
- Le convertisseur abaisseur-élévateur de tension, souvent désigné par "Buck-Boost".

1.6.1.1. Hacheur série (Buck)

Un convertisseur Buck est un type de convertisseur DC-DC qui transforme une tension continue en une autre tension continue, généralement d'une valeur inférieure à la tension d'entrée, tout en régulant efficacement cette tension de sortie. Ce convertisseur utilise un hacheur série, dont le schéma général est représenté dans la figure (1-12) [11].

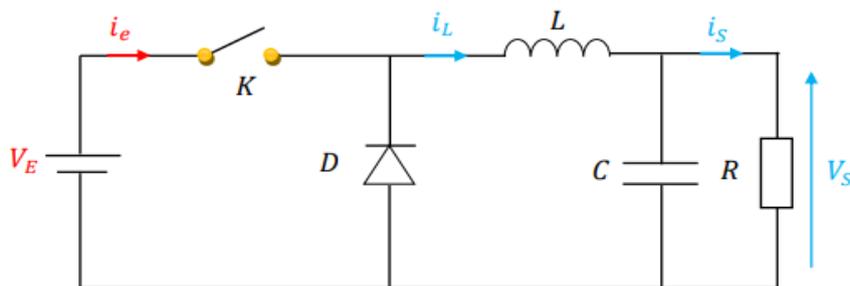


Figure (1- 12): Schéma d'un hacheur série (buck) [12].

Pour un rapport cyclique « D » donné, et en régime de conduction continu, la tension moyenne à la sortie est donnée par :

$$V_S = D * V_E \quad (1-6)$$

A partir de cette équation, le rapport de conversion du convertisseur Buck est donné par l'expression suivante :

$$M(D) = \frac{V_S}{V_E} = D \quad (1-7)$$

➤ Principe de fonctionnement :

Le fonctionnement du circuit hacheur Buck peut être divisé en deux configurations distinctes en fonction de l'état de l'interrupteur K : l'état passant et l'état bloqué.

CHAPITRE 1 : GENERALITE SUR SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

- **Dans l'état passant ($0 < t < DT$),** l'interrupteur K est fermé, permettant au courant de circuler dans le circuit. Pendant cette phase, l'inductance L stocke de l'énergie, tandis que la diode est inversée, empêchant tout courant de la traverser. Le courant dans l'inductance i_L augmente de manière linéaire, dicté par la valeur de l'inductance L.

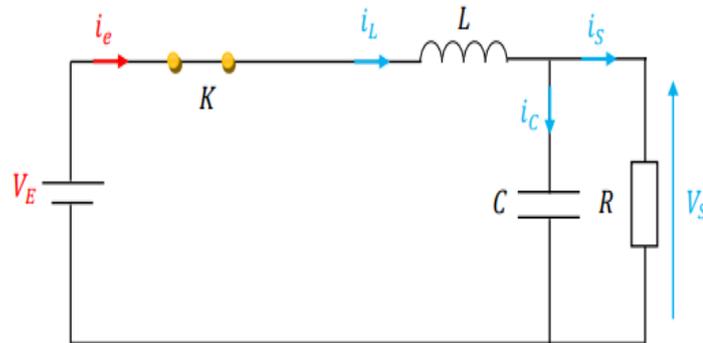


Figure (1- 13): Schéma équivalent du hacheur série (Buck) à l'état passant [12].

- **Dans l'état bloqué ($DT < t < T$),** l'interrupteur K est ouvert. À ce stade, l'énergie stockée dans l'inductance L est transférée à la charge via la diode. Le courant dans l'inductance i_L diminue progressivement, alimentant la charge connectée au circuit.

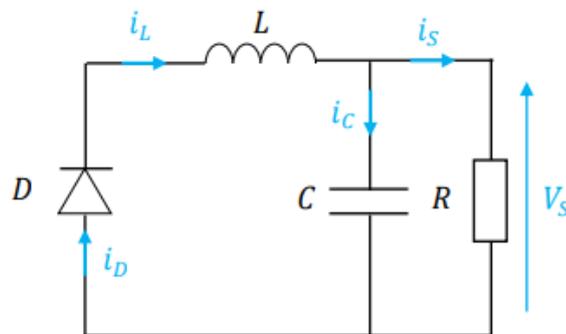


Figure (1- 14): Schéma équivalent du hacheur (Buck) à l'état bloqué [12].

1.6.1.2. Hacheur parallèle (Boost)

Un convertisseur boost ou hacheur parallèle est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue d'une valeur plus forte que celle de l'entrée [13]. Pour un rapport cyclique « D » donné, et en régime de conduction continu, la tension moyenne à la sortie est donnée par :

$$V_S = \frac{1}{1-D} * V_E \quad (1-8)$$

CHAPITRE 1 : GENERALITE SUR SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

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

$$M(D) = \frac{V_S}{V_E} = \frac{1}{1-D} \quad (1-9)$$

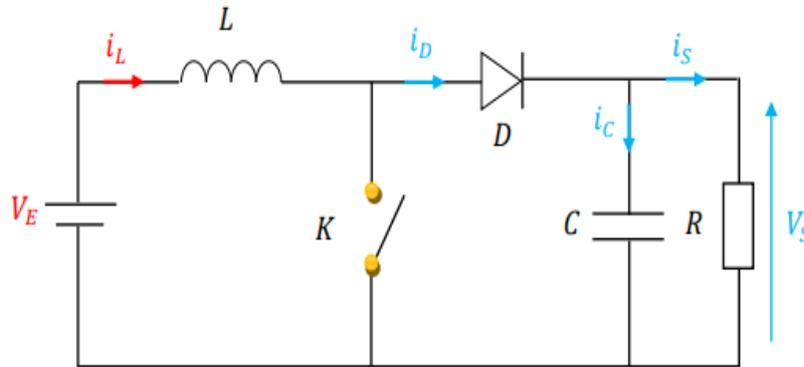


Figure (1- 15): Schéma d'un hacheur parallèle (boost).

➤ Principe de fonctionnement

- **Dans l'état passant ($0 < t < DT$),** lorsque l'interrupteur K est fermé cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance donc le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique. La diode est alors bloquée et la charge est alors déconnectée de l'alimentation [12].

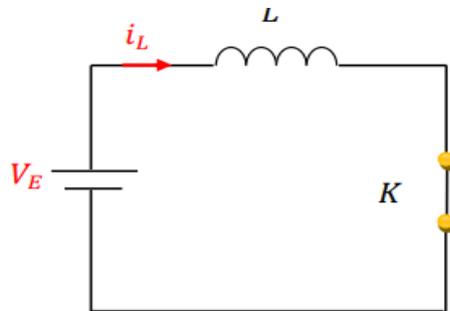


Figure (1- 16): Schéma d'un hacheur parallèle (boost) à l'état passant.

- **Dans l'état bloqué ($DT < t < T$),** Lorsque l'interrupteur K est ouvert. Cela interrompt le chemin direct du courant à travers l'interrupteur. L'inductance, qui stocke l'énergie sous forme de champ magnétique, cherche à maintenir le courant en le faisant circuler dans le circuit. Comme l'interrupteur est désactivé, la diode devient conductrice pour fournir un chemin de courant pour l'inductance. L'énergie stockée dans l'inductance est libérée et transférée à la charge à travers la diode. Cela entraîne une augmentation de la tension de sortie.

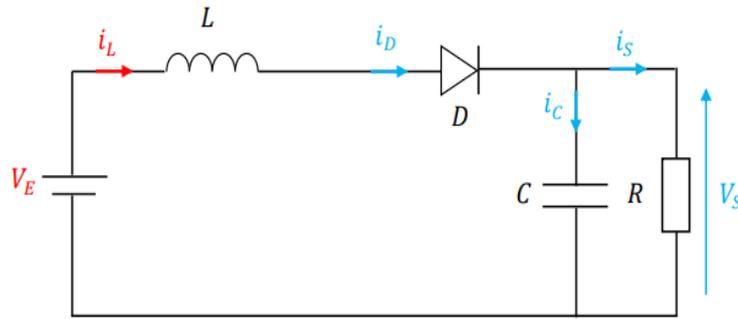


Figure (1- 17): Schéma d'un hacheur parallèle (boost) à l'état bloqué.

1.6.1.3. Le convertisseur Buck- Boost

Le convertisseur Buck-Boost est un type de convertisseur DC-DC à commutation permettant d'ajuster la tension de sortie pour qu'elle soit inférieure ou supérieure à la tension d'entrée. La magnitude de la tension de sortie est déterminée par la configuration du circuit de commutation. Ce convertisseur tire son nom de sa capacité à élever (boost) ou abaisser (buck) la tension d'entrée par rapport à la tension de sortie [14].

En mode élévateur (boost), lorsque la tension d'entrée (V_E) est inférieure à la tension de sortie (V_S), le courant de sortie est plus faible que le courant d'entrée ($I_E > I_S$).

En mode abaisseur (buck), lorsque la tension d'entrée (V_E) est supérieure à la tension de sortie (V_S), le courant de sortie est plus élevé que le courant d'entrée ($I_E < I_S$) [14].

Pour un rapport cyclique « D » donné, et en régime de conduction continu, la tension moyenne à la sortie est donnée par :

$$V_S = \frac{D}{1-D} * V_E \quad (1-10)$$

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

$$M(D) = \frac{V_S}{V_E} = \frac{D}{1-D} \quad (1-11)$$

Quand le rapport cyclique $D > 0.5$ le hacheur buck-boost fonction comme un hacheur boost et si le rapport cyclique $D < 0.5$ le hacheur buck-boost fonction comme un hacheur buck.

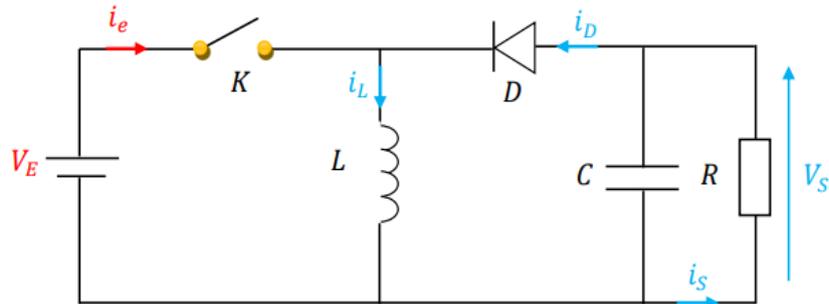


Figure (1- 18): Schéma d'un hacheur Buck-boost.

➤ Principe de fonctionnement

- **Dans l'état passant ($0 < t < DT$)**, Lorsque l'interrupteur K est fermé, l'inductance L est connectée en série avec la source de tension d'entrée. Pendant cette période, l'inductance L stocke de l'énergie sous forme de champ magnétique, tandis que le courant à travers elle augmente. La tension de sortie est la somme de la tension d'entrée et de la chute de tension à travers l'inductance. Cela permet d'augmenter la tension de sortie par rapport à la tension d'entrée.

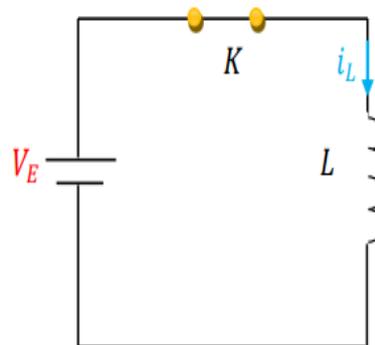


Figure (1- 19):Schéma d'un hacheur série-parallèle (buck-boost) à l'état passant.

- **Dans l'état bloqué ($DT < t < T$)**, Lorsque l'interrupteur K est ouvert, l'inductance est connectée en parallèle avec la charge à la capacité. L'énergie stockée dans l'inductance est libérée, il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité et la charge, maintenant le courant dans la charge en dépit de l'absence de connexion directe à la source d'entrée. La tension de sortie est la différence entre la tension d'entrée et la chute de tension à travers l'inductance. Cela permet de réduire la tension de sortie par rapport à la tension d'entrée.

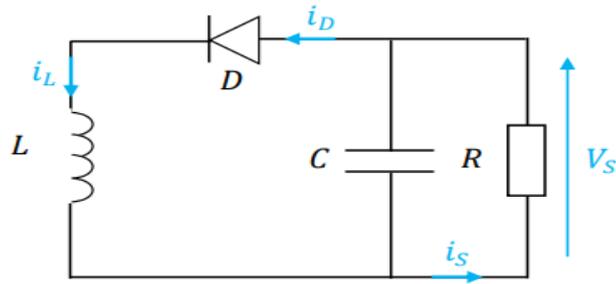


Figure (1- 20): Schéma d'un hacheur série-parallèle (buck-boost) à l'état bloqué.

1.7. LA COMMANDE MPPT

1.7.1. Définition De MPPT

La technique MPPT, abréviation de "Maximum Power Point Tracking", est un ensemble de méthodes visant à optimiser la production de puissance des générateurs électriques non linéaires tels que les générateurs photovoltaïques (PV) ou éoliens. Son objectif est de suivre en temps réel le point de puissance maximale (MPP) de ces générateurs, permettant ainsi d'extraire le maximum de puissance disponible [15].

Pour ce faire, différents algorithmes sont utilisés pour identifier et maintenir le générateur à son MPP. Ces algorithmes ajustent la tension de fonctionnement du générateur en fonction de la caractéristique non linéaire de celui-ci. En règle générale, lorsque le rapport de la variation de puissance par rapport à la variation de tension (dP/dV) est positif, la tension est augmentée pour se rapprocher du MPP, et inversement lorsqu'il est négatif. Le MPP est atteint lorsque ce rapport de dérivation est annulé.

1.7.2. Principe De MPPT

Le générateur photovoltaïque (PV) transforme l'énergie solaire en courant et tension photovoltaïques (IPV et VPV). Ces paramètres sont acheminés vers un contrôleur MPPT (Maximum Power Point Tracking), qui via un algorithme dédié, ajuste le rapport cyclique d'un étage d'adaptation DC-DC. L'objectif est d'optimiser la puissance délivrée par le GPV en l'harmonisant avec la puissance maximale disponible (P_{MAX}) du générateur.

Le contrôleur MPPT ajuste le rapport cyclique du convertisseur DC-DC de manière à optimiser la puissance fournie par le GPV, en alignant celle-ci avec la puissance maximale disponible (P_{MAX}) aux bornes du générateur. Cela est généralement accompli en modulant le

CHAPITRE 1 : GENERALITE SUR SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

rapport cyclique du convertisseur DC-DC en fonction des paramètres d'entrée tels que le courant photovoltaïque (I_{pv}) et la tension photovoltaïque (V_{pv}).

Pour garantir le fonctionnement optimal d'un GPV à son point de puissance maximale, des algorithmes MPPT sophistiqués sont employés. Ces algorithmes mettent en œuvre des méthodes avancées visant à minimiser l'écart entre la puissance de fonctionnement réelle et la puissance maximale de référence, cette dernière variant en fonction des conditions climatiques.

Les algorithmes MPPT peuvent comporter des calculs de puissance, des comparaisons de valeurs de puissance et des ajustements de modulation. Ces processus visent à suivre les fluctuations des conditions d'entrée, telles que l'intensité et la tension solaires, pour garantir une efficacité maximale de conversion [16].

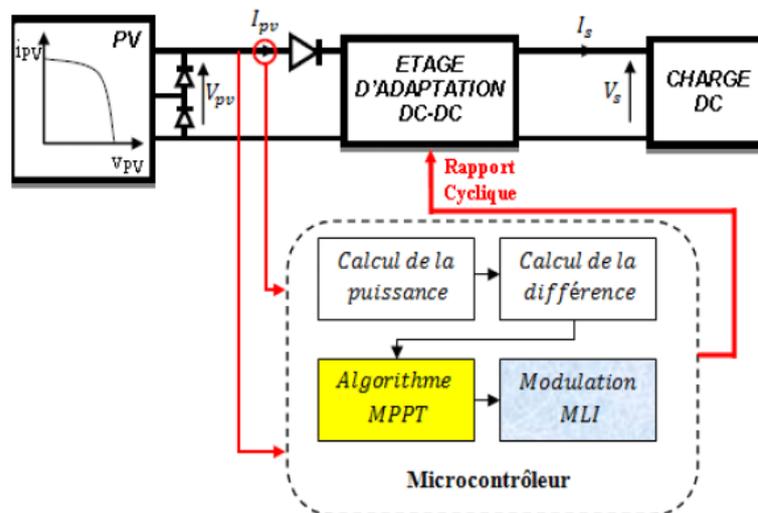


Figure (1- 21): Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec étage d'adaptation DC-DC contrôlé par une commande MPPT sur charge DC.

1.7.3. Méthodes de Commande MPPT

➤ Méthodes Indirectes

Les méthodes indirectes estiment la position du point de puissance maximale en utilisant des variables mesurées comme le courant de court-circuit ou la tension de circuit ouvert, ou en se basant sur des modèles paramétriques préétablis. Certaines ajustent la tension optimale en fonction des variations de température détectées par un capteur. Exemples : méthode de la tension fixe et méthode du court-circuit [17].

➤ Méthodes Directes

Les méthodes directes déterminent le point de fonctionnement optimal en mesurant directement le courant, la tension ou la puissance, réagissant aux fluctuations imprévisibles du système. Elles utilisent des algorithmes de recherche pour identifier le maximum de la courbe de puissance sans interrompre le fonctionnement. Exemples : méthode Perturbe & Observe (P&O) et Incrément de conductance [17].

1.7.4. Les Différents Algorithmes MPPT

1.7.4.1. La méthode de la tension de circuit ouvert du générateur (V_{OC})

Il s'agit d'une méthode de recherche du Point de Puissance Maximale (PPM) relativement simple. Elle consiste à comparer la tension du panneau solaire (V_{PV}) avec une tension de référence correspondant à la tension optimale (V_{opt}). Cette référence est dérivée de la relation linéaire entre V_{opt} et la tension de circuit ouvert (V_{OC}) d'un module PV, exprimée par :

$$V_{opt} = K_v * V_{OC} \quad (1-12)$$

Où K_v est un facteur de tension dépendant du type de générateur photovoltaïque (GPV) et de la température de fonctionnement (compris entre 0,71 et 0,78).

Cependant, cette méthode présente des inconvénients. Elle nécessite des mesures périodiques de V_{OC} , entraînant des pertes de puissance lors de la déconnexion de la charge pour la mesure. De plus, elle suppose que le coefficient K_v reste constant, ce qui est souvent inexact, notamment pour les générateurs photovoltaïques en silicium où K_v peut varier jusqu'à 10 % avec la température. Malgré leur simplicité et robustesse, ces commandes manquent de précision, limitant leur utilisation dans les systèmes de conversion modernes.

1.7.4.2. La méthode de court-circuit (I_{cc})

Cette méthode repose sur une relation linéaire initiale entre I_{opt} et I_{CC} , exprimée par l'équation :

$$I_{opt} = K_i * I_{CC} \quad (1-13)$$

Où K_i est un facteur de courant dépendant du générateur photovoltaïque (GPV), généralement compris entre 0.78 et 0.92. Cette équation montre que le courant optimal I_{opt} peut être déterminé par une mesure de I_{CC} , et que le PPM peut être atteint en appliquant un courant de référence égal à I_{opt} à la régulation en courant du convertisseur. Bien que la mesure de I_{CC} entraîne une perte de transfert de puissance due à la mise en court-circuit du GPV, cette

CHAPITRE 1 : GENERALITE SUR SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

méthode peut être plus précise que la précédente car la température n'influence pas trop le coefficient K_i .

Cependant, la précision de cette méthode est limitée en raison des processus d'estimation des paramètres caractéristiques du module (ICC et VCO) qui ne peuvent pas être effectués trop souvent. De plus, chaque mesure de courant ou de tension entraîne un arrêt de transfert de puissance, induisant des pertes énergétiques non négligeables au fil de la journée.

1.7.4.3. La méthode Incremental Conductance

Cette approche exploite les variations de la conductance du panneau solaire pour déterminer et maintenir son PPM.

L'idée clé derrière la méthode incremental conductance est que le PPM se produit lorsque la dérivée de la puissance par rapport à la tension est nulle. En mesurant à la fois la tension et le courant du panneau solaire, on peut calculer la conductance (le rapport entre le courant et la tension) [18].

$$G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (1-14)$$

Lorsque la conductance est égale à la pente de la courbe de puissance, cela indique que le système se trouve au PPM.

Donc une variation élémentaire (incrément) de conductance peut être définie par :

$$\Delta G = \frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} \quad (1-15)$$

Par ailleurs, la manière dont la puissance du GPV évolue en fonction de la tension indique la position du point de fonctionnement par rapport au PPM. Quand la dérivée de puissance est négative, on est sur le PPM, quand elle est positive, le point d'opération est à gauche du maximum, quand elle est négative, on est à droite. Les conditions suivantes peuvent être écrites selon la figure (1-22) :

Si dP/dV est positif ($dP/dV > 0$), cela signifie que la puissance augmente lorsque la tension augmente. Dans ce cas, le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM.

Si dP/dV est négatif ($dP/dV < 0$), cela signifie que la puissance diminue lorsque la tension augmente. Dans ce cas, le point de fonctionnement se trouve à droite du PPM.

CHAPITRE 1 : GENERALITE SUR SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

Si dP/dV est nul ($dP/dV = 0$), cela signifie que la puissance ne change pas avec la tension. Dans ce cas, le point de fonctionnement se situe sur le PPM lui-même [18].

Le lien entre la conductance donnée par l'équation suivante et la dérivée de la puissance dP/dV peut être décrit par l'équation suivante :

$$\frac{dP}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} = I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (1-16)$$

D'où, on peut alors écrire de nouvelles conditions sur la variation de conductance.

Si $\Delta I/\Delta V > -I/V$: Le point de fonctionnement est situé à gauche du PPM, donc on augmente la tension V jusqu'à atteindre le PPM et cela en diminuant le rapport cyclique α .

Si $\Delta I/\Delta V = -I/V$: Le point de fonctionnement est sur le PPM, donc la tension et le rapport cyclique α restent constants.

Si $\Delta I/\Delta V < -I/V$: Le point de fonctionnement est situé à droite du PPM, donc on diminue la tension V jusqu'à atteindre le PPM et cela en augmentant le rapport cyclique α .

Le maximum de puissance peut être alors traqué en effectuant des comparaisons à chaque instant de la valeur de la conductance I/V avec celle de l'incrément de conductance $\Delta I/\Delta V$ [18].

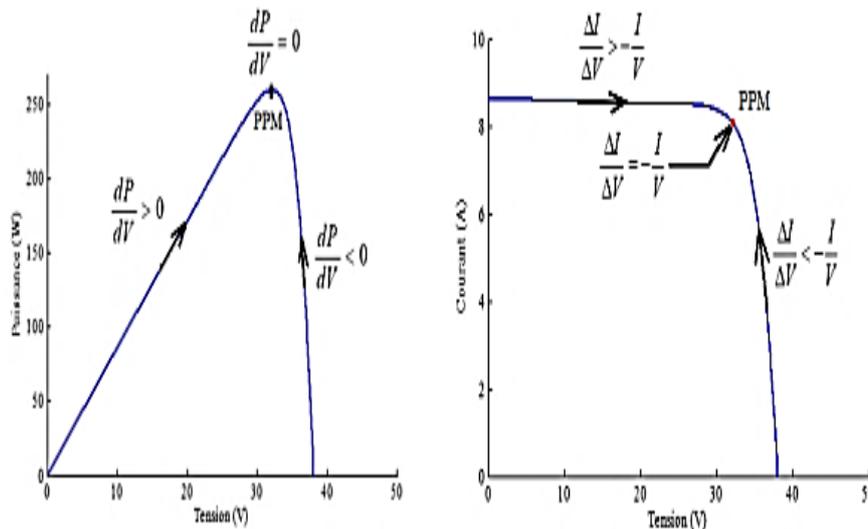


Figure (1- 22): positionnement du point de fonctionnement suivant le signe de la dérivée de la conductance G et de la puissance P .

L'organigramme suivant représente la méthode de la conductance incrémentale (INC COND) pour la recherche du point de puissance maximale (PPM) :

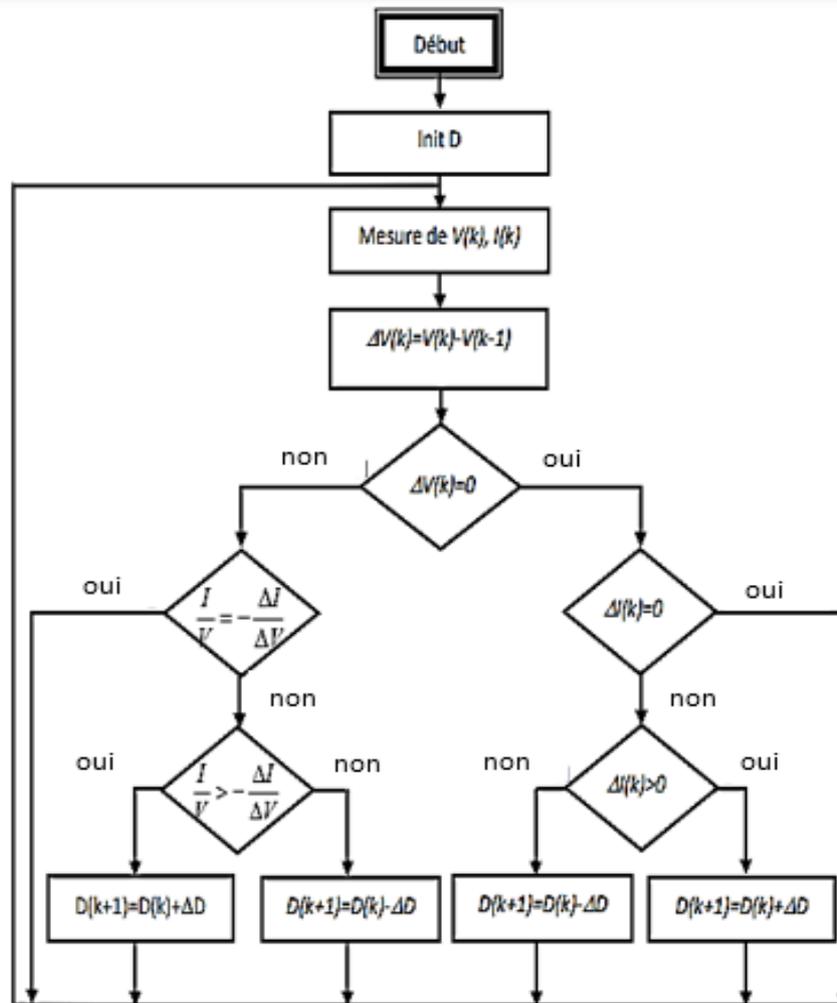


Figure (1- 23): L'organigramme de la méthode la conductance incrémentale

Le terme I/V représente la conductance instantanée, tandis que $\Delta I/\Delta V$ désigne la variation de cette conductance.

Pour éviter une division par zéro lorsque le PPM est atteinte ou que le point de fonctionnement se stabilise, l'algorithme effectue un test sur ΔV .

Si ΔV est nul, il teste si $\Delta I=0$. Si tel est le cas, cela signifie que le PPM est atteinte et aucun changement n'est nécessaire. Sinon, l'algorithme teste le signe de ΔI pour déterminer la position du PPM et ajuste le rapport cyclique α . Si $\Delta I > 0$, le rapport cyclique D est décrémenté, sinon il est incrémenté.

Si ΔV est différent de zéro, l'algorithme teste si $\Delta I/\Delta V = -I/V$. Si tel est le cas, aucun changement n'est nécessaire. Sinon, l'algorithme teste le signe de $\Delta I/\Delta V$ pour déterminer la position du PPM et ajuste le rapport cyclique D .

Si $\Delta I/\Delta V > -I/V$, le rapport cyclique D est décrémenté, sinon il est incrémenté [18].

CHAPITRE 1 : GENERALITE SUR SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

1.7.4.4. La méthode P&O (Perturb and Observe)

La méthode P&O est le sujet principal de notre recherche. Elle est basée, comme son nom l'indique, sur l'introduction d'une perturbation sur le système et l'observation de son impact sur le changement de la puissance de sortie du panneau. La perturbation du système est introduite par l'augmentation ou la diminution de la tension de panneau (V_{pv}) en agissant directement sur le rapport cyclique (D). L'observation de la puissance permet ensuite de prendre une décision sur la prochaine perturbation à introduire : s'il y a eu une augmentation de la puissance, la perturbation continue dans le même sens ; sinon, elle sera inversée.

Sur la figure suivante on voit que si la tension de fonctionnement varie dans une direction donnée ce qui implique que la puissance augmente ($\Delta P > 0$), la variation doit alors se déplacer vers le point de fonctionnement (PPM). L'algorithme P&O continuera à observer la variation de la tension dans la même direction.

Par contre, si la puissance diminue ($\Delta P < 0$), alors la variation est éloignée du point de fonctionnement du PPM. L'algorithme inversera alors la direction de la variation suivante [19].

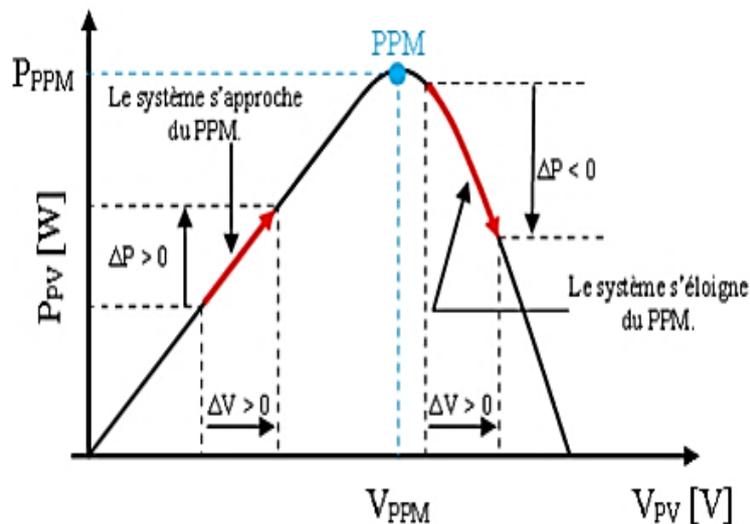


Figure (1- 24): Recherche du MPP par la méthode (P&O).

CHAPITRE 1 : GENERALITE SUR SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

L'organigramme suivant représente le principe de l'algorithme P&O

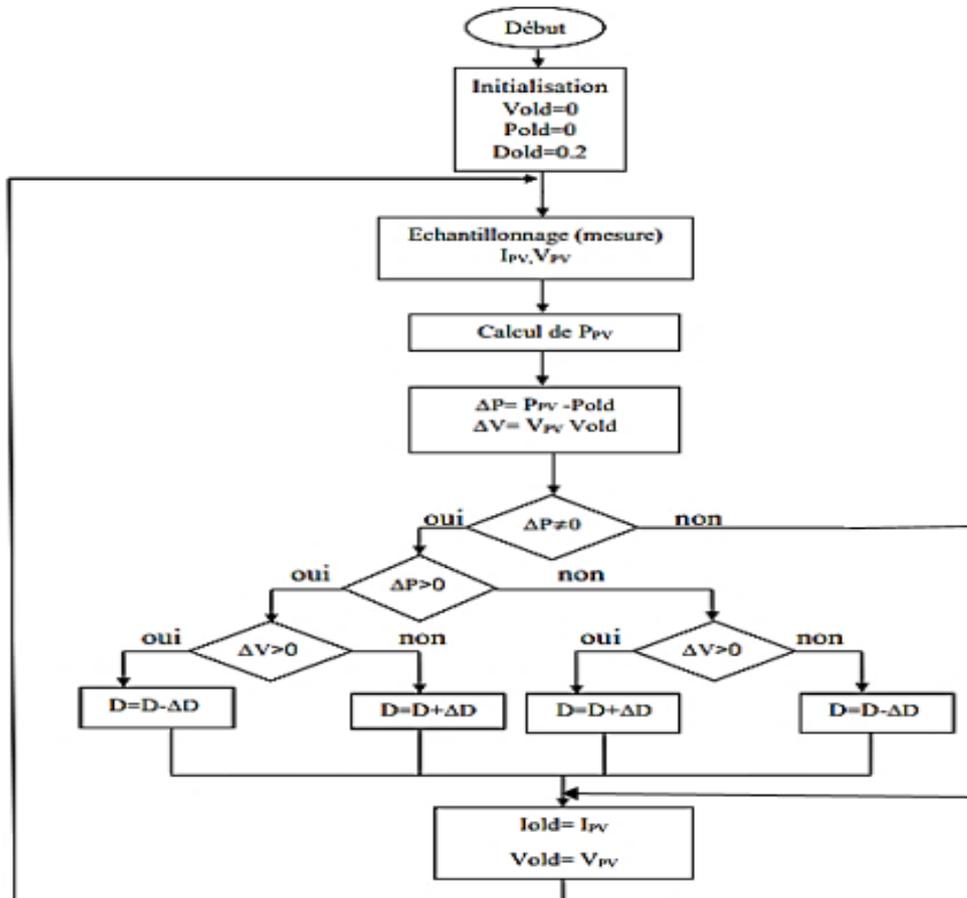


Figure (1- 25): L'organigramme de la méthode P&O.

La première étape consiste tout d'abord à mesurer la tension V et le courant I afin de déterminer la puissance P , un paramètre crucial du système. Ensuite, la valeur de puissance P obtenue est ensuite comparée à la valeur de puissance enregistrée lors de la mesure précédente, afin d'évaluer tout changement. En cas d'augmentation de la puissance générée par le panneau depuis la dernière mesure, les ajustements du rapport cyclique d seront effectués dans le même sens que lors du cycle précédent, et ce processus est effectué via le test dV , garantissant une approche systématique du suivi et de la gestion des variations de puissance.

Si la variation $\Delta V > 0$, cela indique que la valeur de V a été augmentée au cours du cycle précédent, exprimée spécifiquement sous la forme $D_{i+1} = D_i + \Delta D$.

À l'inverse, si la variation $\Delta V < 0$, cela signifie que la valeur de V a été diminuée au cours du cycle précédent, spécifiquement exprimée sous la forme $D_{i+1} = D_i - \Delta D$.

CHAPITRE 1 : GENERALITE SUR SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

Ainsi, on arrive à la fin de la trajectoire où P continue d'augmenter. En cas de baisse de la puissance fournie par le panneau depuis la dernière mesure, le rapport cyclique d augmentera ou diminuera en sens inverse par rapport au dernier cycle, ce qui est également mesuré par le test sur dV . À chaque cycle, cet algorithme perturbe la tension de fonctionnement V . Après avoir atteint le MPP, V oscillera autour du point de fonctionnement optimal V_{mp} . Cependant, cela entraîne des pertes de puissance qui varient en fonction de la largeur du pas lorsque ΔD est perturbé.

Si la largeur du pas est grande, l'algorithme de MPPT répondra rapidement aux changements soudains mais occasionnera des pertes dans des conditions changeantes lentement et dans les états stables. Si la largeur du pas est très petite les pertes dans les états stables où les conditions changeantes lentement seront réduites, mais le système aura une réponse lente aux changements rapides de la température ou d'insolation [20].

1.8. CONCLUSION

Ce chapitre offre une exploration approfondie des systèmes photovoltaïques, des convertisseurs DC-DC et de la commande MPPT, en explorant les concepts théoriques sous-jacents, les éléments essentiels et les applications spécifiques de ces technologies cruciales pour l'avenir de notre approvisionnement énergétique. Les systèmes photovoltaïques sont présentés comme une solution prometteuse pour répondre aux besoins énergétiques tout en réduisant notre empreinte environnementale. Les convertisseurs DC-DC jouent un rôle essentiel dans la transformation de l'énergie solaire en une forme compatible avec les exigences de charge et de stockage, et la commande MPPT optimise en temps réel le point de fonctionnement des panneaux solaires pour obtenir le maximum de puissance disponible. En résumé, ce chapitre présente une exploration approfondie des systèmes photovoltaïques, des convertisseurs DC-DC et de la commande MPPT, offrant une compréhension approfondie de ces technologies cruciales pour l'avenir de notre approvisionnement énergétique.



**CHAPITRE 2 : SYNTHÈSE ET
SIMULATION D'UNE COMMANDE
MPPT P&O**

2.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous examinons le processus de conception d'un contrôleur MPPT (Maximum Power Point Tracking) pour les générateurs photovoltaïques (PV). Étant donné que la puissance maximale et la tension optimale d'un générateur PV ne sont pas prédéterminées, les contrôleurs MPPT sont essentiels pour extraire le maximum de puissance du système. Nous présentons initialement la conception d'un contrôleur MPPT basé sur la méthode P&O (Perturb and Observe) fondamentale à l'aide de MATLAB. Ensuite, nous améliorons cette méthode en intégrant un filtre FIR pour améliorer la stabilité et la précision du contrôle, afin d'optimiser davantage la puissance extraite du générateur PV. Cette approche globale vise à garantir une utilisation optimale de l'énergie solaire captée par le générateur PV, contribuant ainsi à l'amélioration de l'efficacité énergétique et de la performance des systèmes photovoltaïques.

2.2. MATLAB & SIMULINK

Dans les années 1970, Cleve Moler, professeur de mathématiques, a initié des travaux à l'Université du Nouveau-Mexique puis à Stanford, conduisant au développement de MATLAB, un logiciel de calcul numérique. Conçu par MathWorks, MATLAB, contraction de "Matrix Laboratory", répond à divers besoins en programmation et calculs numériques, émulant un langage de script dans un environnement de développement intégré (IDE). Ses fonctionnalités comprennent la manipulation de matrices, le développement et l'exécution d'algorithmes, la création d'interfaces utilisateur et la visualisation des données, avec une interface conviviale incluant une fenêtre de console interactive. Avec une base d'utilisateurs d'environ 4 millions en 2019, MATLAB est largement utilisé dans des domaines variés tels que l'ingénierie, les sciences et l'économie, offrant également une interface avec d'autres langages de programmation, ce qui en fait un outil polyvalent pour les développeurs [21].

Simulink, édité par The MathWorks, est un logiciel de modélisation système multi-physique. Il offre une plateforme de simulation multi-domaine et de modélisation de systèmes dynamiques. Simulink propose un environnement graphique avec des bibliothèques de blocs de modélisation permettant le design précis, la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communications et de traitement du signal. Intégré à MATLAB, Simulink offre un accès immédiat aux outils de développement algorithmique, de visualisation et d'analyse de données de MATLAB [21].

CHAPITRE 2 : SYNTHSE ET SIMULATION D'UNE COMMANDE MPPT

2.3. IMPLEMENTATION D'UNE COMMANDE MPPT P&O DE BASE SUR MATLAB SIMULINK

Le système PV comprend un panneau photovoltaïque captant l'énergie solaire, connecté à un convertisseur élévateur continu-continu et à une commande MPPT. Avec une charge résistive est utilisée pour dissiper l'énergie excédentaire lorsque la demande est faible.

2.3.1. Le Panneau Photovoltaïque

Le modèle du panneau photovoltaïque choisi dans MATLAB Simulink est le module Sun Power SRP-315EWHT-D. Ce modèle est configuré pour fonctionner à une température constante de 25°C avec des conditions d'irradiation variables (1000-800-600 w/m²).

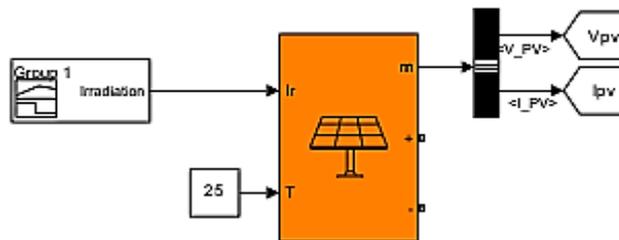


Figure (2- 1): Modèle panneau photovoltaïque sur Simulink.

Tableau (2- 1): Caractéristiques électriques du module PV.

Module :	SRP-315EWHT-D
Chaînes en parallèle	1
modules connectés en série par chaîne	1
Nombre de cellule par module	96
Courant optimale (Imp)	5.76 A
Tension optimale (Vmp)	54.7 V
Puissance maximale (Pmax)	315.072 W
Courant de court-circuit (Icc)	6.14 A
Tension de circuit ouvert (Vco)	64.6 V
Coefficient de température de Icc	0.061743 %/deg.C
Coefficient de température de Voc	-0.2727 %/deg.C

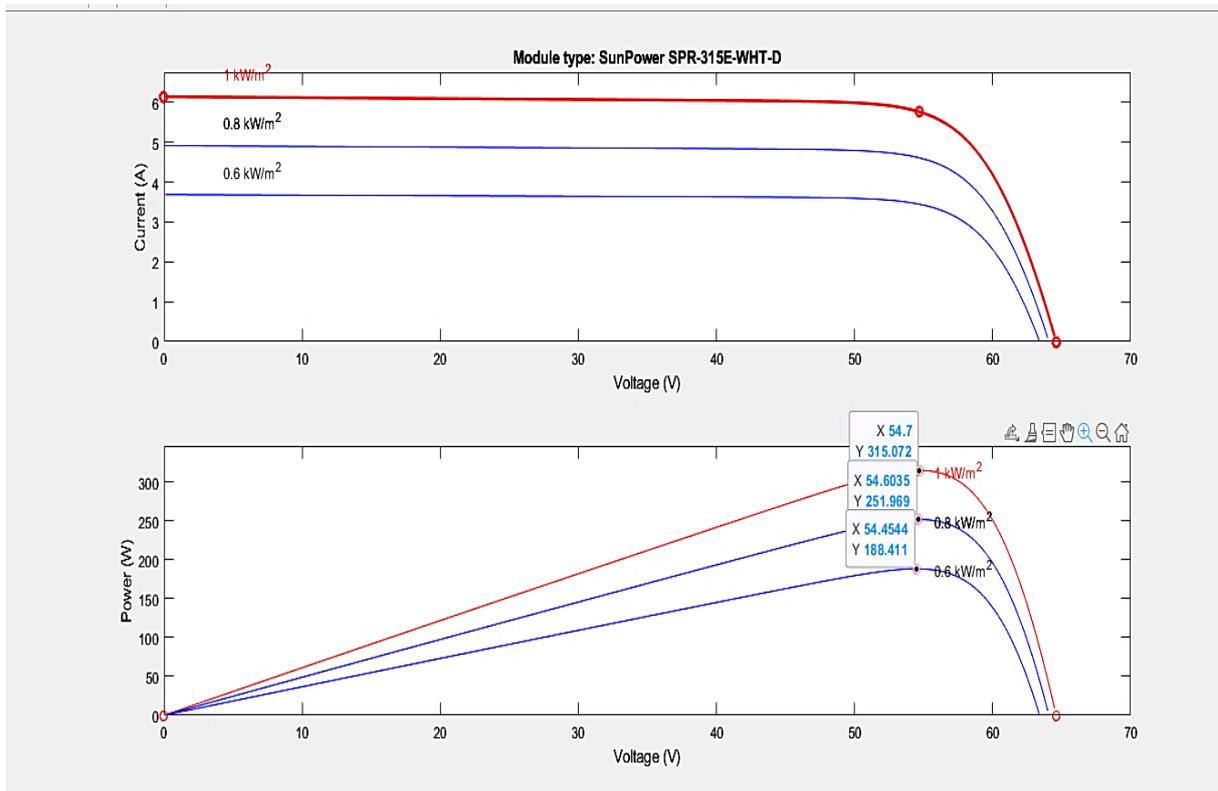


Figure (2- 2): Caractéristiques I-V et P-V du module PV utilisé.

2.3.2. Le Convertisseur Elévateur (Boost)

Le convertisseur DC/DC est utilisé pour transmettre la puissance du panneau solaire du côté de la charge, garantissant ainsi la puissance maximale transmise. Cet ajustement est réalisé par modulation de la largeur d'impulsion (PWM). Le dispositif de commutation est un MOSFET ou IGBT. La puissance maximale est atteinte en utilisant un algorithme MPPT qui ajuste le rapport cyclique du convertisseur. Ce schéma réalisé sur Matlab Simulink. Ainsi que les valeurs des composants électroniques utilisés (Diode, IGBT, Condensateur, charge) sont données par le tableau :

Tableau (2- 2): Les valeurs des composants du convertisseur boost.

Composants	C _{in} (F)	L (H)	C _{out} (F)	R _{ch} (ohm)
Valeurs	100e-6	5e-3	6e-4	20

CHAPITRE 2 : SYNTHSE ET SIMULATION D'UNE COMMANDE MPPT

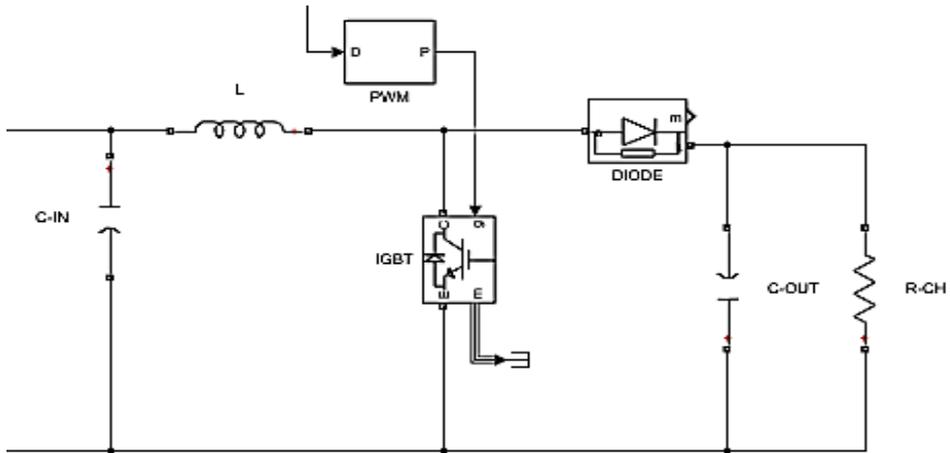


Figure (2- 3): Modèle boost sur Simulink.

2.3.3. Contrôleur PWM

Nous avons utilisé un régulateur de charge PWM selon les paramètres suivants :

Tableau (2- 3): les parametres choisi de régulateur de charge PWM.

Paramètres	Valeurs
Switching frequency (Hz)	5000
Sample time	5e-6

2.3.4. Le Schéma De La Commande P&O Sur Matlab Simulink

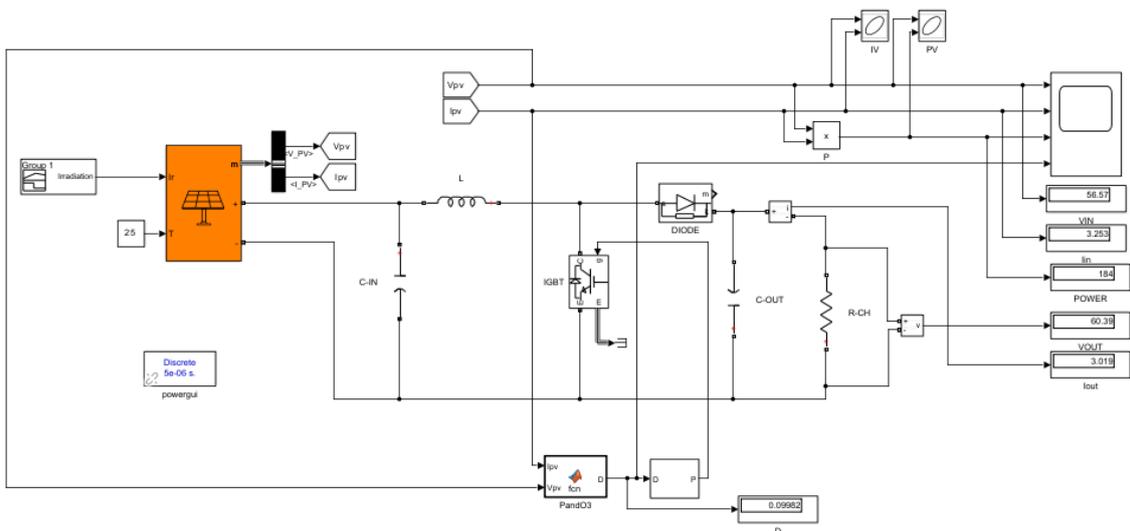


Figure (2- 4): schéma de la commande P&O sur Matlab Simulink.

2.3.5. Résultat Et Interprétation

Les courbes de tension, courant et puissance du panneau photovoltaïque (PV) en fonction du temps montrent les effets des variations d'éclairement sur le comportement du générateur photovoltaïque.

➤ La tension (V_{pv}) :

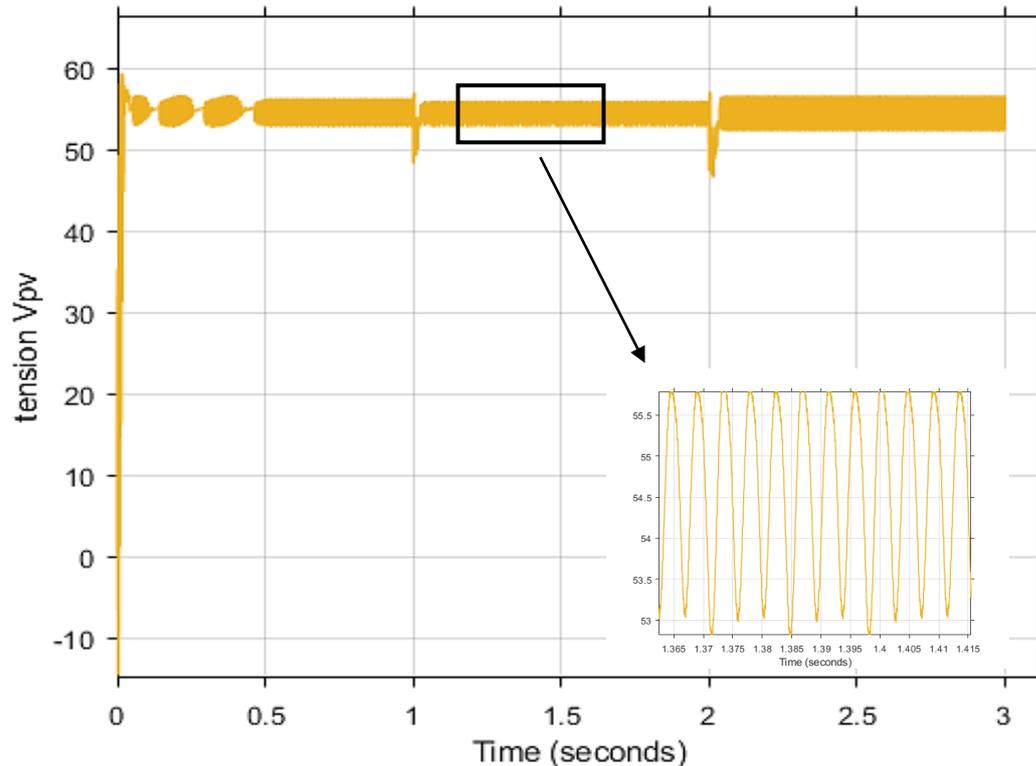


Figure (2- 5): La variation de la tension (V) en fonction du temps (s).

- **Observations** : La tension du panneau PV reste relativement stable malgré les changements d'éclairement. Bien que la tension varie légèrement, elle ne suit pas les mêmes variations importantes que le courant et la puissance.
- **Analyse** : La stabilité relative de la tension montre que le système MPPT maintient la tension à un niveau proche de la valeur optimale pour maximiser la puissance, indépendamment des variations d'éclairement. Cette stabilité est cruciale pour la performance globale du système.

➤ Le Courant (I_{pv}) :

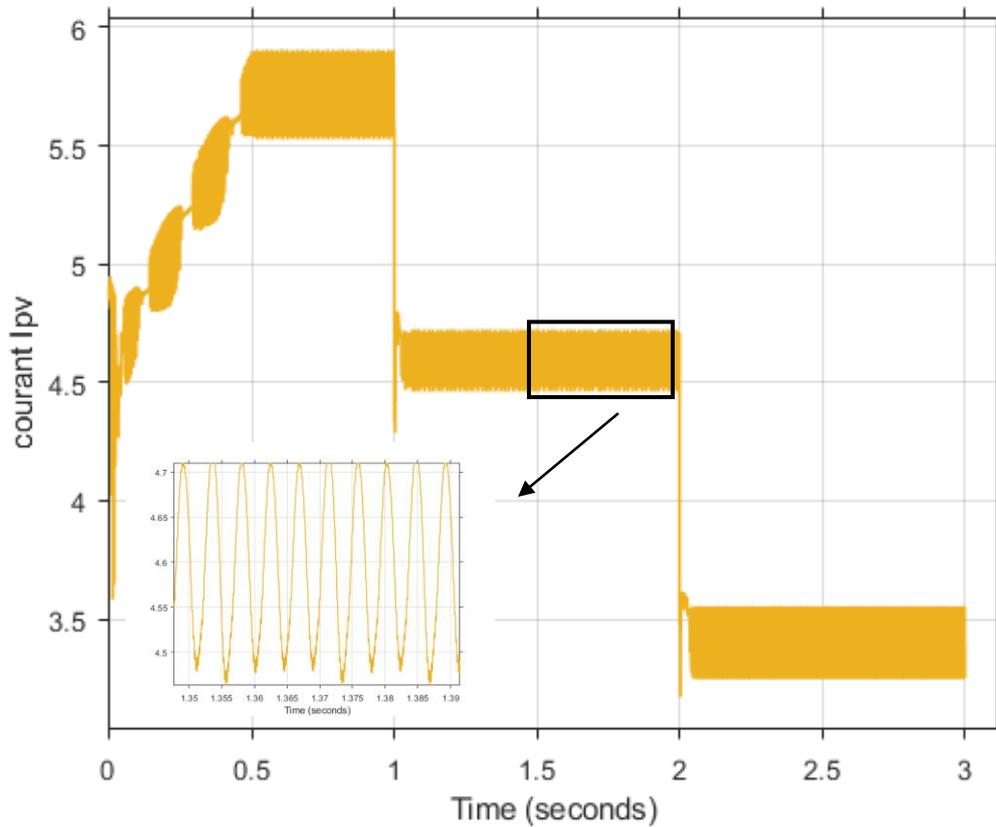


Figure (2- 6): La variation du courant (A) en fonction du temps (s).

- **Observations** : Le courant du panneau PV varie de manière similaire à la puissance. Une augmentation de l'éclairement entraîne une augmentation du courant, et vice-versa.
- **Analyse** : Cette relation directe entre le courant et l'éclairement est conforme aux équations du modèle PV, où le courant de sortie est proportionnel à l'éclairement. Le courant suit donc fidèlement les variations d'éclairement, ce qui est essentiel pour l'efficacité du système.

➤ La puissance (P_{pv})

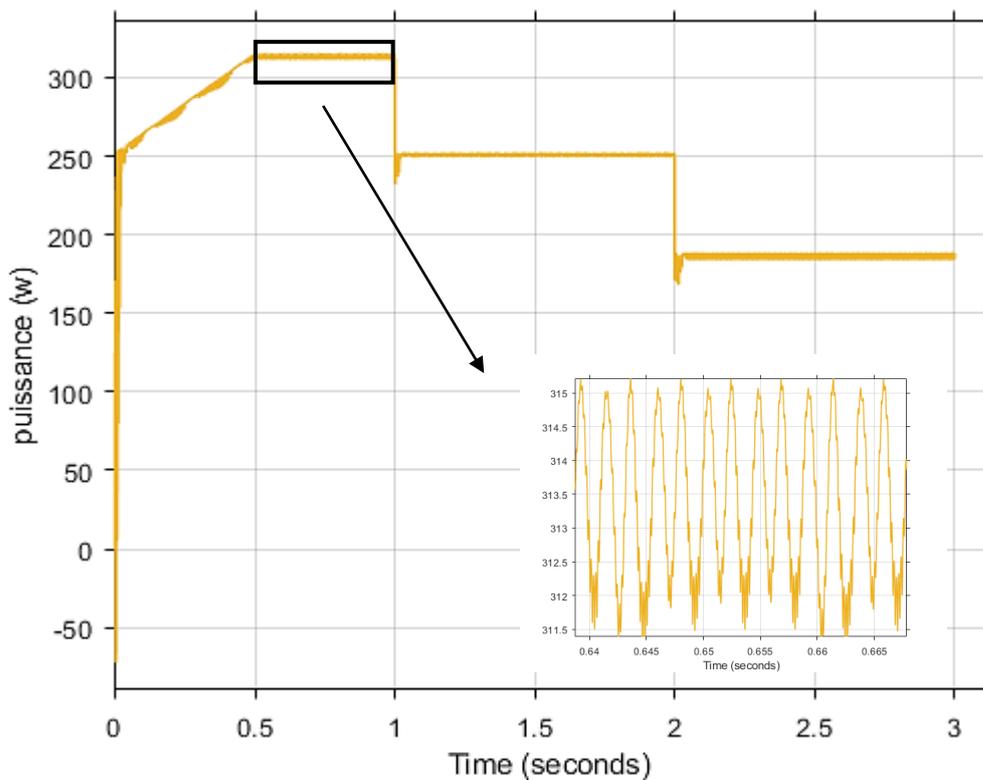


Figure (2- 7): La variation de la puissance (W) en fonction du temps (s).

- **Observations** : La puissance extraite du panneau PV suit fidèlement les changements d'éclairement, avec un léger retard dû à l'inertie du système. Lorsque l'éclairement augmente, la puissance extraite augmente rapidement pour atteindre une nouvelle valeur maximale. Inversement, quand l'éclairement diminue, la puissance chute pour s'adapter aux nouvelles conditions.
- **Analyse** : Cette réponse rapide et adaptée aux variations d'éclairement montre l'efficacité de la commande MPPT P&O à maximiser l'extraction de puissance du panneau PV. Le léger retard observé est typique des systèmes de contrôle en raison de l'inertie inhérente aux composants.

➤ Le rapport cyclique (D)

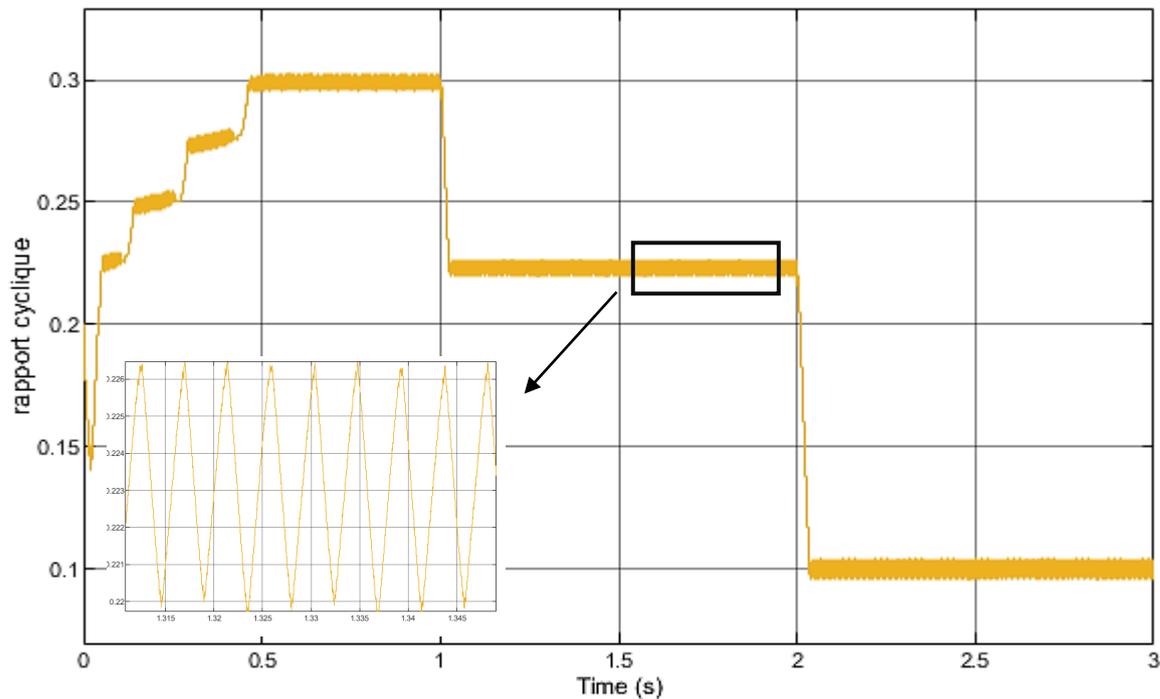


Figure (2- 8): La variation du rapport cyclique en fonction du temps (s).

Le rapport cyclique du convertisseur boost, contrôlé par l'algorithme MPPT P&O, est représenté en fonction du temps.

- **Observations :** Le rapport cyclique s'ajuste continuellement pour maintenir le fonctionnement au point de puissance maximale (MPP) malgré les variations d'éclairement
- **Analyse :** Ces ajustements constants du rapport cyclique permettent de maintenir le panneau PV à son MPP. Les oscillations autour de la valeur moyenne sont une caractéristique de la méthode P&O, qui utilise des perturbations périodiques pour déterminer la direction de variation de la puissance et ajuster en conséquence. Ces oscillations sont nécessaires pour que l'algorithme puisse dynamiquement rechercher et suivre le MPP, malgré les variations d'éclairement.

➤ Remarque :

Dans le contexte de la commande MPPT P&O, le facteur de perturbation (ΔV) joue un rôle crucial. Ce facteur est utilisé pour perturber le système en modifiant légèrement la tension pour évaluer la direction dans laquelle la puissance augmente ou diminue, permettant ainsi à l'algorithme de rechercher et de suivre le point de puissance maximale (MPP) du panneau PV. Cependant, des changements rapides d'irradiance et de température peuvent perturber le fonctionnement de l'algorithme, entraînant des oscillations autour du MPP.

En effet, les variations brusques d'irradiance et de température peuvent induire des fluctuations rapides de la puissance produite par le panneau solaire, ce qui peut impacter la réactivité de l'algorithme MPPT P&O. Ces oscillations peuvent rendre la convergence de l'algorithme plus difficile et affecter sa capacité à maintenir de manière stable le MPP en cas de perturbations externes importantes. Ainsi, le facteur de perturbation et sa sensibilité aux changements rapides d'irradiance et de température sont des éléments clés à prendre en compte lors de la conception et de l'optimisation de l'algorithme MPPT P&O pour garantir une performance efficace et stable du système de suivi du point de puissance maximale.

2.4. SYNTHSE D'UN FITRE FIR

Les filtres numériques à réponse impulsionnelle finie (RIF) sont des systèmes linéaires discrets et invariants dans le temps. Ils sont définis par une équation où une valeur de sortie, représentant un échantillon du signal filtré, est obtenue par une somme pondérée d'un nombre fini de valeurs d'entrée, correspondant aux échantillons du signal à filtrer. Les coefficients de cette somme pondérée constituent la réponse impulsionnelle du filtre, et seuls un nombre fini d'entre eux sont non nuls. Ce filtre est qualifié de « à mémoire finie », car il détermine sa sortie en fonction d'informations d'entrée limitées dans le temps. On le désigne fréquemment par le terme "filtre non récursif", en raison de sa structure qui ne nécessite pas de boucle de rétroaction, contrairement aux filtres à réponse impulsionnelle infinie (RII) [22].

Les équations suivantes montrent la fonction de transfert en z et l'équation aux différences correspondantes de la forme générale d'un filtre RIF :

$$H(z) = \sum_{i=0}^{N-1} b_i \cdot z^{-i} \quad (2-1)$$

$$y(n) = \sum_{i=0}^{N-1} b_i \cdot x(n-i) = \sum_{i=0}^{N-1} h(i) \cdot x(n-i) \quad (2-2)$$

Ou N : Nombre de coefficients (ordre du filtre) et b_i : Coefficients de la fonction de transfert du filtre.

CHAPITRE 2 : SYNTHSE ET SIMULATION D'UNE COMMANDE MPPT

Les filtres numériques peuvent être réalisés à l'aide de trois éléments ou opérations de base. Soit l'élément gain, l'élément de sommation et le retard unitaire. Ces éléments sont suffisants pour réaliser tous les filtres numériques linéaires possibles [23].

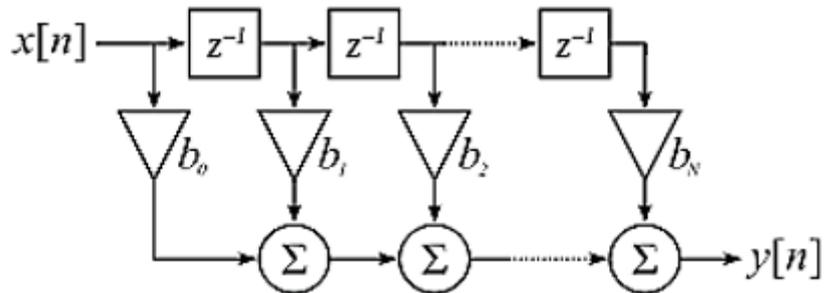


Figure (2- 9): Réalisation directe de type 1 d'un filtre FIR.

Les filtres RIF ne sont réalisables que dans le domaine discret. Par conséquent, leurs méthodes de synthèse ne sont pas dérivées des filtres analogiques. On distingue trois principales méthodes, dont deux seront détaillées dans les sections suivantes [23]:

- La méthode des fenêtres.
- La méthode de l'échantillonnage en fréquence.
- Méthodes d'optimisation

➤ Propriétés et Caractéristiques des filtres RIF

Les filtres RIF présentent des propriétés intrinsèques qui les distinguent et les rendent particulièrement adaptés à diverses applications [24]:

- **Stabilité Garantie :** Les filtres RIF offrent une stabilité inébranlable, indépendamment des coefficients utilisés, assurant ainsi la fiabilité de leurs performances.
- **Complexité Réduite :** Comparativement aux filtres RII de même ordre, les filtres RIF sont caractérisés par une complexité moindre. Cette caractéristique les rend idéaux pour les plateformes à puissance de calcul limitée, où l'efficacité des ressources est cruciale.
- **Moins Sensibles aux Erreurs de Quantification :** Du fait de l'absence de récursivité, les filtres RIF présentent généralement une sensibilité moindre aux erreurs de quantification que les filtres RII, minimisant ainsi l'impact des erreurs cumulatives sur la qualité du filtrage.

CHAPITRE 2 : SYNTHSE ET SIMULATION D'UNE COMMANDE MPPT

- **Sélectivité Atténuée** : Contrairement aux filtres RII, les filtres RIF exhibent une sélectivité plus modérée. La transition entre la bande passante et la bande rejetée est moins abrupte, offrant ainsi une atténuation plus progressive des fréquences non désirées.
- **Symétrie et Déphasage Contrôlés** : Les filtres RIF peuvent présenter une réponse impulsionnelle symétrique, induisant un retard temporel sur le signal sans introduire de déphasage notable, offrant ainsi une meilleure préservation de la phase du signal en sortie.

2.5. Implémentation d'une commande P&O avec un filtre FIR sur MATLAB SIMULINK

2.5.1. Synthèse D'une Commande P&O Avec Filtrage FIR

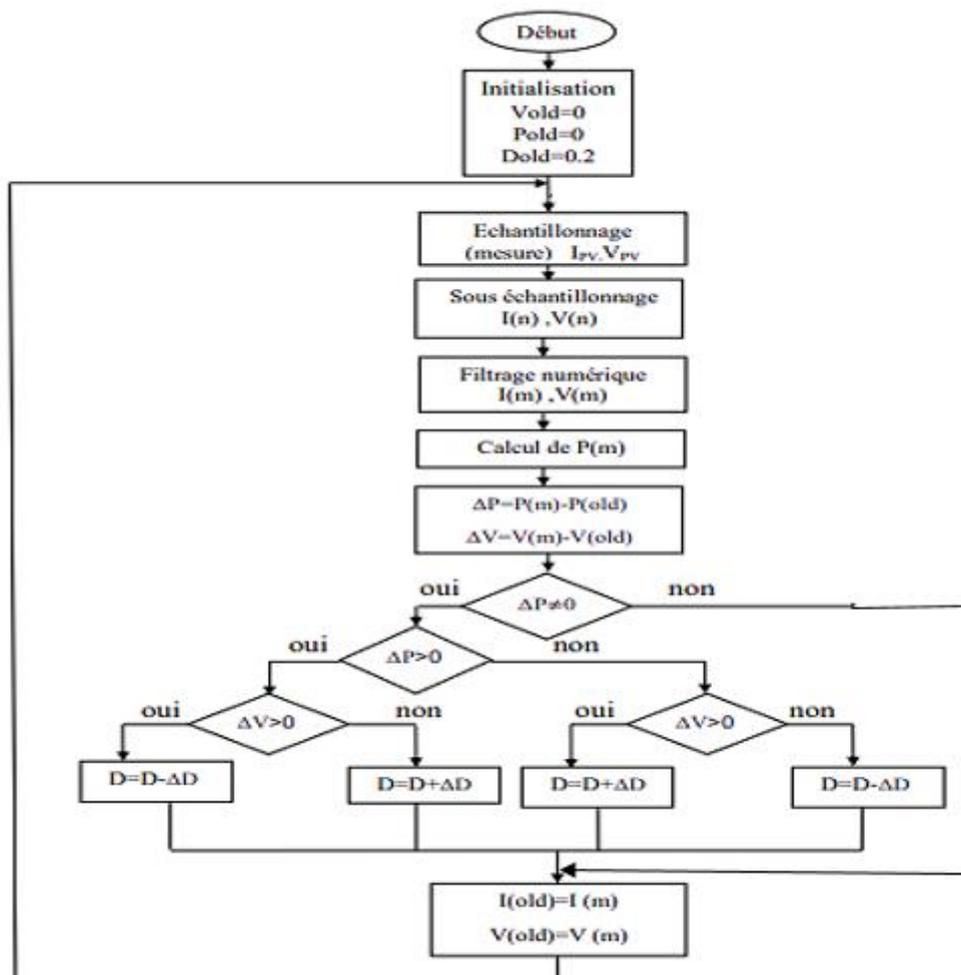


Figure (2- 10): Organigramme de l'algorithme P&O avec un filtre.

2.5.2. Conception Des Coefficients Et Le Filtre FIR

Dans cette partie, nous avons élaboré un filtre FIR. D'abord, nous avons créé les coefficients h à l'aide de Matlab, comme le montre le programme suivant :

```
clear all;
close all;
% Paramètres du filtre
Fc = 1000; % Fréquence de coupure en Hz
Fs = 100000; % Fréquence d'échantillonnage en Hz
R1 = 5e-3; % Ripple dans la bande passante
R2 = 5e-3; % Ripple dans la bande de coupure
N = 15; % Nombre de coefficients du filtre (ordre du filtre)
F0 = Fc / (Fs / 2); % Fréquence normalisée
% Conception du filtre FIR avec firceqrip
Hi = firceqrip(N, F0, [R1 R2], 'passedge')
% Calcul de la réponse en amplitude
Hb = abs(Hi);
% Initialisation des variables
minH = min(Hb);
maxH = max(Hb);
% Tri des coefficients pour trouver la différence minimale
Hbs = sort(Hb(1:(N+1)/2));
DifHb = diff(Hbs);
MinDif = min(DifHb);
% Calcul du nombre de bits nécessaires
nn = ceil(log2(maxH / MinDif));
n = nn;
n = 12; % Fixation de n à 12 bits
m = n + 1;
mn = n * 2 + 1; % Les signaux Mi
% Quantification des coefficients
H = Hb * (2^(n+1)); % n bits + 1 bit pour les multiplications avec signe
Hbin = dec2bin(H, m); % Conversion en binaire
Hb2d = bin2dec(Hbin); % Conversion en décimal
Hd = Hb2d' / (2^n); % Normalisation des coefficients
% Affichage des coefficients quantifiés
disp('Coefficients quantifiés:');
disp(Hd);
```

2.5.3. Le Schéma Du Système PV Avec La Commande P&O Avec Filtrage FIR Sur Simulink

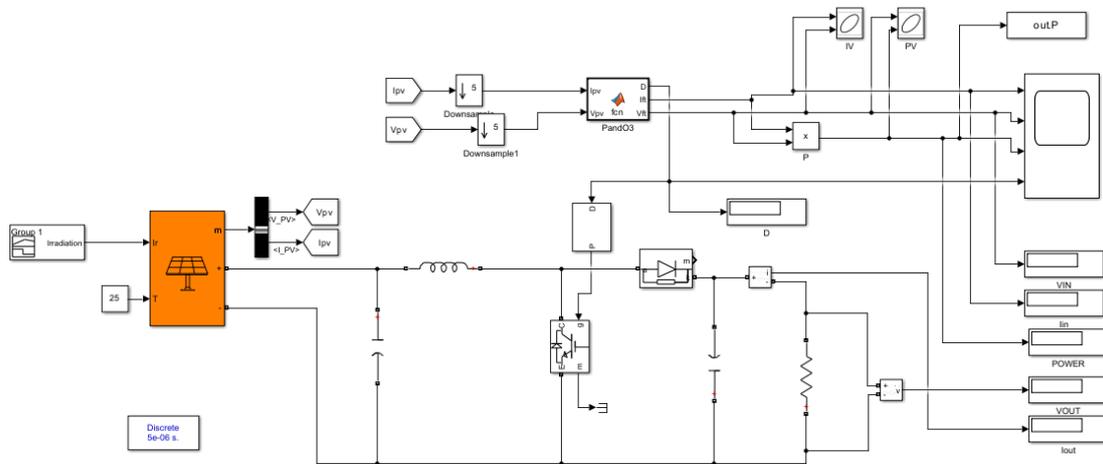


Figure (2- 11): Le schéma Simulink du système PV avec la commande P&O avec filtrage FIR.

2.5.4. Résultat Et Interprétation

➤ Le Courant Filtrée (Ifpv) :

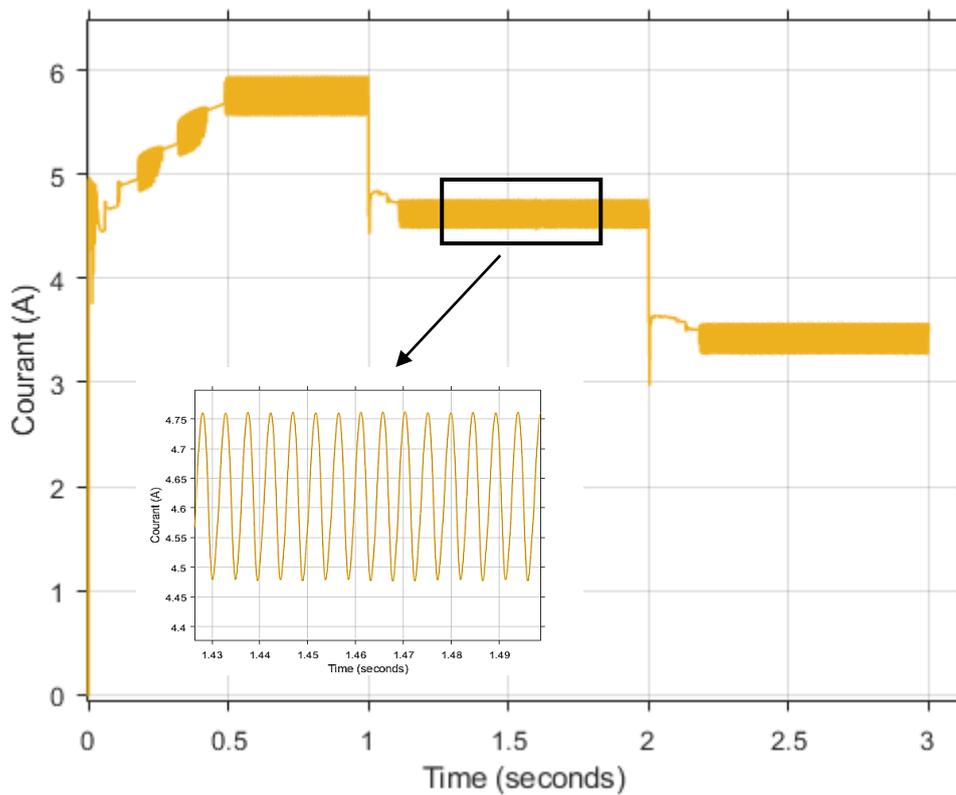


Figure (2- 12): La variation de courant filtrée (A) en fonction du temps (s)

CHAPITRE 2 : SYNTHSE ET SIMULATION D'UNE COMMANDE MPPT

- **observation:** La courbe de courant filtrée montre des variations beaucoup moins brusques par rapport à celle sans filtre. Le courant reste relativement stable avec moins de pics et de creux.
- **Analyse:** La réduction des fluctuations du courant indique que le système subit moins de perturbations internes et externes, ce qui réduit les pertes énergétiques et les contraintes sur les composants électroniques. . En réduisant les oscillations du courant, le filtre FIR aide à maintenir une alimentation en courant plus régulière et fiable, un courant plus stable améliore également la précision du suivi du MPP, contribuant ainsi à une meilleure efficacité du système global.

➤ La Tension Filtrée (V_{fpv}) :

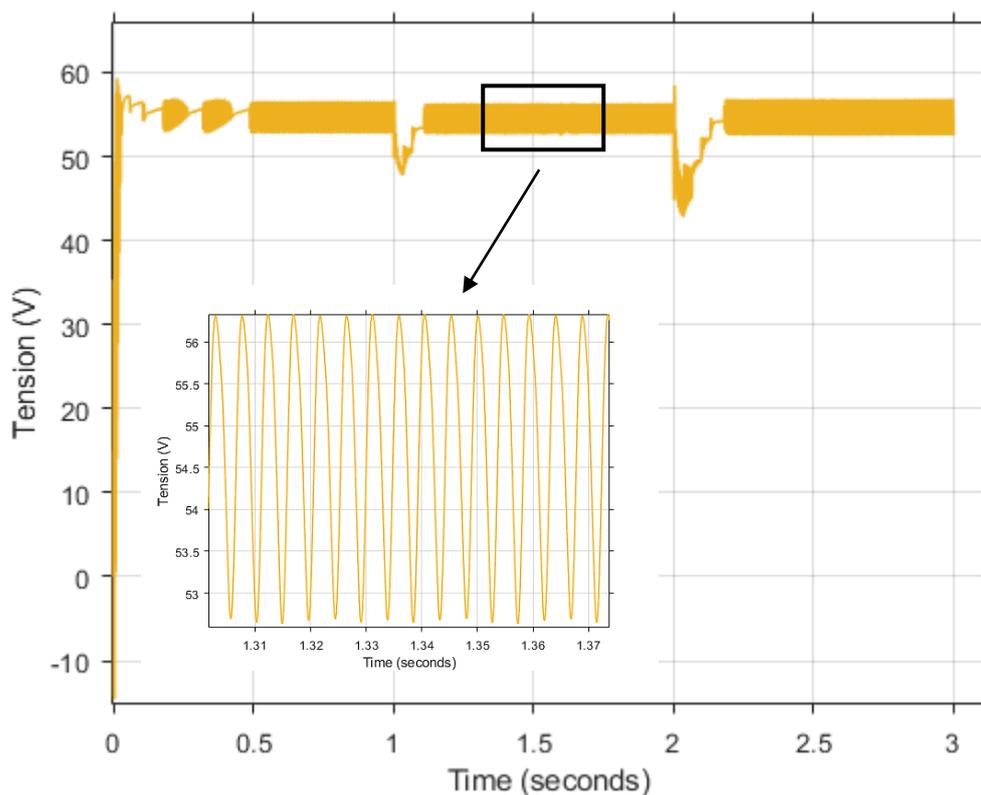


Figure (2- 13): La variation de la tension filtrée (V) en fonction du temps (s).

- **Observation:** La courbe montre une tension plus lissée et moins fluctuante après l'application du filtre FIR. Les pics de tension observés sans filtre sont significativement réduits.

CHAPITRE 2 : SYNTHSE ET SIMULATION D'UNE COMMANDE MPPT

- **Analyse:** En analyse cette courbe, on remarque que la tension devient plus stable avec des fluctuations réduites. La diminution des variations rapides permet une meilleure régulation de la tension de sortie, essentielle pour optimiser la performance du MPPT. Cette stabilité accrue de la tension contribue directement à l'efficacité énergétique globale du système photovoltaïque en permettant un suivi plus précis du point de puissance maximale (MPP).

➤ Puissance filtré (P_{fpv}) :

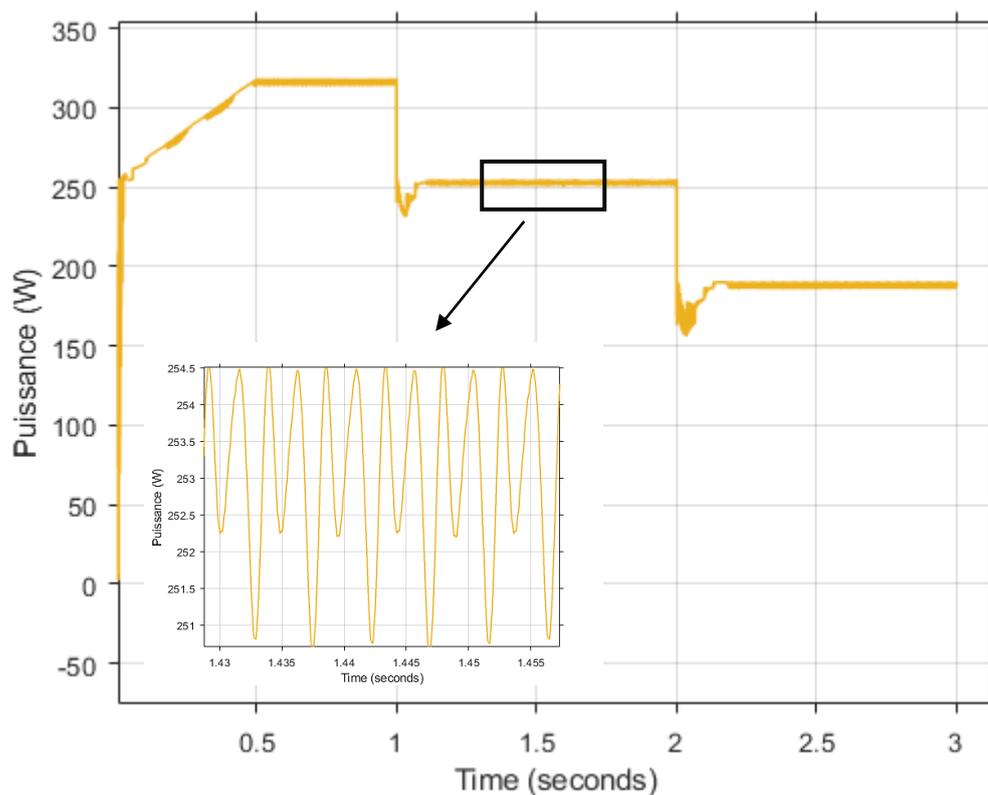


Figure (2- 14): La variation de la puissance filtrée (W) en fonction du temps (s)

- **Observation:** La courbe de puissance filtrée représente la puissance électrique produite par le système après application du filtre FIR. Cette courbe montre que la puissance atteint des valeurs plus élevées et reste plus constante comparée à celle sans filtre FIR.

CHAPITRE 2 : SYNTHSE ET SIMULATION D'UNE COMMANDE MPPT

- **Analyse:** La stabilité accrue et l'augmentation des valeurs de la puissance filtrée indiquent que le système PV peut suivre et extraire plus efficacement la puissance maximale des panneaux solaires. Le filtre FIR réduit les fluctuations rapides et les bruits, ce qui permet une conversion d'énergie plus stable et plus efficace. En éliminant les fluctuations, le filtre FIR aide à maintenir la puissance proche du maximum possible, réduisant ainsi les pertes et augmentant le rendement global du système.

➤ Rapport cyclique (D) :

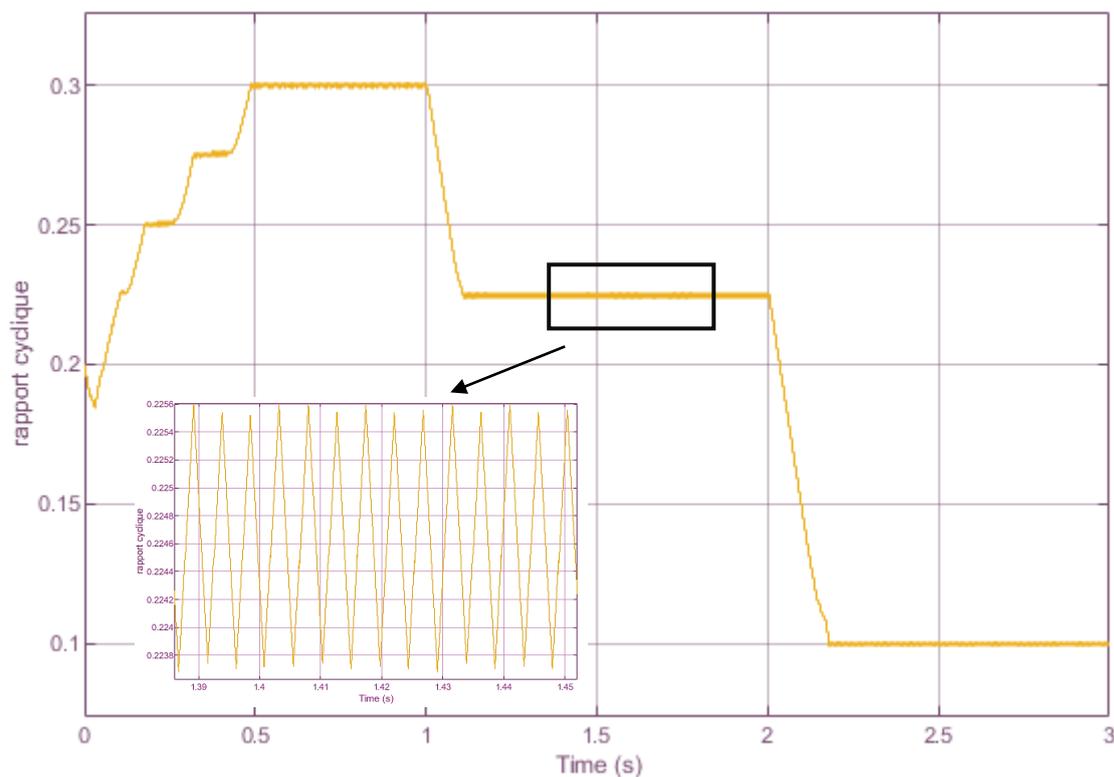


Figure (2- 15): La variation de rapport cyclique en fonction du temps (s).

- **Observation:** Le rapport cyclique avec le filtre FIR montre une moindre variabilité par rapport à celui sans filtre. Le signal est plus lisse et stable.
- **Analyse:** Un rapport cyclique stable est crucial pour la performance du convertisseur DC-DC, minimisant les pertes de commutation et assurant une meilleure régulation de la puissance transférée du panneau photovoltaïque vers la charge. Cela se traduit par une amélioration notable de la performance et de l'efficacité énergétique du système.

2.5.5. Comparaison Des Résultats Avec Et Sans Filtre

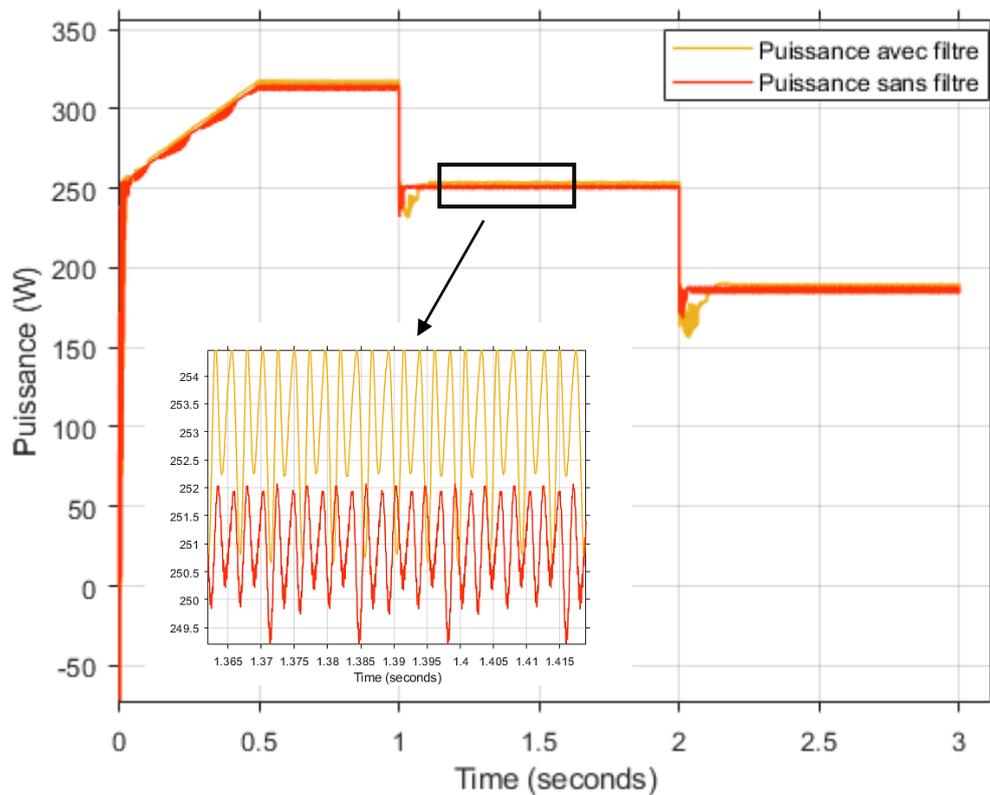


Figure (2- 16): Variation de la puissance (Watt) en fonction du temps (s) avec et sans filtre.

Tableau (2- 4): Comparaison le rendement de puissance de commande P&O avec et sans filtre.

P&O	SANS FILTRE	AVEC FLTRE
Rendement %	99.413%	99.527%

Sans le filtre FIR, le système subit des variations rapides de tension et de courant, ce qui rend le suivi du point de puissance maximale (MPP) moins précis. Les fluctuations rapides entraînent des pertes énergétiques et réduisent l'efficacité globale du système MPPT. Cette instabilité dans la puissance extraite se traduit par une performance sous-optimale et une moindre conversion énergétique.

Le rendement mesuré sans filtre FIR est de 99.413%. Les fluctuations rapides et l'instabilité de la puissance entraînent des pertes énergétiques et réduisent l'efficacité du système MPPT.

CHAPITRE 2 : SYNTHSE ET SIMULATION D'UNE COMMANDE MPPT

Le filtre FIR joue un rôle crucial en lissant les variations rapides de tension et de courant, permettant au système MPPT de suivre le MPP de manière plus précise et efficace. La stabilité accrue de la puissance extraite indique que le système est capable de maximiser la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique, réduisant les pertes et améliorant le rendement énergétique global. La constance de la puissance montre une meilleure performance du système, traduisant une exploitation optimale des panneaux photovoltaïques.

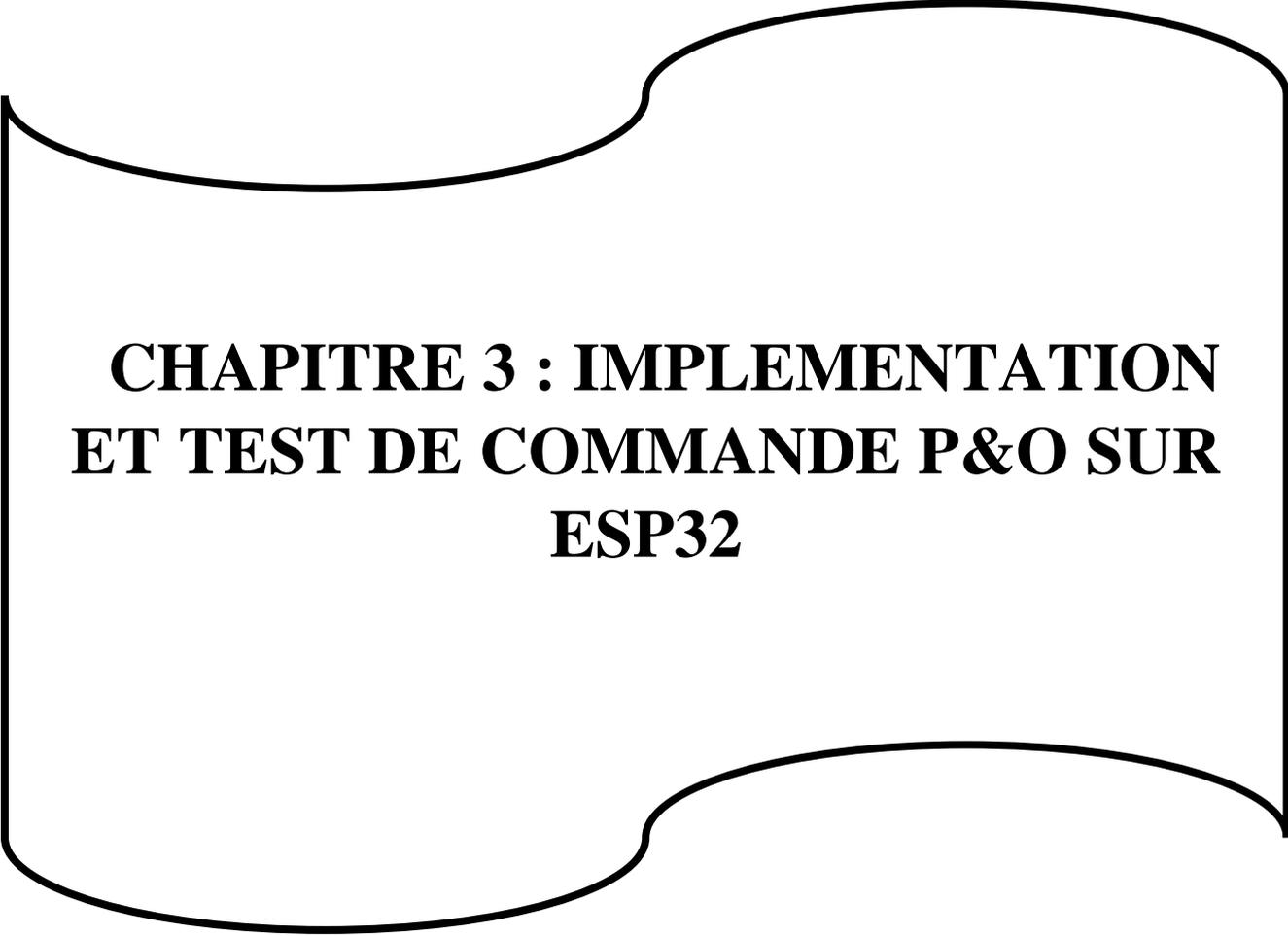
Avec le filtre FIR, le rendement augmente à 99.527%. Cette amélioration de 0.114% montre que le filtre FIR permet de stabiliser les signaux de tension et de courant, ce qui se traduit par une extraction de puissance plus efficace et une réduction des pertes énergétiques.

2.6. CONCLUSION

Ce chapitre a démontré l'importance des améliorations techniques dans les systèmes MPPT pour les applications photovoltaïques, préparant le terrain pour des développements futurs visant à rendre les énergies renouvelables plus efficaces et rentables.

Les travaux présentés dans ce chapitre confirment que l'intégration de techniques avancées comme le filtrage FIR dans les contrôleurs MPPT améliore de manière significative la performance et l'efficacité des systèmes photovoltaïques. La combinaison de la méthode P&O avec un filtre FIR permet d'atteindre un suivi plus précis et plus stable du point de puissance maximale, maximisant ainsi la conversion d'énergie solaire en énergie électrique utile.

Les résultats positifs obtenus à travers les simulations indiquent que cette approche est prometteuse pour des applications pratiques, et nous préparons ainsi la voie pour une implémentation réussie sur des systèmes PV réels dans le chapitre suivant.



**CHAPITRE 3 : IMPLEMENTATION
ET TEST DE COMMANDE P&O SUR
ESP32**

3.1. INTRODUCTION

Ce chapitre se concentre sur l'implémentation pratique de la méthode de Perturbation et Observation (P&O) sur un microcontrôleur ESP32, en quatre étapes clés. D'abord, nous adaptons le convertisseur DC-DC pour optimiser son fonctionnement avec l'ESP32, en choisissant soigneusement les composants et en configurant le circuit pour maximiser l'efficacité énergétique. Ensuite, nous détaillons l'implémentation de la commande P&O simple, couvrant les algorithmes de base, le codage et les techniques de mesure nécessaires pour un suivi précis du point de puissance maximale (MPPT). La troisième section introduit un filtre à réponse impulsionnelle finie (FIR) dans le contrôleur P&O pour améliorer la stabilité et la précision du système. Enfin, nous présentons et comparons les résultats des tests des deux implémentations (simple et avec FIR), analysant l'efficacité énergétique, la rapidité de réponse et la stabilité. Cette analyse permet de tirer des conclusions sur les avantages et les limitations de chaque approche, offrant des perspectives pour de futures améliorations des systèmes photovoltaïques.

3.2. ÉTAPES DE REALISATION ET IMPLEMENTATION

Dans cette section, nous détaillerons les étapes de réalisation et d'implémentation de notre projet. Pour ce faire, nous utiliserons divers composants et matériels spécifiques afin d'assurer la fonctionnalité et l'efficacité du système. Les principaux éléments utilisés sont :

3.2.1. Emulateur PV

Émulateur PV permet de simuler les conditions de fonctionnement d'un panneau solaire sans avoir besoin d'exposition réelle à la lumière solaire. Cela est utile pour tester des dispositifs et des systèmes dans des conditions contrôlées et permet d'évaluer les performances des systèmes connectés. Dans notre cas on a utilisé une alimentation de 24V avec une résistance de 10 ohms en série, et un interrupteur, lorsque interrupteur ouvert le courant circule à travers la résistance de 10 ohms, et dans le cas où l'interrupteur fermé la résistance est court-circuitée, permettant au courant de circuler librement.

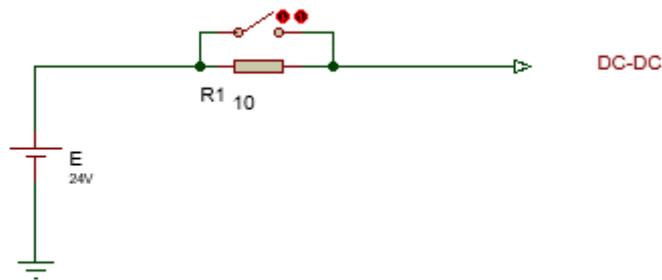


Figure (3- 1): schema de emulateur PV.

3.2.2. Microcontrôleur Wemos D1 R32 ESP32

La carte WeMOS D1 R32 ESPDuino32, dotée de Wi-Fi et Bluetooth bimode 2,4 GHz, intègre une antenne et un balun RF, un amplificateur de puissance, des amplificateurs à faible bruit, des filtres et un module de gestion de l'alimentation, minimisant ainsi l'espace occupé sur le circuit imprimé. Basée sur la technologie TSMC 40 nm, elle offre une faible consommation d'énergie et d'excellentes performances RF, ce qui la rend fiable et évolutive pour diverses applications.

Le contrôleur PWM (Pulse Width Modulation) de l'ESP32 dispose de 16 canaux indépendants, chacun pouvant être configuré pour générer des signaux PWM avec des propriétés distinctes. Tous les GPIO pouvant fonctionner comme sorties peuvent être utilisés comme broches PWM, à l'exception des GPIOs 34 à 39 qui ne peuvent pas générer de PWM. Pour définir un signal PWM, plusieurs paramètres doivent être spécifiés dans le code : la fréquence du signal, le cycle de service (duty cycle), le canal PWM et le GPIO où le signal sera émis [25].

Les caractéristiques techniques de la carte sont les suivantes : puissance d'alimentation de 5VDC, tension d'entrée de 7-12V, tension de sortie de 3,3V, courant requis minimum de 250mA, RAM de 520 Ko, mémoire flash externe de 4 Mo, 20 pins numériques et 6 pins analogiques.

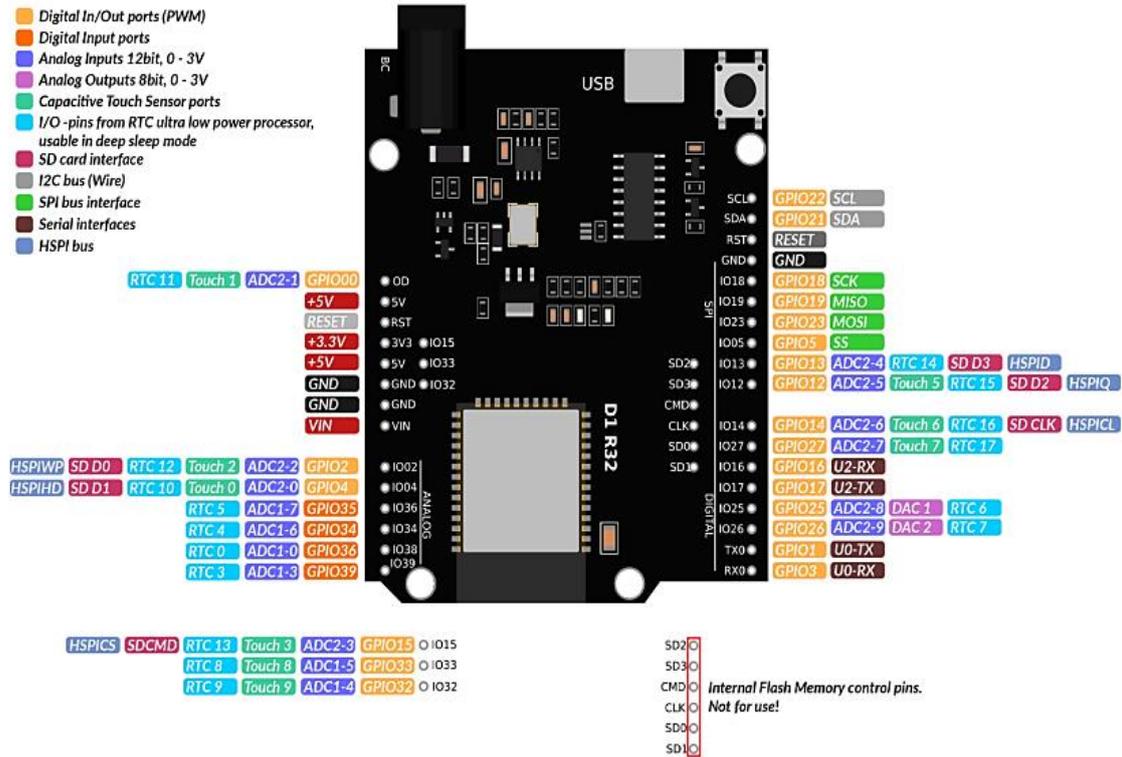


Figure (3- 2):description de la carte ESP32.

3.2.3. Convertisseur DC/DC De Type Buck XL4015

Le XL4015 est un convertisseur DC/DC abaisseur (buck) à fréquence fixe de 180 KHz, capable de piloter une charge de 5A avec une haute efficacité, un faible bruit de sortie et une excellente régulation en ligne et en charge. Nécessitant un nombre minimal de composants externes, le régulateur est simple à utiliser et inclut une compensation de fréquence interne et un oscillateur à fréquence fixe.

Le circuit de contrôle PWM est capable d'ajuster le rapport cyclique de manière linéaire de 0 à 100%. Une fonction de protection contre les surintensités est intégrée. En cas de court-circuit, la fréquence de fonctionnement sera réduite de 180KHz à 48KHz. Un bloc de compensation interne est intégré pour minimiser le nombre de composants externes nécessaires [26].

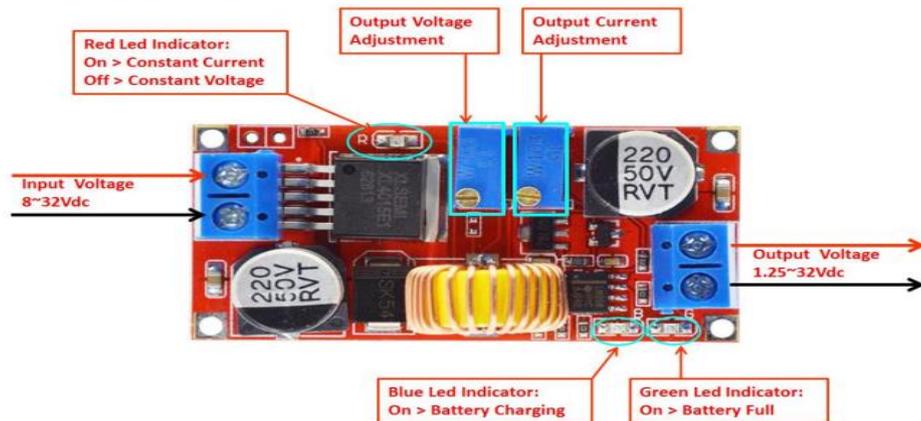


Figure (3- 3): Schéma de convertisseur buck xl4015.

➤ Caractéristiques :

- Plage de tension d'entrée étendue de 8V à 36V.
- Tension de sortie réglable de 1,25V à 32V.
- Cycle de service maximal de 100%.
- Chute de tension minimale de 0,3V.
- Fréquence de commutation fixe de 180KHz.
- Capacité de courant de sortie constant de 5A.
- MOSFET de puissance interne optimisé.
- Haute efficacité jusqu'à 96%.
- Excellente régulation en ligne et en charge.
- Fonction d'arrêt thermique intégrée.

➤ Les pins de configuration :

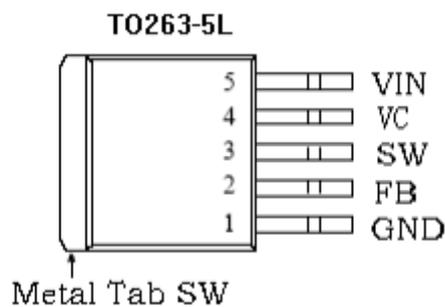


Figure (3- 4): Configurations des broches de buck xl4015.

CHAPITRE 3 : IMPLEMENTATION ET TEST DE P&O SUR ESP32

Tableau (3- 1): Description des broches.

Numéro de pin	Nom de pin	description
1	GND	Broche de mise à la terre. Il est important de soigner le tracé de cette broche. Elle doit être placée à l'extérieur du chemin de la diode Schottky vers le condensateur de sortie pour éviter que les pics de courant de commutation n'induisent du bruit de tension dans le XL4015.
2	BF	Broche de rétroaction (Feedback). À travers un réseau de résistances externe, FB détecte la tension de sortie et la régule. La tension de seuil de rétroaction est de 1,25V.
3	SW	Broche de sortie de commutation d'alimentation (Power Switch Output). SW est le nœud de commutation qui alimente la sortie en puissance.
4	VC	Capacité de dérivation de régulateur de tension interne. Dans une application système typique, la broche VC est connectée à un condensateur de 1 μ F sur VIN.
5	VIN	Broche d'entrée de tension d'alimentation. Le XL4015 fonctionne avec une tension continue de 8V à 36V. Bypasser VIN vers GND avec un condensateur suffisamment grand pour éliminer le bruit sur l'entrée.

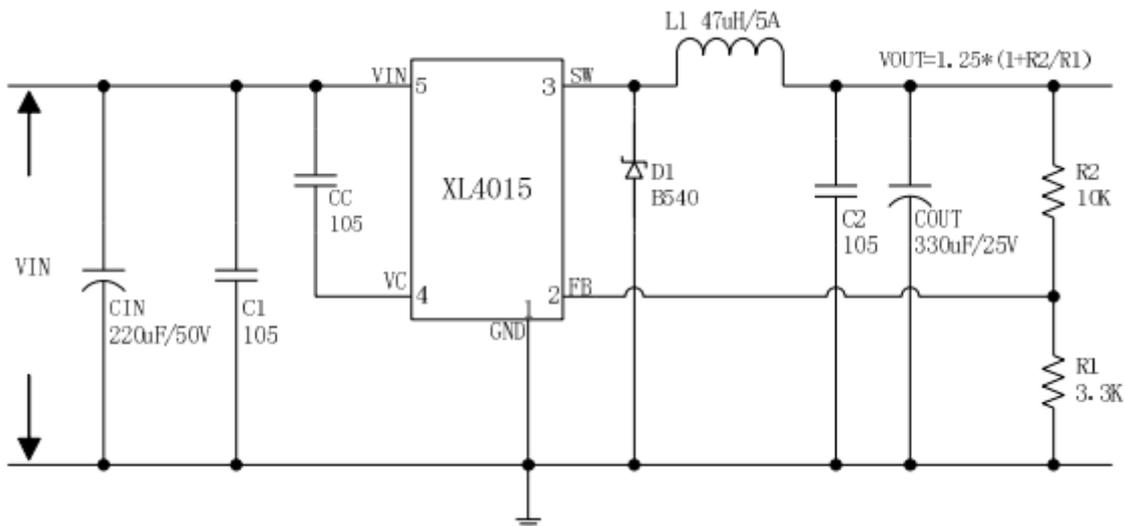


Figure (3- 5): Schéma fonctionnel de buck xl4015.

➤ Passage d'un Convertisseur DC-DC Fixe à un Convertisseur DC-DC Variable

Le passage d'un convertisseur DC-DC fixe à un convertisseur DC-DC variable implique plusieurs modifications dans la conception du circuit afin de permettre une régulation dynamique de la tension de sortie. Cette transition peut être réalisée en intégrant des composants ajustables et des mécanismes de contrôle supplémentaires.

Un convertisseur DC-DC fixe est conçu pour fournir une tension de sortie constante, indépendamment des variations de la charge ou de la tension d'entrée. La configuration typique d'un convertisseur fixe utilise un réseau de résistances fixes pour établir un rapport de division de tension précis, déterminant ainsi la tension de sortie. Dans notre réalisation en utilisant un régulateur de type XL4015, la tension de sortie est définie par un rapport de résistances (R1 et R2) connecté au pin de rétroaction (FB) du régulateur comme mentionner dans la figure suivante :

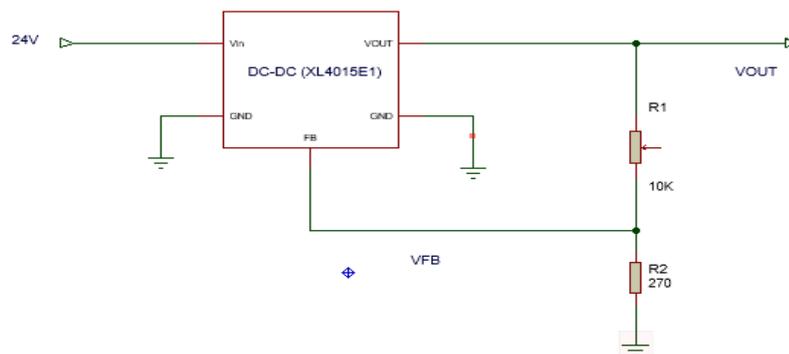


Figure (3- 6): schéma de convertisseur XL4015E1 dans le cas fixe.

Dans ce schéma (convertisseur fixe) on a:

- **DC-DC Converter** : Le module de conversion de tension DC-DC.
- **R1 et R2** : Deux résistances connectées en diviseur de tension.
- **FB (Feedback)** : La broche de rétroaction qui reçoit une fraction de la tension de sortie Vout à travers le diviseur de tension formé par R1 et R2.
- **Vout** : La tension de sortie du convertisseur est déterminée par les valeurs des résistances R1 et R2 selon la formule :

$$V_{out} = V_{ref} \left(1 + \frac{R1}{R2} \right) \quad (3-1)$$

CHAPITRE 3 : IMPLEMENTATION ET TEST DE P&O SUR ESP32

Où $V_{ref} = 1.25V$ est la tension de référence interne du module DC-DC.

Dans notre réalisation pratique le convertisseur buck XL4015E1 fournit une tension constante, ce qui peut limiter son utilisation à des appareils nécessitant cette tension spécifique. Donc, en le rendant variable pour on peut alimenter une variété d'appareils avec des exigences de tension différentes.

Pour rendre le convertisseur variable, nous avons suivi les étapes suivantes :

- **Fixation de R1** : Ajustez la résistance variable R1 à une valeur fixe (3.85k Ω) pour établir une base de tension de sortie initiale.
- **Ajout de R2** : Introduisez une résistance R3 (1k Ω) pour former un nouveau diviseur de tension avec R1 et R2.
- **Signal V-PWM** : Appliquez un signal PWM (venant à partir de circuit d'adaptation) à ce nouveau diviseur pour ajuster dynamiquement la tension de sortie. Le signal PWM modifie la tension de rétroaction (VFB), ce qui permet de varier la tension de sortie V_{out} .

La tension de sortie V_{out} peut être ajustée et calculée en utilisant la formule modifiée :

$$V_{out} = V_{ref} \left(1 + \frac{R1}{R2} \right) + (V_{ref} - V_{FB}) \frac{R1}{R3} \quad (3-2)$$

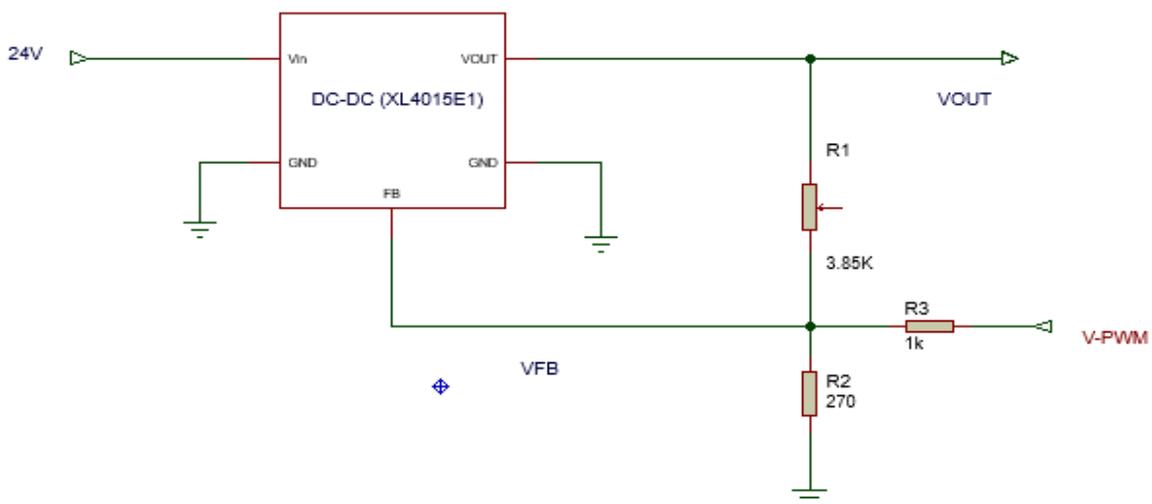


Figure (3- 7): schéma de convertisseur xl4015e1 dans le cas variable.

CHAPITRE 3 : IMPLEMENTATION ET TEST DE P&O SUR ESP32

Le graphe suivant montre la relation entre V_{fb} (tension de rétroaction) et V_{out} (tension de sortie) pour un convertisseur buck XL405E1. Les données mesurées sont représentées par des triangles bleus, et les valeurs théoriques sont tracées par une ligne rouge.

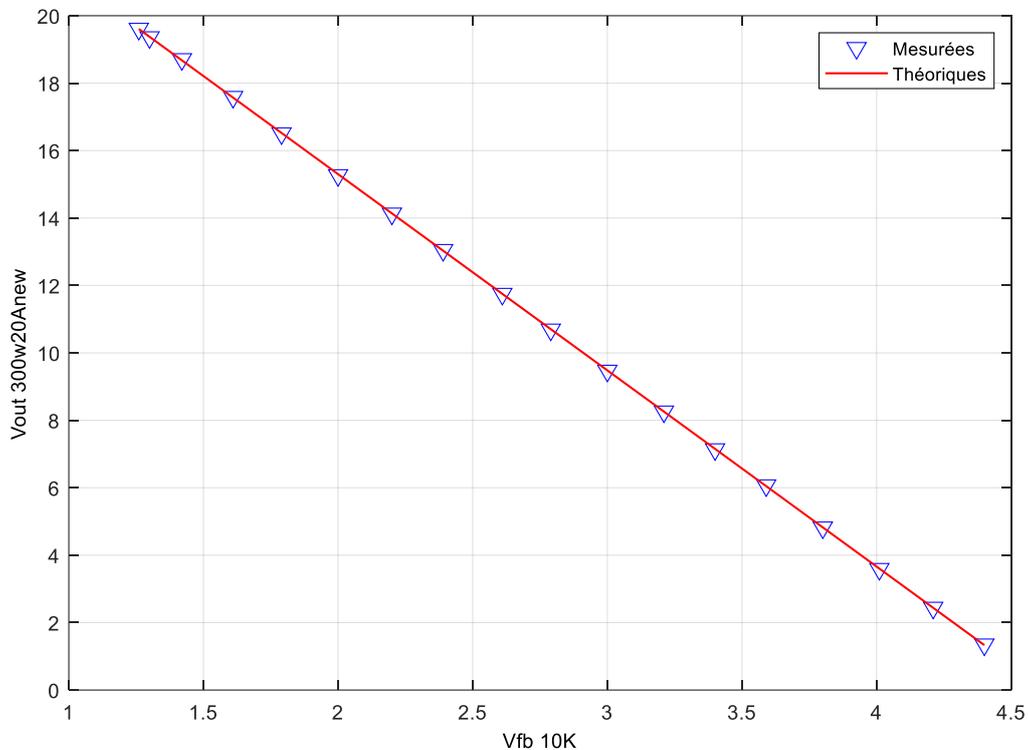


Figure (3- 8): montre la relation entre V_{fb} et V_{out} .

Le graphe montre une bonne concordance entre les valeurs mesurées et théoriques. Les points mesurés suivent de près la ligne théorique, ce qui indique que le modèle théorique est précis.

La relation inverse entre V_{out} est évidente. À mesure que V_{fb} augmente, V_{out} diminue, ce qui est typique pour de nombreux régulateurs de tension.

Le graphe confirme que le modèle théorique utilisé pour prédire V_{out} en fonction de V_{fb} est précis. Les valeurs mesurées correspondent étroitement aux valeurs théoriques, validant ainsi l'exactitude de la formule utilisée pour ce convertisseur DC-DC variable.

3.2.4. Circuit Adaptation DC-DC Et De Mesure

➤ Adaptation de Convertisseur DC-DC

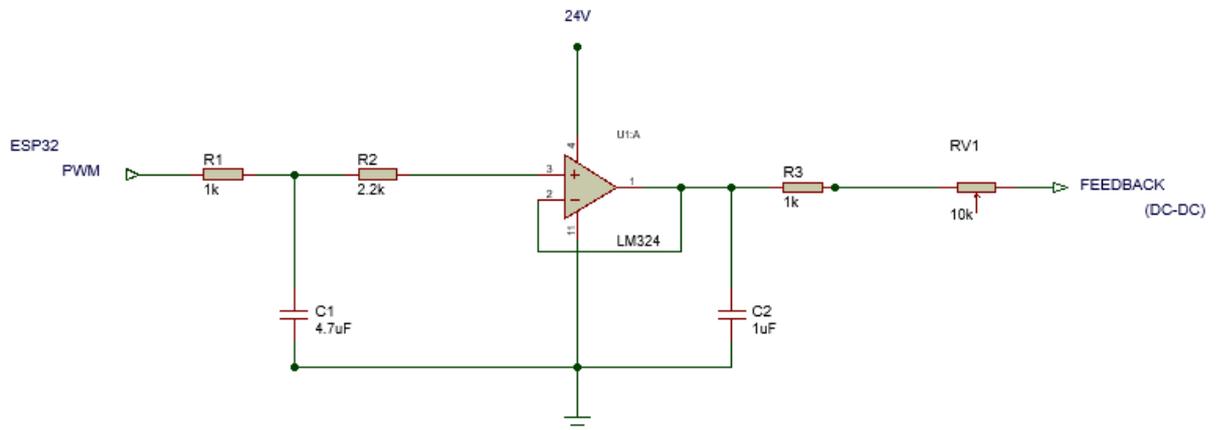


Figure (3- 9): circuit d'adaptation de convertisseur DC-DC.

Ce circuit assure une régulation précise et efficace de la tension de sortie du convertisseur DC-DC, en utilisant le signal PWM comme moyen de contrôle principal et en exploitant les propriétés des composants passifs et actifs pour garantir la stabilité et la fiabilité du système dans diverses conditions d'opération. Voici comment chaque étape contribue au fonctionnement global du système :

○ Génération du Signal PWM :

Le microcontrôleur ESP32 génère un signal PWM sous forme d'onde carrée avec des cycles de travail variables. Ce signal contrôle la puissance délivrée au convertisseur DC-DC. Le rapport cyclique du signal PWM détermine la tension moyenne délivrée à l'étape suivante du circuit.

○ Mise à l'échelle et Filtrage du Signal PWM :

Le signal PWM passe à travers un réseau diviseur de tension composé de R1 (1k Ω) et R2 (2.2k Ω). Ce réseau réduit le niveau de tension du signal PWM.

C1 (4.7 μ F) agit comme un filtre passe-bas, lissant les composants hautes fréquences du signal PWM pour produire une tension continue plus stable.

○ Traitement avec l'Amplificateur Opérationnel LM324:

Le signal filtré est injecté dans l'entrée non-inverseuse (+) de l'amplificateur opérationnel. L'amplificateur opérationnel est configuré en suiveur de tension, où l'entrée inverseuse (-) est connectée à la sortie. Cette configuration assure que la tension de sortie suit avec précision la tension d'entrée, avec une haute précision et une faible impédance.

CHAPITRE 3 : IMPLEMENTATION ET TEST DE P&O SUR ESP32

La sortie de l'amplificateur opérationnel fournit un signal de commande stable pour le convertisseur DC-DC.

○ **Rétroaction et Stabilisation :**

La sortie de l'amplificateur opérationnel est connectée à travers R3 (1k Ω) et le potentiomètre RV1 (10k Ω) à l'entrée de rétroaction (FB) du convertisseur DC-DC. C2 (1 μ F) filtre davantage le signal pour assurer sa stabilité et réduire le bruit haute fréquence. Le signal de rétroaction (FB) est surveillé pour effectuer des ajustements en temps réel au signal PWM, en fonction de la tension de sortie du convertisseur DC-DC.

○ **Contrôle Réglable de la Rétroaction :**

Le potentiomètre variable RV1 permet un réglage fin de la boucle de rétroaction. En ajustant RV1, on contrôle la quantité de rétroaction, stabilisant ainsi plus précisément la tension de sortie. Ce réglage est essentiel pour maintenir la stabilité de la tension de sortie face aux variations de charge et aux fluctuations de la tension d'entrée.

○ **Contrôle du Convertisseur DC-DC :**

Le convertisseur DC-DC ajuste sa tension de sortie en fonction du signal de commande reçu de l'amplificateur opérationnel. Si la tension de sortie dévie de la valeur souhaitée, la boucle de rétroaction (via FB) informe le circuit de contrôle, qui ajuste ensuite le cycle de travail PWM en conséquence pour maintenir une tension de sortie stable.

➤ **Circuit de Mesure de tension pour le Panneau Solaire (VPV)**

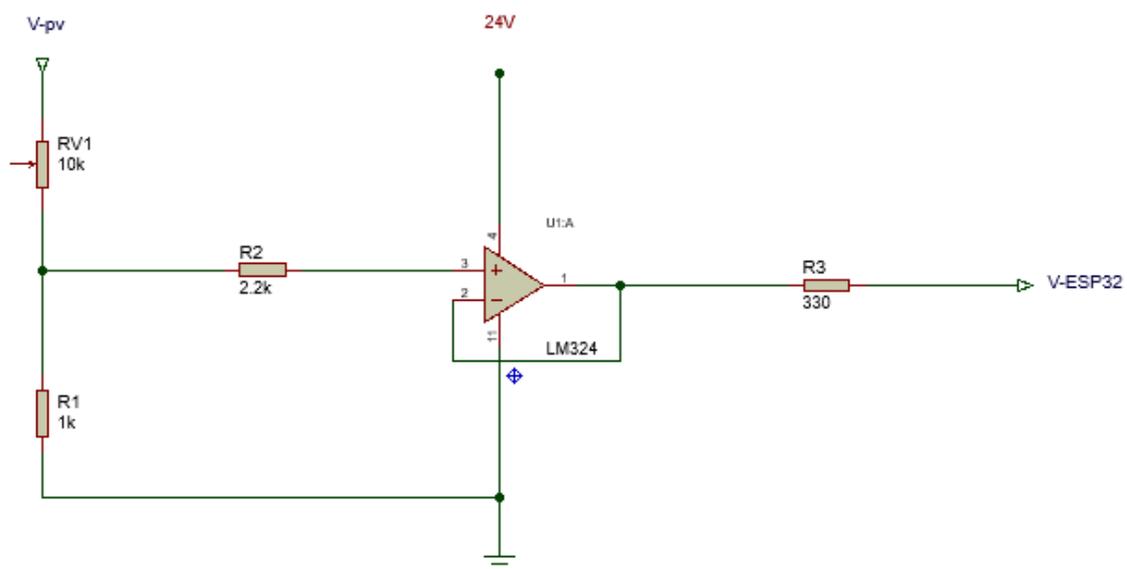


Figure (3- 10): Circuit de Mesure de Tension (VPV).

CHAPITRE 3 : IMPLEMENTATION ET TEST DE P&O SUR ESP32

Le circuit de mesure de tension pour le panneau solaire (VPV) utilise plusieurs composants clés pour assurer une mesure précise et une surveillance efficace de la tension générée par le panneau solaire. Voici comment chaque étape contribue au fonctionnement global du circuit :

- **Entrée de Tension (VPV) :**

Le panneau solaire génère une tension variable en fonction de l'ensoleillement. Cette tension est appliquée à un circuit de division de tension constitué du potentiomètre RV1 (10 k Ω) et de la résistance R1 (1 k Ω).

- **Division de Tension :**

La tension VPV est divisée par le réseau de résistances RV1 et R1. Le potentiomètre RV1 permet de régler précisément le niveau de tension qui sera appliqué à l'entrée de l'amplificateur opérationnel LM324. Cela permet d'adapter la plage de mesure à l'entrée de l'ESP32 pour une lecture précise.

- **Amplification :**

La tension divisée et ajustée est ensuite appliquée à l'entrée non-inverseuse (+) de l'amplificateur opérationnel LM324. Ce dernier est configuré en amplificateur non-inverseur. Le gain de l'amplificateur est déterminé par le rapport des résistances R2 (2.2 k Ω) et R1. Ainsi, la tension de sortie (Vout) est une version amplifiée de la tension VPV, permettant une lecture précise et amplifiée de la tension du panneau solaire.

- **Calibration Fine :**

R3 limite le courant de sortie de l'amplificateur vers l'ESP32. Pour assurer une précision maximale, le potentiomètre RV1 permet un ajustement fin de la tension d'entrée de l'amplificateur opérationnel. Cela garantit que la tension de sortie est optimisée pour correspondre à la plage de mesure de l'ESP32, assurant une surveillance continue et précise de la tension du panneau solaire.

- **Sortie vers ESP32 :**

La tension de sortie, calibrée et amplifiée, est envoyée directement à l'ESP32 pour une surveillance immédiate et une analyse détaillée. Cela permet à l'ESP32 de surveiller efficacement la performance du panneau solaire et d'optimiser la gestion de l'énergie produite.

➤ Circuit de Mesure de Courant pour le Panneau Solaire (IPV)

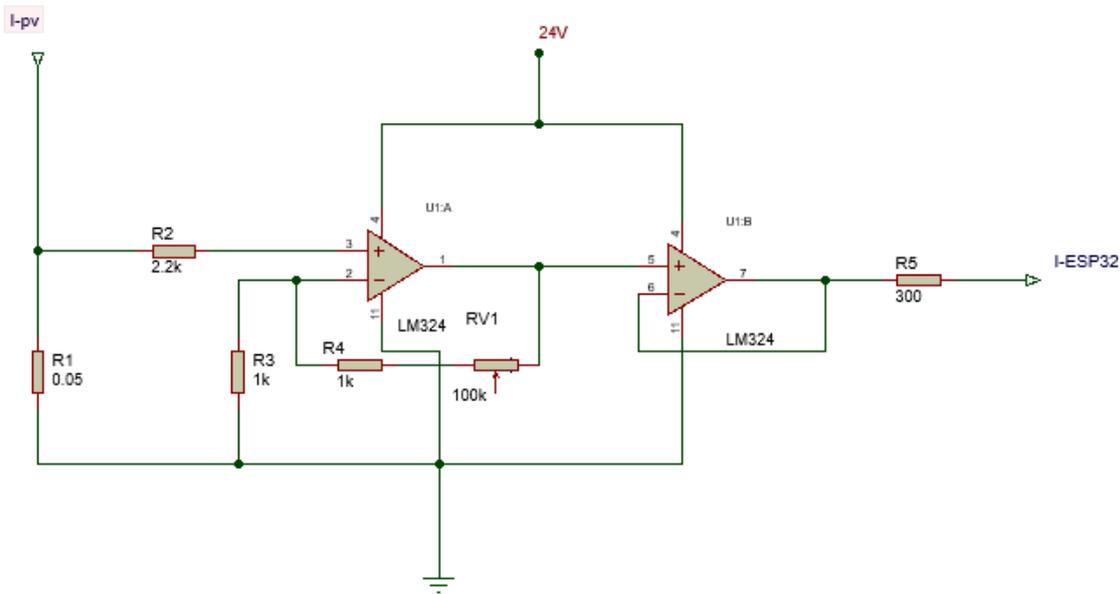


Figure (3- 11): Circuit de Mesure de Courant (IPV).

Le circuit de mesure de courant pour le panneau solaire (IPV) utilise plusieurs composants clés pour assurer une mesure précise et une surveillance efficace du courant produit par le panneau solaire. Voici comment chaque étape contribue au fonctionnement global du circuit :

- **Résistance Shunt (R1)**

La résistance shunt R1 (0.05Ω de convertisseur DC-DC) est placée en série avec le chemin du courant du panneau solaire pour convertir le courant en une petite tension proportionnelle (Loi d'Ohm : $V = I \times R$).

- **Première Étape d'Amplification avec l'Op-Amp U1**

La petite tension générée par R1 est appliquée à l'entrée non-inverseuse (+, Pin 3) de l'amplificateur opérationnel U1. Ce dernier amplifie cette tension en fonction du réseau de rétroaction constitué des résistances R2, R3, R4 et du potentiomètre RV2, ajustant ainsi le gain de l'amplificateur pour une sortie adaptée à l'ESP32.

- **Deuxième Étape d'Amplification avec l'Op-Amp U2**

La tension amplifiée par U1 est ensuite envoyée à l'entrée non-inverseuse (+) de l'amplificateur opérationnel U2. Ce second amplificateur opérationnel agit comme un suiveur de tension, garantissant une haute impédance d'entrée et une faible impédance de sortie pour transmettre précisément la tension au microcontrôleur ESP32 via sa sortie.

CHAPITRE 3 : IMPLEMENTATION ET TEST DE P&O SUR ESP32

○ **Calibrage Fin avec RV1**

RV1 permet un ajustement fin du gain d'U1A, assurant que la tension de sortie est optimisée pour la plage de mesure de l'ESP32. Cela permet une calibration précise du circuit pour une performance maximale.

○ **Limite de Courant avec R5**

Pour protéger l'entrée de l'ESP32, la résistance R5 (300Ω) est placée entre la sortie de l'amplificateur U2 et l'entrée de l'ESP32, limitant ainsi le courant et évitant toute surcharge.

○ **Lecture du Courant par l'ESP32**

L'ESP32 reçoit la tension de sortie amplifiée et stabilisée de l'amplificateur U2. Cette tension est directement proportionnelle au courant produit par le panneau solaire (IPV). L'ESP32 traite cette valeur pour surveiller le courant solaire et prendre les décisions nécessaires en fonction des niveaux de courant mesurés.

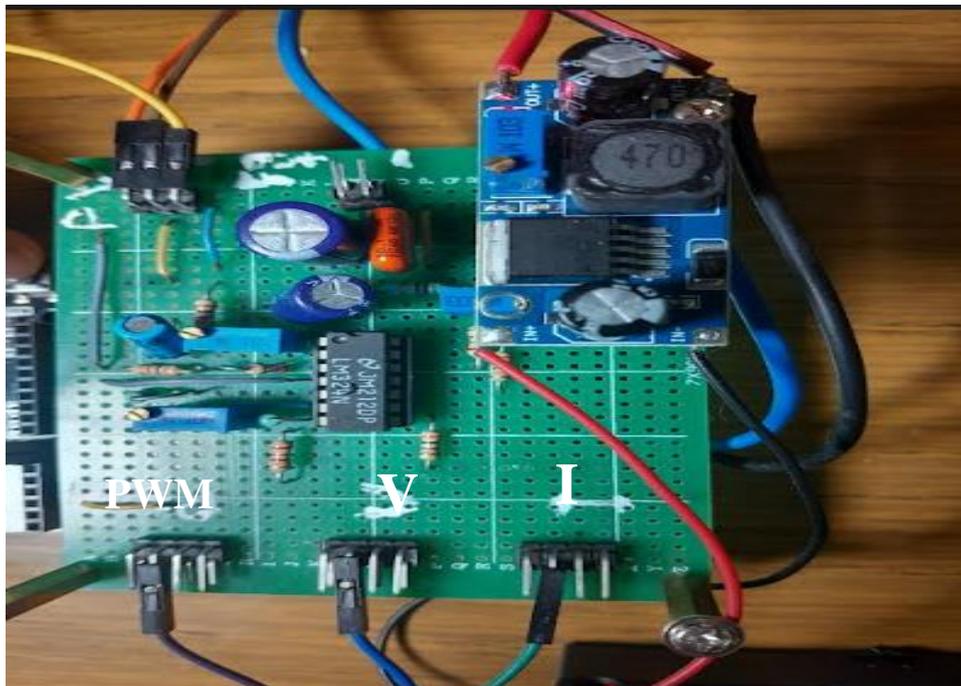


Figure (3- 12): circuit final d'adaptation et de mesure courant et tension avec régulateur de tension.

3.2.5. Charge Du Système : Led 10w 9v-12v Plus MCC 12V (Ventilateur)

On a utilisé comme charge une ampoule LED COB de la marque FTVOGUE, avec une puissance de 10 Watts et une tension de 12 Volts, émet une lumière blanche chaude à 6500 Kelvin, idéale pour créer une ambiance lumineuse agréable avec un ventilateur fonctionne avec une tension de 12 volts. C'est la tension nécessaire pour que le ventilateur puisse tourner et fonctionner correctement.

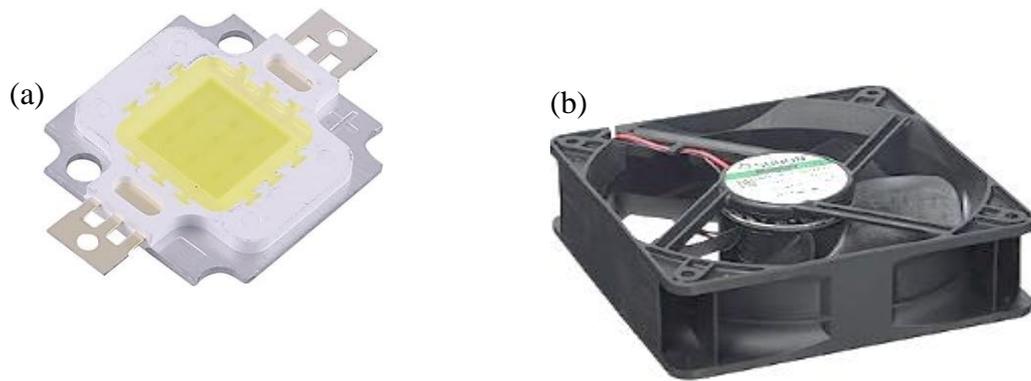


Figure (3-13): la charge du système PV (a) L'ampoule LED 10W (b) ventilateur 12v.

3.3. IMPLEMENTAION ET TEST DE LA COMMANDE P&O DE BASE SUR SYSTEME PV

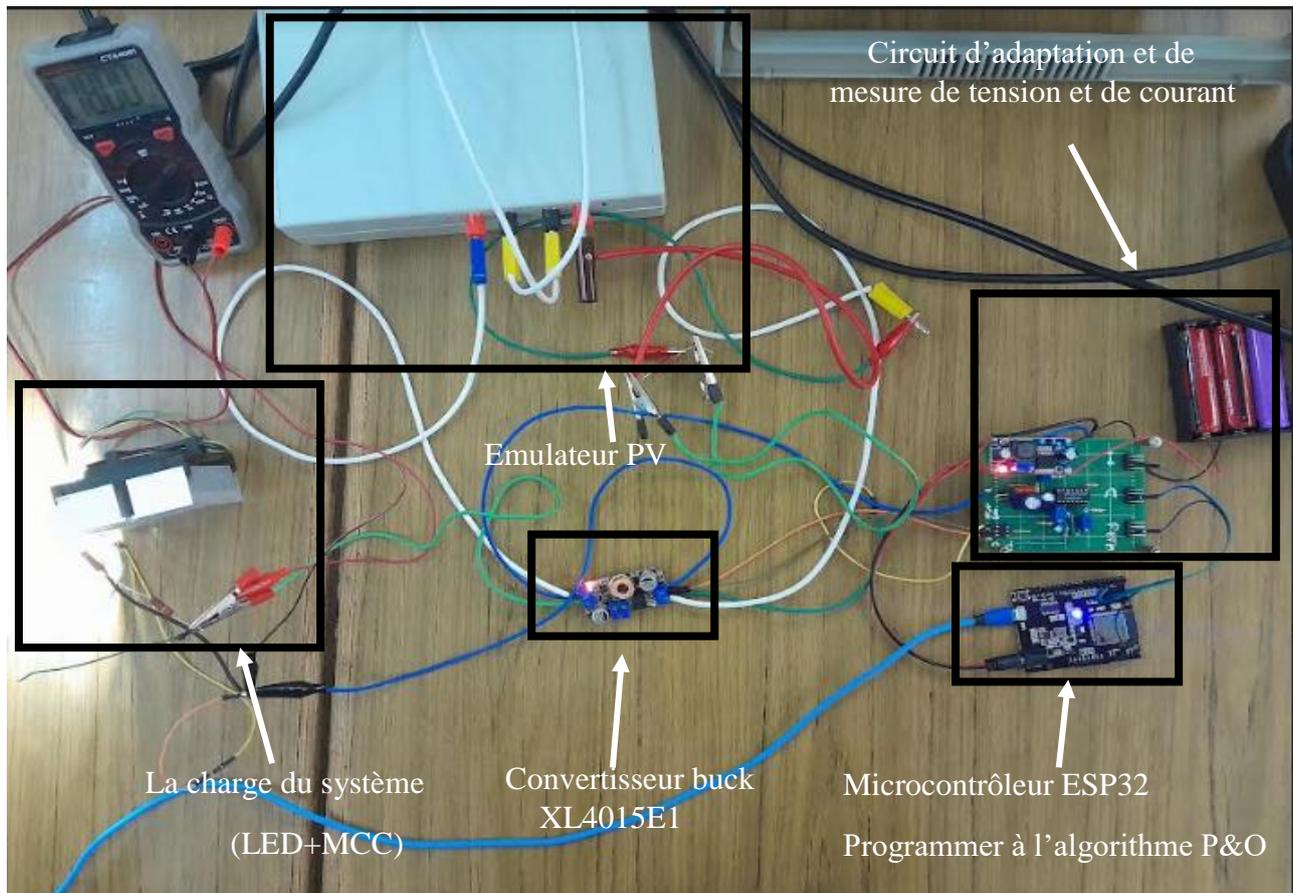


Figure (3-14): schéma final de réalisation de système PV avec P&O.

3.3.1. Résultats Et Interprétation

➤ Tension V_{pv} avec P&O

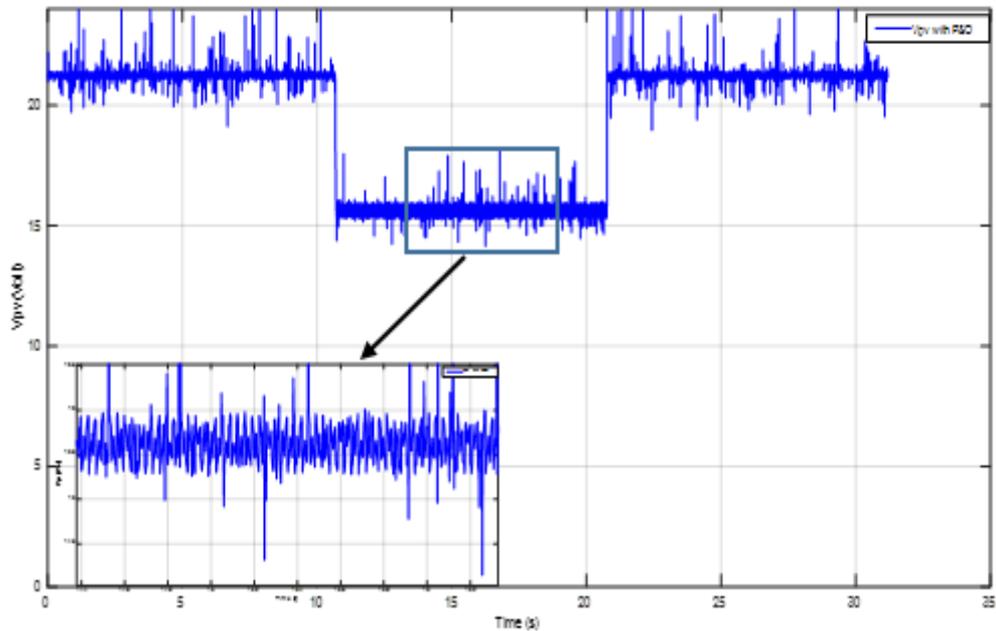


Figure (3- 15): La variation de la tension (V) en fonction du temps (s).

La courbe montre la variation de la tension (V_{pv}) du système PV en fonction du temps avec la commande P&O. La tension commence à une certaine valeur initiale et fluctue légèrement. Les fluctuations initiales sont dues à l'algorithme P&O qui perturbe et observe pour trouver le point de puissance maximale (MPP). Cela est normal car le système ajuste les paramètres pour optimiser la sortie. La tension se stabilise après quelques secondes, la stabilisation indique que le système a atteint un état stable et que l'algorithme P&O a trouvé les paramètres optimaux pour maximiser la puissance extraite. Cela montre que le convertisseur buck régule efficacement la tension en sortie du panneau PV.

➤ Courant I_{pv} avec P&O

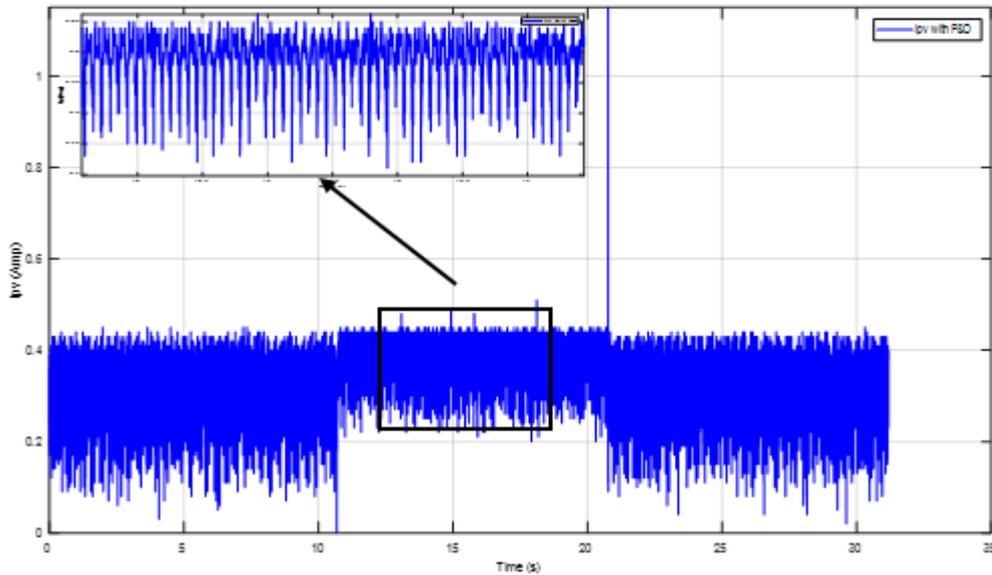


Figure (3- 16): La variation du courant (A) en fonction du temps (s).

La courbe montre la variation du courant (I_{pv}) généré par le système PV en fonction du temps avec la commande P&O. Le courant fluctue initialement avant de se stabiliser, ces fluctuations sont dues aux ajustements continus de l'algorithme P&O. L'algorithme effectue des perturbations pour évaluer l'impact sur la puissance et ajuste en conséquence. Le courant se stabilise après quelques secondes. La stabilisation du courant en parallèle avec la tension signifie que le système PV fonctionne à son efficacité optimale. L'algorithme P&O a réussi à ajuster le courant pour maximiser la puissance délivrée, indiquant une performance stable et optimale du convertisseur.

➤ Puissance P_{pv} avec P&O

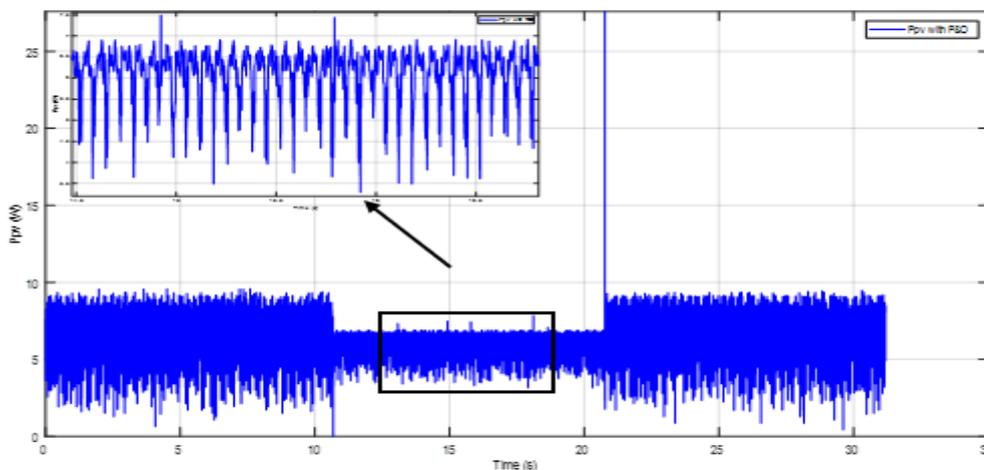


Figure (3- 17): La variation de la puissance (W) en fonction du temps (s).

CHAPITRE 3 : IMPLEMENTATION ET TEST DE P&O SUR ESP32

La courbe montre la puissance (P_{pv}) délivrée par le système PV en fonction du temps. La puissance augmente rapidement au début, suivie de fluctuations. L'augmentation rapide de la puissance indique que l'algorithme P&O réagit pour maximiser la puissance dès le début. Les fluctuations représentent les ajustements de l'algorithme pour trouver le MPP. La puissance se stabilise après les fluctuations initiales, la stabilisation de la puissance indique que le système PV a atteint et maintient le point de puissance maximale. Cela démontre l'efficacité de la commande P&O pour optimiser la puissance extraite du système PV.

➤ Rapport cyclique (D)

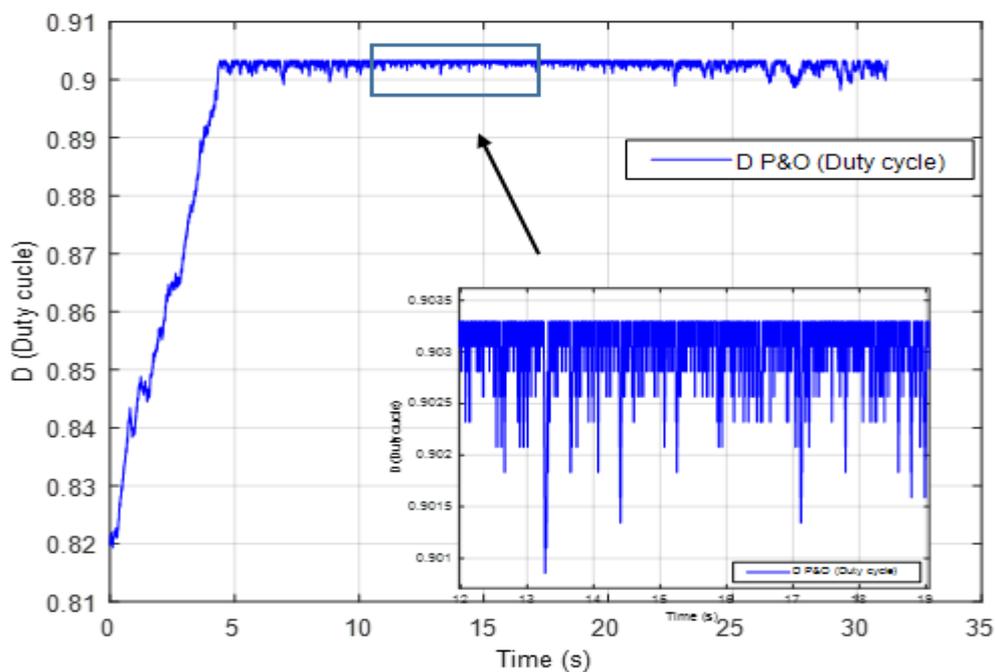


Figure (3- 18): La variation de rapport cyclique (D) en fonction du temps (s).

La courbe montre la variation du rapport cyclique (D) du convertisseur buck en fonction du temps avec la commande P&O. Le rapport cyclique commence à une valeur initiale et fluctue, les fluctuations initiales du rapport cyclique sont dues aux ajustements que l'algorithme P&O effectue pour chercher le MPP. Le rapport cyclique détermine le temps pendant lequel le convertisseur est en conduction, influençant directement la tension et le courant de sortie. Le rapport cyclique se stabilise après les ajustements initiaux, La stabilisation du rapport cyclique indique que l'algorithme P&O a trouvé et maintient les conditions optimales pour maximiser la puissance. Une fois le rapport cyclique stabilisé, la sortie du convertisseur buck est optimisée, assurant une tension et un courant constants à leur valeur optimale. Cela montre que le système PV fonctionne de manière stable et efficace.

3.4. IMPLEMENTAION ET TEST DE LA COMMANDE P&O AVEC FILTRE FIR SUR SYSTEME PV

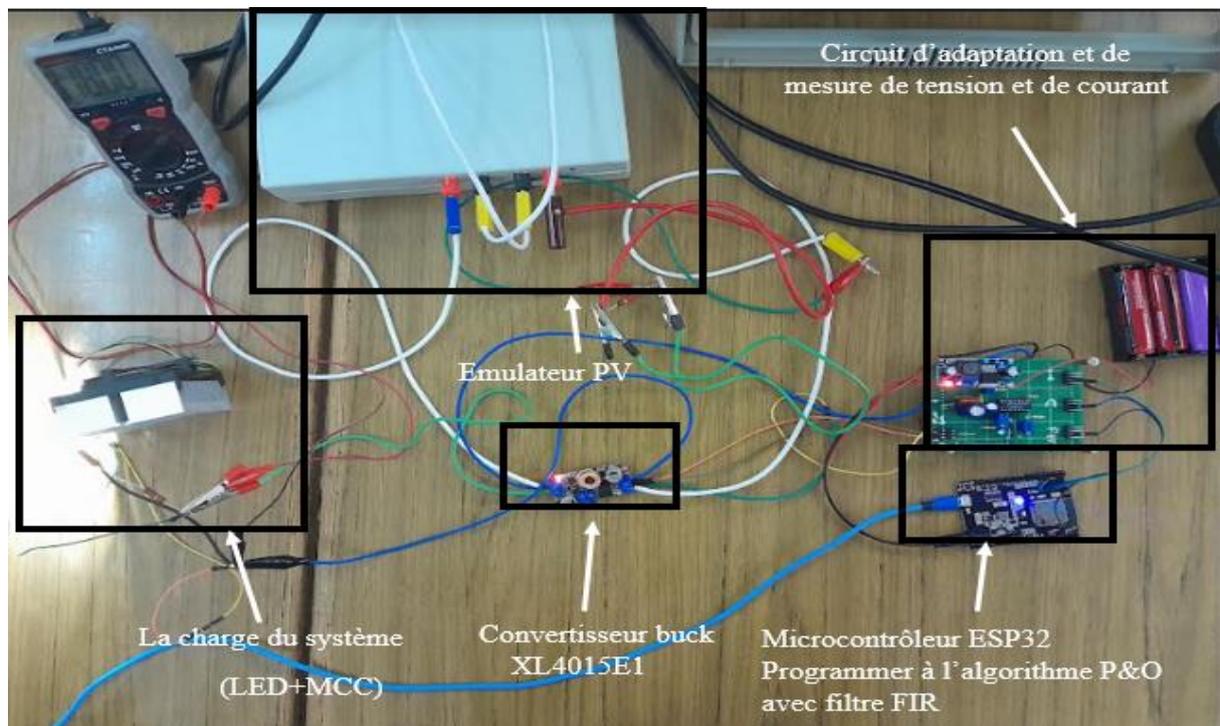


Figure (3- 19): schéma final de réalisation de système PV avec P&O avec filtre FIR.

3.4.1. Résultats Et Interprétations

➤ Tension V_{pv} avec filtre FIR

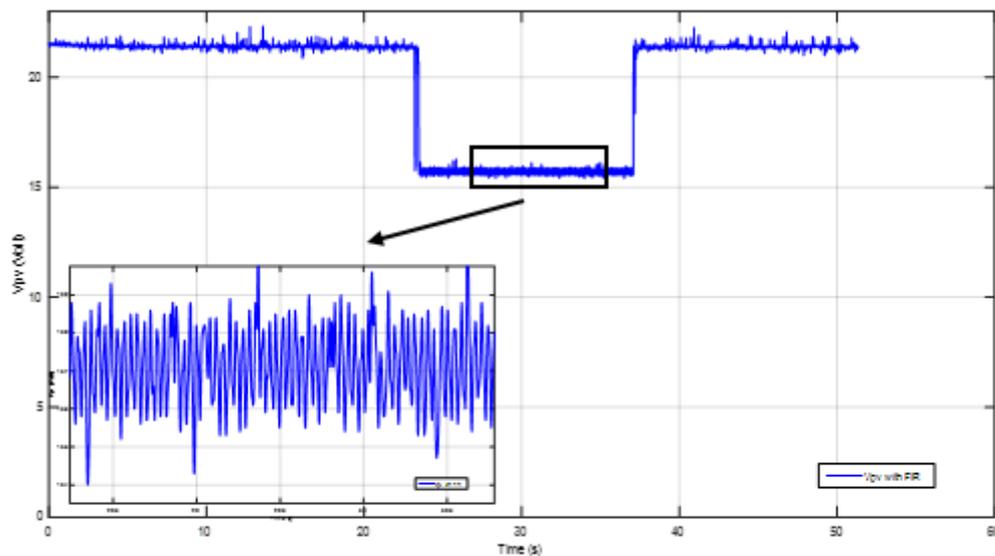


Figure (3- 20): la variation de la Tension V_{pv} avec filtre FIR en fonction du temps (s).

La figure (3-20) montre la variation de la tension V_{pv} avec le filtre FIR en fonction du temps. On remarque que la tension est plus stable avec des variations réduites par rapport à un système sans filtre.

L'application du filtre FIR stabilise la tension en éliminant les fluctuations rapides et les bruits. Cela permet une régulation plus précise de la tension de sortie, essentielle pour optimiser la performance du Maximum Power Point Tracking (MPPT). Une tension plus stable contribue directement à l'efficacité énergétique globale du système photovoltaïque (PV), permettant un suivi plus précis du point de puissance maximale (MPP)

➤ Courant I_{pv} avec filtre FIR

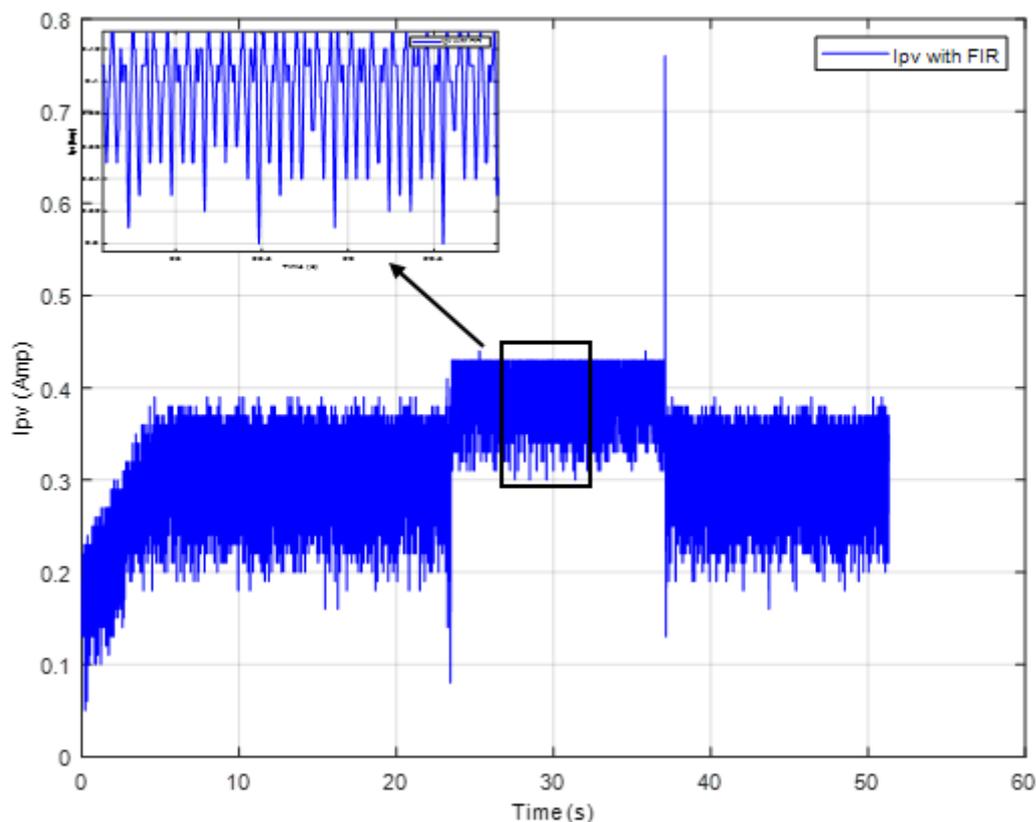


Figure (3- 21): la variation du courant I_{pv} avec filtre FIR en fonction du temps (s).

La figure (3-21) illustre la variation du courant I_{pv} avec le filtre FIR en fonction du temps. Le courant est plus lisse et présente moins de pics et de creux. Le filtre FIR réduit les fluctuations du courant, minimisant ainsi les perturbations internes et externes. Cela diminue les pertes énergétiques et garantissant une alimentation en courant plus régulière et fiable. Un courant plus stable améliore également la précision du suivi du MPP, ce qui augmente l'efficacité globale du système PV.

➤ Puissance P_{pv} avec filtre FIR

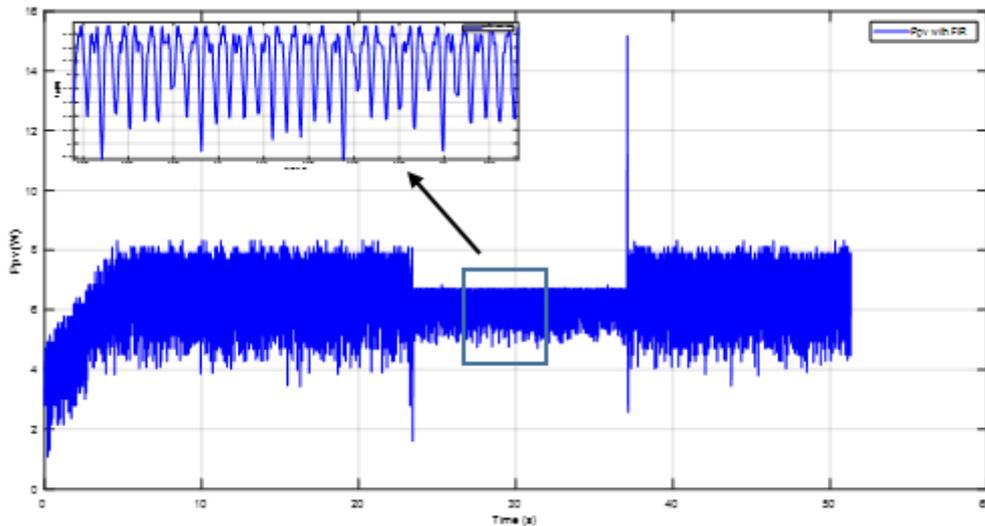


Figure (3- 22): la variation de la puissance P_{pv} avec filtre FIR en fonction du temps (s).

La figure (3-22) montre la variation de la puissance P_{pv} avec le filtre FIR en fonction du temps. La courbe de puissance est plus constante et atteint des valeurs plus élevées comparée à celle sans filtre FIR. La stabilité accrue et l'augmentation des valeurs de la puissance filtrée indiquent que le système PV peut suivre et extraire plus efficacement la puissance maximale des panneaux solaires. Le filtre FIR réduit les fluctuations rapides et les bruits, permettant ainsi une conversion d'énergie plus stable et plus efficace. En éliminant les fluctuations, le filtre FIR aide à maintenir la puissance proche du maximum possible, réduisant ainsi les pertes et augmentant le rendement global du système.

➤ Rapport cyclique (D)

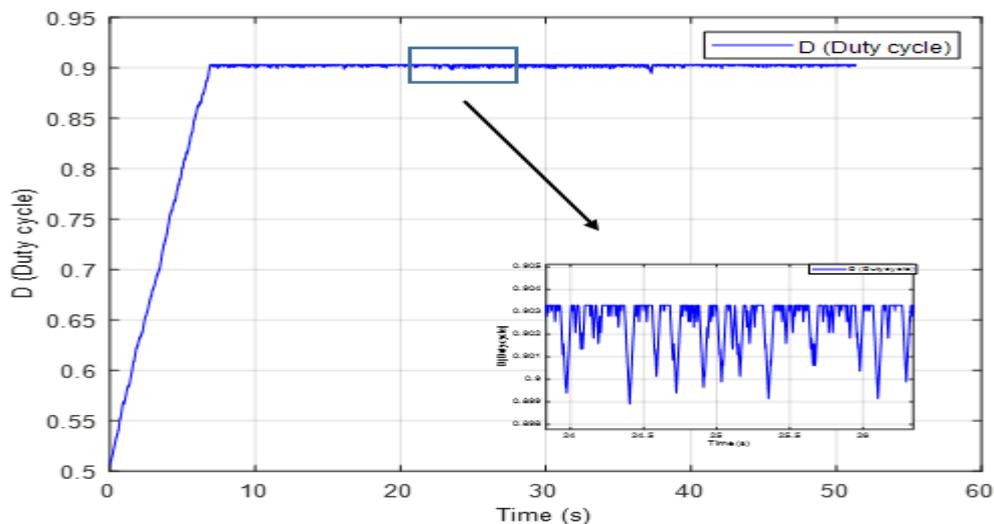


Figure (3- 23): la variation de rapport cyclique avec filtre FIR en fonction du temps (s).

CHAPITRE 3 : IMPLEMENTATION ET TEST DE P&O SUR ESP32

La figure (3-23) présente la variation du rapport cyclique avec le filtre FIR en fonction du temps. Le rapport cyclique est plus stable et présente moins de variations.

L'observation principale est que la courbe du rapport est plus stable et montre des fluctuations réduites et les variations abruptes du rapport cyclique, caractéristiques d'un système sans filtrage, sont considérablement atténuées.

Cette stabilité accrue du rapport cyclique est essentielle pour le bon fonctionnement des convertisseurs DC-DC utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Un rapport cyclique stable réduit les pertes de commutation et améliore la régulation de la puissance transférée des panneaux solaires vers la charge. En éliminant les variations rapides et les perturbations, le filtre FIR réduit les perturbations et les bruits de haute fréquence, entraînant une courbe plus lisse et permet au système de maintenir une opération plus constante et efficace.

3.4.2. Comparaison Des Résultats Avec Et Sans Filtre

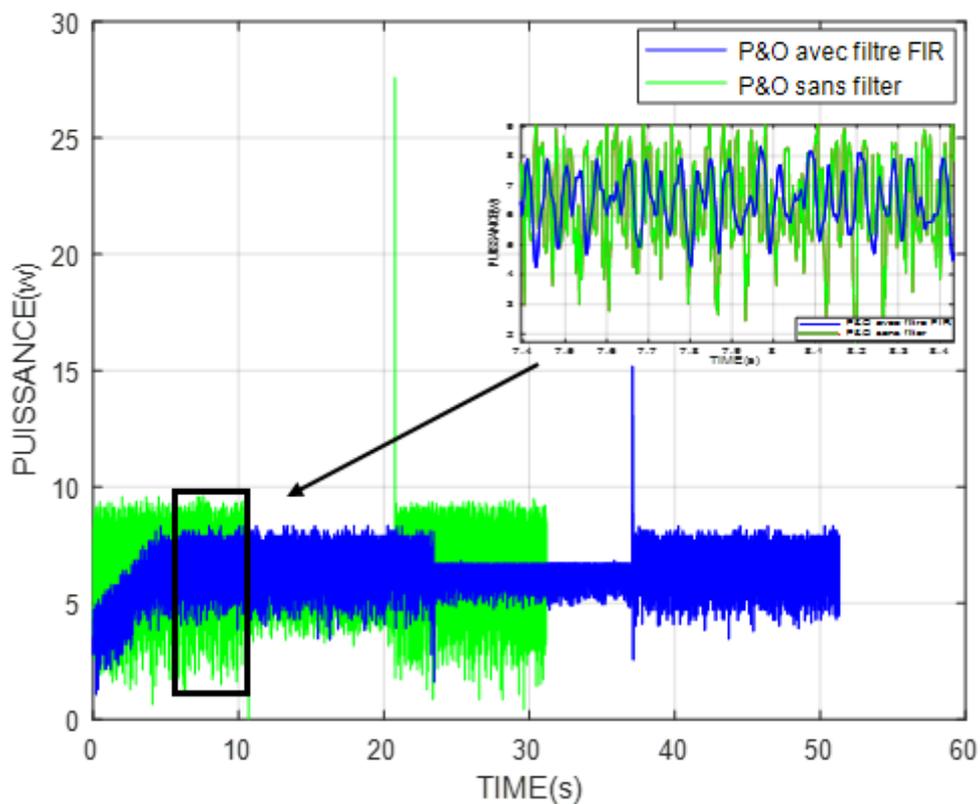


Figure (3- 24): Variation de la puissance (Watt) en fonction du temps (s) avec et sans filtre.

CHAPITRE 3 : IMPLEMENTATION ET TEST DE P&O SUR ESP32

Tableau (3- 2): Comparaison le rendement de puissance de commande P&O avec et sans filtre.

P&O	SANS FILTRE	AVEC FLTRE
Rendement %	92.85%	94.15%

La comparaison entre la puissance avec et sans filtre, illustrée dans la Figure 3-24, montre des différences significatives dans la stabilité et l'efficacité du système photovoltaïque utilisant la commande P&O. En présence du filtre FIR, la courbe de puissance est nettement plus stable avec des fluctuations réduites, ce qui indique une meilleure régulation de la puissance. Les valeurs atteintes sont également plus élevées et constantes par rapport à celles obtenues sans filtre. Sans le filtre FIR, la courbe de puissance présente des fluctuations plus importantes et une moindre stabilité, avec des variations prononcées de la puissance au fil du temps.

Le Tableau 3-2 quantifie cette amélioration en présentant les rendements de la commande P&O avec et sans filtre. Sans filtre, le rendement est de 92.85%, tandis qu'avec le filtre FIR, le rendement s'élève à 94.15%. Ainsi, l'intégration du filtre FIR améliore le rendement de 1.30%, ce qui est attribuable à la réduction des fluctuations et des perturbations, permettant une conversion d'énergie plus efficace.

3.5. CONCLUSION

Ce chapitre a détaillé l'implémentation pratique de la méthode de Perturbation et Observation (P&O) sur un microcontrôleur ESP32. Les étapes comprenaient l'adaptation du convertisseur DC-DC, l'implémentation de la commande P&O de base, l'intégration d'un filtre à réponse impulsionnelle finie (FIR), et la comparaison des résultats des deux implémentations.

Les tests ont montré que l'ajout du filtre FIR améliore significativement la stabilité et l'efficacité du système photovoltaïque. La courbe de puissance avec le filtre FIR était plus stable et atteignait des valeurs plus élevées par rapport à la configuration sans filtre. Numériquement, le rendement de la commande P&O est passé de 92.85% sans filtre à 94.15% avec le filtre FIR. Cette amélioration permet une meilleure extraction de la puissance maximale des panneaux solaires, réduisant les pertes et optimisant la conversion d'énergie.

Cette implémentation a montré que l'utilisation de techniques de filtrage avancées dans la pratique peut optimiser la performance des systèmes photovoltaïques, ouvrant des perspectives pour des améliorations future.

CONCLUSION GENERALE

Ce mémoire a exploré l'optimisation des systèmes photovoltaïques en se concentrant sur l'amélioration des techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) grâce à l'intégration d'un filtre à réponse impulsionnelle finie (FIR) dans la méthode de Perturbation et Observation (P&O) et la réalisation pratique sur un système photovoltaïque. L'objectif principal était de maximiser la production d'énergie solaire en augmentant la stabilité et l'efficacité du système de commande. Tout au long de ce travail, nous avons commencé par une revue détaillée des principes fondamentaux des systèmes photovoltaïques, abordant des concepts clés tels que l'effet photovoltaïque, les cellules solaires et les convertisseurs DC-DC. Cette base théorique a été essentielle pour comprendre les défis et les opportunités associés à l'optimisation des systèmes PV. Ensuite, une analyse approfondie de la commande MPPT a été réalisée, avec un focus particulier sur la méthode P&O. Nous avons démontré, à travers des simulations utilisant MATLAB, que l'intégration d'un filtre FIR dans cette méthode améliore la performance du système en stabilisant la puissance extraite et en augmentant l'efficacité globale. Les résultats des simulations ont montré que le filtrage FIR réduit les oscillations autour du point de puissance maximale, permettant une extraction d'énergie plus constante et efficace.

L'étape suivante a été la mise en œuvre pratique de la commande MPPT avec et sans filtre FIR sur un microcontrôleur ESP32. Les essais pratiques ont confirmé les résultats de la simulation, montrant que l'ajout du filtre FIR améliore non seulement la stabilité mais aussi l'efficacité du système PV. Les tests ont révélé que le filtre FIR permet une meilleure régulation de la puissance, ce qui se traduit par une conversion d'énergie plus efficace et une réduction des pertes. En conclusion, ce travail a démontré que l'utilisation de techniques de filtrage avancées et de stratégies de commande optimisées peut significativement améliorer la performance des systèmes photovoltaïques. Les améliorations apportées par l'intégration d'un filtre FIR dans la commande MPPT P&O sont prometteuses pour l'avenir des technologies solaires, car elles permettent de maximiser l'extraction de puissance des panneaux solaires tout en assurant une stabilité accrue. Ces résultats sont cruciaux pour promouvoir l'adoption à grande échelle des énergies renouvelables et pour contribuer à la réduction de notre empreinte carbone, ce qui est essentiel pour un avenir énergétique durable. En somme, les travaux présentés dans ce mémoire ouvrent la voie à des développements futurs visant à rendre les systèmes photovoltaïques plus performants et économiquement viables, favorisant ainsi la transition vers des sources d'énergie plus propres et plus durables.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] «LE PHOTOVOLTAÏQUE FONCTIONNEMENT ET TECHNOLOGIES,» Brussels Environnement,2010.[Enligne].Available:
https://document.environnement.brussels/opac_css/elecfile/IF%20ENERGIE%20Mod3%20Fonctionnement%20technologies%20PV%20FR. [Accès le 04 04 2024].
- [2] Bachiri, L. et Mida, A., «Etude d'un système photovoltaïque optimisé par une technique MPPT intelligente (neurone-floue) ANFIS,» Université Kasdi Merbah, Ouargla., 2021.
- [3] «Chapitre 5: Capteurs solaires photovoltaïques: . Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque,» Université Alioune DIOP de Bambey, 2015. [En ligne]. Available: <http://www.foad.uadb.edu.sn/mod/book/view.php?id=2448&chapterid=1522>. [Accès le 04 07 2024].
- [4] Guessoumi, F. Saadi, A., «Commande de panneau solaire à l'aide d'une carte à pic,» Université Mohamed Khider , Biskra, 2010.
- [5] Djeriou, S., «Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone,» Université FERHAT ABBAS, SETIF, 2011.
- [6] pauchet,R., «La page tipe,» XLS, 2004. [En ligne]. Available: http://rpauchet.chez.com/lapageTIPE/TIPEkevin/TIPEsolaire/tipe.htm#_Toc449373649 . [Accès le 2024 04 05].
- [7] R. Zbotek, «Paramètres des cellules solaires et caractéristiques d'une cellule photovoltaïque,» ZBOTEK, 31 08 2023. [En ligne]. Available: <https://zbotek.com/fr/solar-cell-parameters-and-characteristics-of-a-photovoltaic-cell/>. [Accès le 05 04 2024].
- [8] Defallah,D., «TUDE ET CONCEPTION D'UNE CHAINE PHOTOVOLTAÏQUE CONNECTÉE AU RÉSEAU ET ÉTUDE DE LA QUALITÉ DE L'ÉNERGIE INJECTÉE,» École Nationale Supérieure d'Ingénieurs, Tunis, 2016.
- [9] Labouret,A. Cumunel,P. Braun,J. Faraggi,B. «Cellules solaires Les bases de l'énergie photovoltaïque,» DUNOD, Paris (France) , 2010.
- [10] N. Abouchabana, «Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT,» Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2009.
- [11] Messas et M. R.Ourchane, «Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque raccordé au réseau électrique,» Université Djilali Bounaama, Khemis Miliana, 2016.
- [12] S. Ghandour, «conception de convertisseurs dc/dc à base de mems,» université de Grenoble, Saint-Martin-d'Hères, France, 2011.

- [13] A. Abdelhak, «propriétés électriques des composants électroniques minéraux et organiques, conception et modélisation d'une chaîne photovoltaïque pour une meilleure exploitation de l'énergie solaire,» université Toulouse, Toulouse, France, 2006.
- [14] «Buck-Boost Converter: What is it? (Formula and Circuit Diagram),» Electrical4U, 2024 04 17. [En ligne]. Available: <https://www.electrical4u.com/buck-boost-converter/>. [Accès le 2024 04 24].
- [15] M. BENTOUMI, «Poursuite du point maximale d'un système photovoltaïque par les méthodes intelligentes,» université de MOHAMED BOUDIAF, M'SILA, 2016.
- [16] CABAL.C., «Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque,» université de Toulouse III, Toulouse ,France, 2008.
- [17] Sumathi,S. Ashok Kumar,L. surekha,P. Solar PV and Wind Energy Conversion Systems, Switzerland : Springer, 2015.
- [18] H.Abbes. H.Abid. K.Loukil. A.Toumi. M.Abid, «tude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque,» chez *Conférence Internationale des Énergies Renouvelables (CIER'13)*, Sousse, Tunisie., 2013.
- [19] Esram,T. Chapman,P.L. «comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques,» *IEEE Transactions on Energy Conversion* , vol. 22, n° %12, pp. 439-449., 2007.
- [20] Chermiti,A. Bouklil-Hacene,O. Mouhadjer,S. «Design of a Library of Components for Autonomous Photovoltaic System under Matlab/Simulink,» *Foundation of Computer Science (FCS), NY, USA*, vol. 53, n° %114, pp. 4-5, 2012.
- [21] J. Lapresté, Introduction à MATLAB, Paris: Elipses, 2009.
- [22] M. BeEanger, Traitement numérique du signal: théorie et pratique, France: Elsevier Masson, 1981.
- [23] CHEBOUROU,M. REMAOUN,A,L. «Modélisation d'un filtre numérique multi-cadence à l'aide d'un DSP TMS320VC5416,» Université Aboubakr Belkaïd , Tlemcen, 2018.
- [24] A. Kourgi, «Traitement Numérique du Signal,» Université des Sciences et de la technologie Houari Boumediene, bab ezzouar,Alger, 2020.
- [25] «WeMOS D1 R32 ESPDuino32 4MB Wi-Fi and Bluetooth Board COM42 ,R16,» Faranux Electronics, 2024 JANVIER 08. [En ligne]. Available: <https://www.faranux.com/product/wemos-d1-r32-espduino32-4mb-wi-fi-and-bluetooth-board/>.
- [26] [En ligne]. Available: <https://www.handsontec.com/dataspecs/module/XL4015-5A-PS.pdf>.

