

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 البلدية

Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا

Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك

Département d'Électronique



## Mémoire de Master

Filière Électronique

Spécialité Instrumentation présenté par

Achour Mohamed Lamine

Djeraib Mustapha

# Conception et réalisation d'une commande P&O avec filtrage RIF (Filtre à Réponse Impulsionnelle Finie) optimisé pour implémentation à 32 bits

Proposé par : Mr. Hassani Adnane & Mr. Bradai Rafik

Numero de pfe : instrum5

Année universitaire :2024/2025

## Dédicace

---

À ma chère famille,

À mes parents, mes piliers, qui m'ont donné la vie, l'amour et la force de grandir. Votre soutien inconditionnel est ma plus grande richesse.

À mes deux sœurs, mes complices, mes confidentes, avec qui j'ai partagé rires, secrets et défis. Vous êtes bien plus que des sœurs, vous êtes une partie de moi-même.

Et à vous , Mountassar Maamoun , merci pour ton enseignement, ta patience et ta passion. Tu as éveillé en moi la soif d'apprendre et m'as guidé avec bienveillance.

Avec toute ma gratitude

**Achour Mohamed lamine**

## Remerciement

---

Avant toute chose, nous exprimons notre profonde gratitude et reconnaissance envers ALLAH, le Tout-Puissant, pour Ses bienfaits et Sa grâce, et pour nous avoir donné le courage et la patience tout au long de ce travail.

Nous tenons à adresser nos sincères remerciements à notre promoteur M. Hassani Adnane pour son accompagnement rigoureux, ses conseils pertinents et sa disponibilité constante tout au long de la réalisation de ce mémoire. Nos remerciements vont également à notre copromoteur M. Bradai Rafik, pour son appui, ses orientations méthodologiques et sa précieuse contribution scientifique.

Nous remercions chaleureusement les honorables membres du jury, en particulier M. [Nom du président], président du jury, et M. [Nom de l'examineur], examinateur, pour le temps qu'ils ont bien voulu nous consacrer, ainsi que pour leurs remarques constructives et enrichissantes.

Enfin, nous exprimons notre profonde gratitude à M. Mountassar Maamoun pour son soutien précieux et ses conseils avisés tout au long de notre projet de fin d'études. Son expertise, sa disponibilité et son engagement ont grandement contribué à la réussite de ce travail. Nous remercions également l'ensemble de nos enseignants pour la qualité de l'enseignement qu'ils nous ont transmis durant notre parcours.

## **Dedicace**

---

Je dédie ce modeste travail A ceux que j'aime le plus au monde

A ma mère et mon père

A mes chers frères

A mes chères sœurs

A mes tantes et mes oncles

A Dr Maamoun

A mon binôme Lamine

A mes chères amis youcef et zaki

A tous ceux qui ont fait avec nous un mi-chemin

**D. Mustaph**

تقترح هذه الأطروحة خوارزمية MPPT "الاضطراب و المراقبة" P&O لأنظمة الطاقة الشمسية ، تهدف إلى تقليل تذبذبها حول نقطة الطاقة القصوى و حساسيتها لضوضاء المستشعرات. تتكون الطريقة من دمج مرشح رقمي FIR في حلقة تنظيم P&O لمعالجة إشارات الجهد و التيار المقاسة مسبقاً. تمت المصادقة على النهج من خلال محاكاة MATLAB/SIMULINK ، مما يسمح بتحسين ترتيب المرشح لتحقيق توازن بين السرعة و الاستقرار ، و من خلال تنفيذ عملي على المتحكم ESP32 المدمج مع المحول DC\_DC . تظهر النتائج ان مرشح FIR يحسن بشكل كبير أداء P&O فهو يسمح بمتابعة أكثر دقة للنقطة المثلى ، و يقلل من التذبذبات ، و يزيد من الكفاءة الطاقية الإجمالية للنظام الكهروضوئي مقارنة بطريقة P&O القياسية غير المفلترة.

الكلمات المفتاحية : MPPT ؛ محول DC-DC ؛ الاضطراب و المراقبة (P&O) ؛ FIR ؛ ESP32

## Résumé

Cette thèse propose l'algorithme MPPT "Perturb and Observe" (P&O) pour les systèmes photovoltaïques, visant à réduire les oscillations autour du point de puissance maximale et sa sensibilité au bruit des capteurs. La méthode consiste à intégrer un filtre numérique FIR dans la boucle de régulation du P&O pour pré-traiter les signaux de tension et de courant mesurés. L'approche a été validée à la fois par simulations MATLAB/Simulink, permettant d'optimiser l'ordre du filtre pour un compromis vitesse-stabilité, et par une implémentation pratique sur microcontrôleur ESP32 couplé à un convertisseur DC-DC. Les résultats démontrent que le filtre FIR améliore significativement les performances du P&O : il permet un suivi plus précis du point optimal, réduit les oscillations et augmente l'efficacité énergétique globale du système photovoltaïque par rapport à la méthode P&O standard non filtrée.

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

## Abstract

This thesis proposes an MPPT algorithm "Perturb and Observe" (P&O) for photovoltaic systems, aiming to reduce its oscillations around the maximum power point and its sensitivity to sensor noise. The method consists of integrating a digital FIR filter into the P&O regulation loop to preprocess the measured voltage and current signals. The approach was validated both through MATLAB/Simulink simulations, allowing for the optimization of the filter order for a speed-stability trade-off, and through a practical implementation on an ESP32 microcontroller coupled with a DC-DC converter. The results demonstrate that the FIR filter significantly improves the performance of P&O: it allows for more precise tracking of the optimal point, reduces oscillations, and increases the overall energy efficiency of the photovoltaic system compared to the standard unfiltered P&O method.

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

# Sommaire

Introduction generale .....	1
CHAPITRE 01 : GENERALITE SUR SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE .....	3
1.1.Introduction .....	3
1.2.Le photovoltaïque fonctionnement et technologie .....	3
1.2.1.L'effet photovoltaïque .....	3
1.2.2. Cellule Solaire Photovoltaïque .....	4
1.2.3.Technologie des cellules PV .....	4
1.2.3.1.La cellule en silicium monocristallin .....	5
1.2.3.2.La cellule en silicium poly-cristalline .....	5
1.2.3.3. Cellule au silicium amorphe .....	6
1.2.4.Modèle électrique d'une cellule solaire .....	6
1.3.Générateur photovoltaïque .....	8
1.3.1.Le Module Photovoltaïque .....	8
1.3.2. Association Des Cellules .....	9
1.3.2.1. Association en série .....	9
1.3.2.2. Association parallèle .....	9
1.3.2.3. Association hybride (série parallèle) .....	10
1.4. CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE .....	11
1.4.1.La tension à circuit ouvert (Voc): .....	11
1.4.2.Le courant de court-circuit (Icc) .....	11
1.4.3. La puissance maximale (Pmax) .....	12
1.4.4.Le Rendement .....	12
1.4.5.Le facteur de forme (FF) .....	12
1.5. INFLUENCE DE l'éclairement ET TEMPERATURE SUR LE COMPORTEMENT DU MODULE PV .....	13
1.5.1.Influence de l'éclairement .....	13
1.5.2. Influence de température .....	13
1.6. LES CONVERTISSEURS DC-DC .....	14

1.6.1. Type De Convertisseur DC-DC .....	14
1.6.2. Hacheur série (Buck) .....	14
1.6.3.Hacheur parallèle (Boost) .....	16
1.6.4. Le convertisseur Buck- Boost .....	17
1.7. LA COMMANDE MPPT .....	19
1.7.1.Définition De MPPT .....	19
1.7.2.Principe De MPPT .....	19
1.7.3.Méthodes de Commande MPPT .....	19
1.7.3.1.Méthodes Indirectes .....	19
1.7.3.2.Méthodes Directes .....	20
1.7.4. Les différents algorithmes MPPT .....	20
1.7.4.1.La méthode de la tension de circuit ouvert du générateur (VOC) .....	20
1.7.4.2. La méthode de court-circuit (Icc) .....	21
1.7.4.3.La méthode Conductance Incrémentale (INC) .....	22
1.7.4.4.La méthode P&O (Perturb and Observe) .....	23
1.8.CONCLUSION .....	24
Chapitre 02 : SYNTHSE ET SIMULATION D'UNE COMMANDE MPPT .....	26
2.1. Introduction .....	26
2.2. schema synoptique .....	26
2.3.IMPLEMENTATION D'UNE COMMANDE MPPT P&O DE BASE SUR MATLAB SIMULINK .....	27
2.3.1.Le panneau photovoltaïque .....	27
2.3.2.Le convertisseur élévateur (boost) .....	30
2.3.3.Contrôle PWM .....	30
2.3.4.Le schéma de la commande P&O sur Matlab Simulink .....	30
2.3.5.Résultat et interprétation .....	31
2.4.SYNTHSE D'UN FITRE FIR .....	34
2.4.1.Propriétés et Caractéristiques des filtres RIF .....	35
2.5.Implémentation d'une commande P&O avec un filtre FIR sur MATLAB SIMULINK .....	36
2.5.1.Synthèse d'une commande P&O avec filtrage FIR .....	36
2.5.2.Conception et calcul des coefficients et le filtre FIR .....	37

2.5.3.Le schéma du système PV avec la commande P&O avec filtrage FIR sur Simulink.....	38
2.5.4.Résultat de filtre d'ordre 32 .....	38
2.5.5.Résultat de filtre d'ordre 64 .....	40
2.5.6.Résultat de filtre d'ordre 128 .....	42
2.5.7.Interpretation .....	44
2.5.8. Resultat globale .....	48
2.6.Conclusion .....	48
Chapitre 03 : IMPLEMENTATION ET TEST DE COMMANDE P&O SUR ESP32 .....	51
3.1.INTRODUCTION .....	51
3.2.ÉTAPES DE REALISATION ET IMPLEMENTATION .....	51
3.2.1.Emulateur PV .....	51
3.2.2.Microcontrôleur Wemos D1 R32 ESP32 .....	52
3.2.2.Convertisseur DC/DC De Type Buck XL4015 .....	52
3.2.3.Passage d'un Convertisseur DC-DC Fixe à un Convertisseur DC-DC Variable .....	55
3.2.4.Circuit Adaptation DC-DC Et De Mesure .....	57
3.2.5. Charge Du Système : Led 10w 9v-12v Plus MCC 12V (Ventilateur) .....	61
3.3.IMPLEMENTAION ET TEST DE LA COMMANDE P&O AVEC FILTRE FIR SUR SYSTEME PV .....	62
3.4.Conclusion .....	66
Conclusion générale .....	67
Référencés bibliographiques .....	68

## Listes des figures

### CHAPITRE 01 : GENERALITE SUR SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

Figure 1.1. effet photovoltaïque .....	1
Figure 1.2. description d'une cellule photovoltaïque .....	1
Figure 1.3. cellule en silicium monocristallin .....	1
Figure 1.4. cellule en silicium poly cristalline .....	1
Figure 1.5. cellule en silicium amorphe .....	1
Figure 1.6. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque .....	1
Figure 1.7. Influence des résistances série et shunt sur la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque .....	1
Figure 1.8. Modules photovoltaïques .....	1
Figure 1.9. Association en série .....	1
Figure 1.10. Branchement en série .....	1
Figure 1.11. Association en parallèle .....	1
Figure 1.12. Branchement en parallèle .....	1
Figure 1.13. association en série/parallèle .....	1
Figure 1.14. branchement hybride (série\parallèle) .....	1
Figure 1.15. Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque .....	1
Figure 1.16. Influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire .....	1
Figure 1.17. Influence de la température sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire éclairée .....	1
Figure 1.18. Schéma d'un hacheur série (buck) .....	1
Figure 1.19. Schéma équivalent du hacheur série (Buck) à l'état de conduction .....	1
Figure 1.20. Schéma équivalent du hacheur (Buck) à la phase bloquée .....	1
Figure 1.21. Schéma d'un hacheur parallèle (boost) .....	1
Figure 1.22. Schéma d'un hacheur parallèle (boost) à l'état passant .....	1
Figure 1.23. Schéma d'un hacheur parallèle (boost) à la phase bloquée .....	1
Figure 1.24. Schéma d'un hacheur Buck-boost .....	1
Figure 1.25. Schéma d'un hacheur série-parallèle (buck-boost) à en mode passant .....	1
Figure 1.26. Schéma d'un hacheur série-parallèle (buck-boost) à l'état bloqué .....	1
Figure 1.27. principe générale d'une commande MPPT .....	1

Figure 1.28. Organigramme de l'algorithme Voc.....	1
Figure 1.29. Organigramme de l'algorithme Icc.....	1
Figure 1.30. Organigramme de l'algorithme 'INC' .....	1
Figure 1.31. organigramme de la méthode P&O.....	1
Figure2.1.synoptique d'un PV avec commande MPPT .....	1
Figure2.2. Modèle panneau photovoltaïque sur Simulink.....	1
Figure 2.3. Caractéristiques I-V et P-V du module PV utilisé.....	1
Figure 2.4. courbe de l'insolation.....	1
Figure 2.5. Modèle boost sur Simulink.....	1
Figure 2.6.schéma de la commande P&O sur Matlab Simulink.....	1
Figure 2.7.La variation de la tension $V_{pv}$ (V) en fonction du temps (s).....	1
Figure 2.8. La variation du courant $I_{pv}$ (A) en fonction du temps (s).....	1
Figure 2.9. La variation de la puissance $P_{pv}$ (W) en fonction du temps (s).....	1
Figure 2.10. La variation du rapport cyclique en fonction du temps (s).....	1
Figure 2.11. Réalisation directe de type 1 d'un filtre FIR.....	1
Figure 2.12. Organigramme de l'algorithme P&O avec un filtre.....	1
Figure 2.13. Le schéma Simulink du système PV avec la commande P&O avec filtrage FIR.....	1
figure 2.14. La variation de courant filtrée $I_{fpv}$ d'ordre 32 (A) en fonction du temps (s).....	1
Figure2.15. La variation de tension filtrée $V_{fpv}$ d'ordre 32 en fonction du temps (s).....	1
Figure 2.16. La variation de puissance filtrée $P_{fpv}$ d'ordre 32 en fonction du temps (s).....	1
Figure 2.17.La variation de rapport cyclique en fonction du temps (s) dans le cas de filtre d'ordre 32.....	1
Figure 2.18. La variation de la tension filtrée $V_{fpv}$ (V) en fonction du temps (s) de filtre d'ordre 64.....	1
Figure 2.19. La variation du courant filtrée $I_{fpv}$ (A) en fonction du temps (s) de filtre d'ordre 64.....	1
Figure 2.20. La variation de la puissance filtrée $P_{fpv}$ (W) en fonction du temps (s) de filtre d'ordre 64.....	1
Figure 2.21. La variation de rapport cyclique en fonction du temps (s) dans le cas de filtre d'ordre 64.....	1
Figure 2.22. La variation de courant filtrée $I_{fpv}$ d'ordre 128 en fonction du temps (s).....	1
Figure 2.23. La variation de tension filtrée $V_{fpv}$ d'ordre 128 en fonction du temps (s).....	1
Figure 2.24. La variation de puissance filtrée $P_{fpv}$ d'ordre 128 en fonction du temps (s).....	1
Figure 2.25. La variation de rapport cyclique en fonction du temps (s) 1dans le cas de filtre d'ordre 128.....	1
Figure 3.1. schéma de émulateur PV.....	1

Figure 3.2. description de la carte ESP32.....	1
Figure 3.3. Schéma fonctionnel de convertisseur buck xl4015 .....	1
Figure 3.4. Configurations des broches de buck xl4015.....	1
Figure 3.5. Schéma fonctionnel de buck xl4015(VIN=8V~36V, VOUT=5V/5A).....	1
Figure 3.6. schéma de convertisseur XL4015E1 dans le cas fixe.....	1
Figure 3.7. schéma de convertisseur xl4015e1 dans le cas variable.....	1
Figure 3.8. montre la relation entre Vfb et Vout.....	1
Figure 3.9. circuit d'adaptation de convertisseur DC-DC.....	1
Figure 3.10. Circuit de Mesure de Tension (VPV).....	1
Figure 3.11. Circuit de Mesure de Courant (IPV).....	1
Figure 3.12. circuit final d'adaptation et de mesure courant et tension avec régulateur de tension.....	1
Figure 3.13. la charge du système PV (a) L'ampoule LED 10W (b) ventilateur 12v.....	1

## Liste des tableau

### Chapitre 02 : SYNTHSE ET SIMULATION D'UNE COMMANDE MPPT

Tableau 2.1. Caractéristiques électriques du module PV.....	1
Tableau 2.2. Les valeurs des composants du convertisseur boost.....	1
Tableau 2.3. les paramètres utiliser dans le régulateur de charge PWM.....	1
Tableau 2.4. Effets des filtres FIR sur la courbe de courant.....	1
Tableau 2.5. Effets des filtres FIR sur la courbe de tension.....	1
Tableau 2.6. Effets des filtres FIR sur la courbe de puissance.....	1
Tableau 2.7. Effets des filtres FIR sur la courbe de rapport cyclique.....	1

### Chapitre 03 : IMPLEMENTATION ET TEST DE COMMANDE P&O SUR ESP32

Tableau 3.1. Description des broches.....	1
-------------------------------------------	---

## LISTE DES ABREVIATIONS

- MPPT:** Maximum Power Point Tracking
- GPV:** Générateur Photovoltaïque
- DC-DC:** Convertisseur Direct-Continu à Direct-Continu
- FIR:** Finite Impulse Response (filtre à réponse impulsionnelle finie)
- ESP-32:** Microcontrôleur ESP32
- PV:** Panneau Solaire
- P&O:** Perturb and Observe (méthode de contrôle)
- PERC :** les cellules bifaciales améliorent leur rendement.
- INC:** La méthode Conductance Incrémentale.
- V:** tension (V).
- I:** courant (A).
- P:** puissance (W).
- D:** rapport cyclique.
- VOPT:** Tension Optimale.
- VCO:** Tension de Circuit Ouvert.
- ICC:** Courant de Court-Circuit.
- Vmp :** Tension du panneau à la puissance maximale.
- PMAX:** Puissance Maximale.
- PPM:** Point de Puissance Maximale.
- FF:** Facteur du forme.
- $\eta$  :** le rendement.
- NP:** Nombre de Cellules en Parallèle.
- NS:** Nombre de Cellules en Série.
- G:** la conductance
- PWM:** Pulse Width Modulation (modulation de largeur d'impulsion).
- IPV:** courant Photovoltaïque.
- VPV:** tension Photovoltaïque.

**IF<sub>pv</sub>**: courant filtré.

**PF<sub>pv</sub>**: puissance filtrée.

**VF<sub>pv</sub>**: tension filtrée.

**I<sub>d</sub>**: Courant de diode

**I<sub>s</sub>**: courant de saturation inverse .

**R<sub>s</sub>**: résistance série.

**R<sub>sh</sub>**: résistance shunt.

**V<sub>T</sub>**: la tension thermique

**E**: l'éclairement

**I<sub>ph</sub>** : courant de photopile.

**PN** : La jonction.

**IIR** : Infinite Impulse Response.

**IGBT** : Insulated Gate Bipolar Transistor.

**C-IN** : Capacité –Entrée.

**C-OUT** : Capacité –sortie.

**R-ch** : Résistance de la charge.

**L**: Inductance.

**FB** : Feedback

## Introduction generale

L'essor des énergies renouvelables, en particulier l'énergie solaire photovoltaïque, exige une optimisation permanente des systèmes de conversion d'énergie. L'efficacité de ces installations dépend crucialement des algorithmes de poursuite du point de puissance maximale (MPPT), qui garantissent l'extraction optimale de l'énergie malgré les variations climatiques et environnementales.

Parmi les techniques MPPT, la méthode Perturb and Observe (P&O) s'impose par sa simplicité et sa robustesse opérationnelle. , elle présente un défaut majeur : des oscillations persistantes autour du point optimal, générant des pertes énergétiques significatives et limitant l'efficacité globale du système photovoltaïque néanmoins.

Pour atténuer cette limitation, le filtrage numérique des grandeurs électriques (tension et courant) apparaît comme une solution prometteuse. Les filtres RIF (à Réponse Impulsionnelle Finie) offrent des avantages clés dans ce contexte, notamment leur stabilité inhérente, leur linéarité de phase et leur résistance aux erreurs numériques. Leur implémentation sur plate-forme embarquée (microcontrôleurs 32 bits) nécessite toutefois une optimisation poussée pour concilier précision, vitesse d'exécution et frugalité des ressources.

Cette mémoire de fin d'études est consacrée à la conception et à la réalisation d'une commande P&O intégrant un filtre RIF spécialement optimisé pour les architectures 32 bits . L'étude poursuit trois objectifs complémentaires : réduire les oscillations parasites sans altérer la vitesse de suivi MPPT, optimiser l'implémentation du filtre via les unités de calcul en virgule fixe des microcontrôleurs modernes, et valider expérimentalement la solution sur un convertisseur DC/DC boost piloté en temps réel.

Les défis techniques couvrent la synthèse du filtre (sélection de l'ordre, fréquence d'échantillonnage), la gestion des contraintes numériques (débordements, quantification des coefficients), et l' arbitrage entre précision et efficacité dans un cadre embarqué. Positionné à l'intersection de l'automatique, du traitement du signal et de l'informatique industrielle, ce travail propose une approche pragmatique pour améliorer le rendement énergétique des systèmes PV tout en respectant les contraintes des dispositifs électroniques grand public.

**CHAPITRE 01**  
**GENERALITE SUR SYSTEME**  
**PHOTOVOLTAÏQUE**

# CHAPITRE 01 : GENERALITE SUR SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

---

## 1.1.Introduction

Les énergies renouvelables telles que le solaire, l'éolien et la géothermie sont fondamentales à l'électricité de production. L'énergie solaire en particulier constitue un optimum en raison de sa disponibilité et faible en envie en terme d'effet sur la nature. C'est converti en électricité à l'aide de modules photovoltaïques (PV) dont la puissance maximale (MPP) varie en raison des paramètres comme la température et l'ensoleillement. Pour optimiser cette puissance, des techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) sont utilisées dans les systèmes photovoltaïques hors réseau (batteries comme dispositifs de stockage) et connectés au réseau (avec convertisseurs et onduleurs spéciaux). Les techniques MPPT sont toutes classées en deux catégories : Indirectes (telles que le circuit ouvert ou court-circuit), qui sont basées sur des données antérieures concernant le générateur PV et sont imprécises devant les fluctuations météorologiques. Elles nécessitent également des capteurs chers pour la mesure de température et d'irradiante. Directes (Perturbation & Observation, Conductance Incrémentale, logique floue), plus flexibles et utilisées en grande quantité dans les systèmes commerciaux. Elles sont faciles à exécuter, compatibles avec n'importe quel type de générateur PV, et n'impliquent pas de données préalables. Enfin, les méthodes MPPT peuvent également être classés comme conventionnels (comme P&O) et intelligents (comme la logique floue).[1]

## 1.2.Le photovoltaïque fonctionnement et technologie

### 1.2.1.L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un phénomène remarquable : lorsque les photons de la lumière solaire sont absorbés par un matériau semi-conducteur, ils génèrent une tension électrique. Les cellules photovoltaïques convertissent cette énergie en courant continu, utilisable pour alimenter divers dispositifs ou recharger des batteries.Quand un photon atteint la cellule, il transfère son énergie à un électron du semi-conducteur, ce qui crée une paire électron-trou. La cellule agit comme une diode, composée de deux couches dopées (N et P), produisant un champ électrique permanent. Ce champ permet la séparation des charges, induisant une différence de potentiel. Dès qu'un circuit est connecté, un courant électrique peut alors circuler.[2]

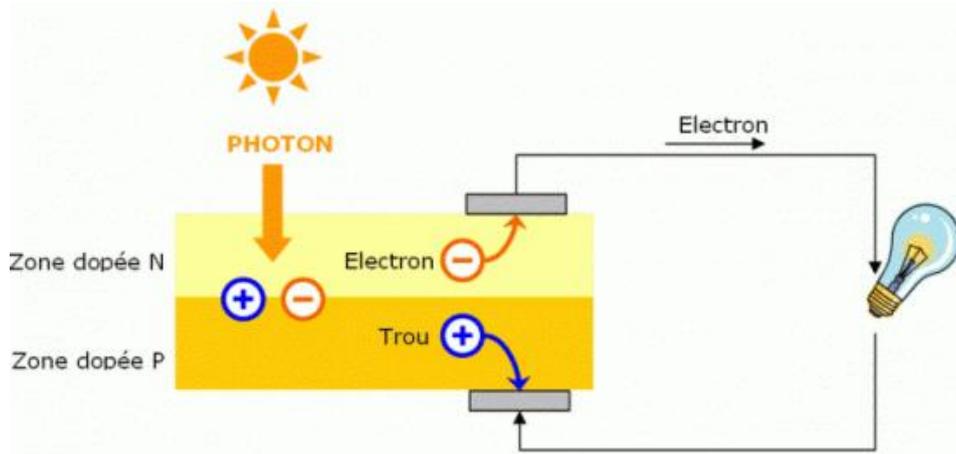


Figure 1.1. effet photovoltaïque

### 1.2.2. Cellule Solaire Photovoltaïque

Une cellule solaire est un dispositif semi-conducteur à couches minces, capable de convertir le rayonnement solaire en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Lorsqu'elle est exposée à la lumière, l'énergie des photons incidentes (supérieure à la bande interdite du matériau) libère des électrons, générant ainsi des porteurs de charge. Si le circuit est fermé, ces charges créent un courant électrique.

Un champ électrique interne se forme, séparant les porteurs de charge opposés. Leur déplacement produit un courant, appelé photocourant. Fonctionnellement, une cellule photovoltaïque se comporte comme un système non linéaire, équivalent à une source de courant placée en parallèle avec une diode idéale.[3]

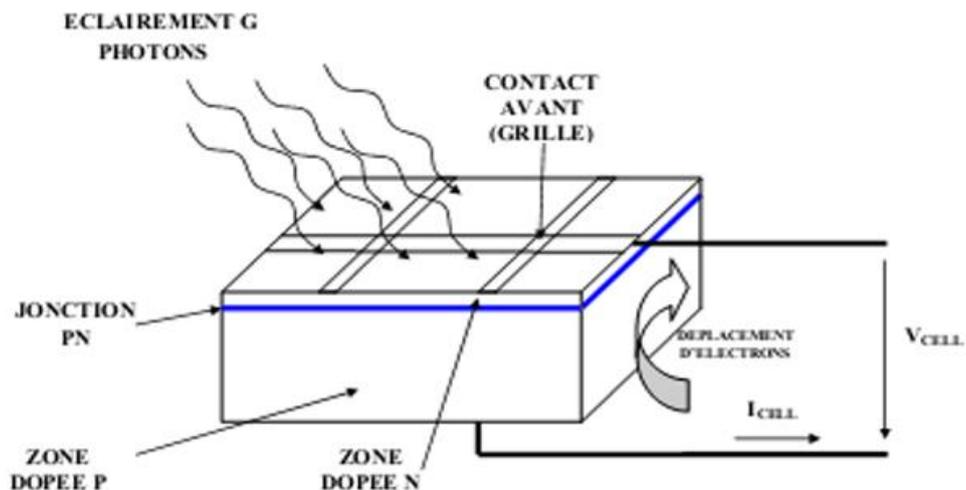


Figure 1.2. description d'une cellule photovoltaïque

### 1.2.3. Technologie des cellules PV

### 1.2.3.1. La cellule en silicium monocristallin

Les cellules monocristallines sont des composants photovoltaïques élaborés à partir de silicium monocristallin, un semi-conducteur extrêmement pur. Reconnaisables à leur teinte homogène, généralement noire ou bleu foncé, et à leur surface lisse, elles sont produites par découpe de fines tranches (wafers) dans un lingot de silicium monocristallin. Leur structure cristalline parfaitement ordonnée et leur haute pureté leur confèrent un rendement énergétique élevé, typiquement compris entre 26,1%, surpassant ainsi les cellules polycristallines. Cependant, leur fabrication plus complexe et les pertes de matière engendrent un coût de production plus élevé.[4]



Figure 1.3. cellule en silicium monocristallin

### 1.2.3.2. La cellule en silicium poly-cristalline

Les cellules photovoltaïques polycristallines sont fabriquées à partir de blocs de silicium fondu et refroidi lentement, ce qui crée plusieurs cristaux visibles sous forme de motifs bleuâtres. Elles sont moins coûteuses que les cellules monocristallines, mais leur efficacité est légèrement inférieure (23.3 %). Elles sont plus sensibles aux variations de température et ont une apparence moins uniforme. Toutefois, des innovations comme la technologie PERC ou les cellules bifaciales améliorent leur rendement. Elles restent une option économique et durable pour la production d'énergie solaire. [5]

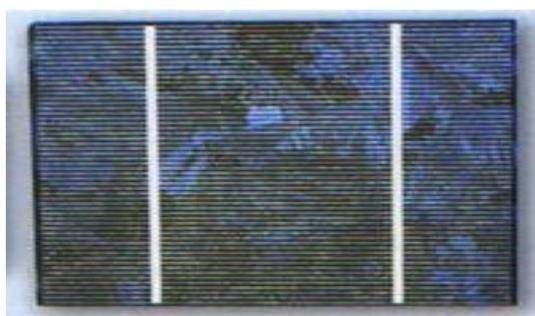


Figure1.4. cellule en silicium poly cristalline

### 1.2.3.3. Cellule au silicium amorphe

Les cellules photovoltaïques en silicium amorphe sont une technologie de couche mince, où le silicium est déposé sous forme d'une fine couche sur un substrat, offrant flexibilité et légèreté. Bien que leur rendement soit inférieur à celui du silicium cristallin (14%), elles absorbent mieux la lumière et fonctionnent sous faible luminosité. [6]

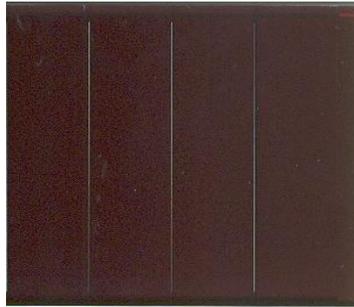


Figure 1.5. cellule en silicium amorphe

### 1.2.4. Modèle électrique d'une cellule solaire

Le schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque peut être décrit par le modèle à une exponentielle

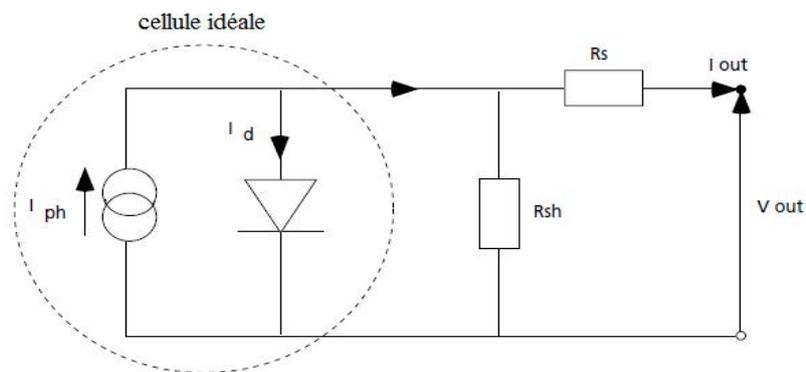


Figure 1.6. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

Le courant fourni par une cellule idéale est donné par la relation suivante :

$$I(V) = I_{ph}(\theta) - I_d(V) \quad (1.1)$$

où :

$I(V)$  : courant disponible

V : tension aux bornes de la jonction

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

$I_d(V)$ : courant de diode.

Le courant de diode s'exprime par la formule :

$$I_d(V) = I_s \left( \exp \frac{V}{VT \cdot \alpha} - 1 \right) \quad (1.2)$$

Avec :

$+ VT = \frac{KT}{q}$  la tension thermique, égale à 26 mV à 300 K pour le silicium

K : constant de Boltzman =  $1,381 \cdot 10^{-23}$  j/K

q : charge électrique élémentaire [ $1,6 \cdot 10^{-19}$ As]

+  $\alpha$  un facteur technologique dépendant du type et de la fabrication de la diode, généralement compris entre 1 et 2

+  $I_s$  : courant de saturation inverse de la diode

Modèle réel de la photopile avec résistances :

En pratique, une photopile comporte deux résistances importantes :

une résistance série  $R_s$

une résistance de shunt (ou dérivation)  $R_{sh}$

Le modèle complet s'écrit alors :

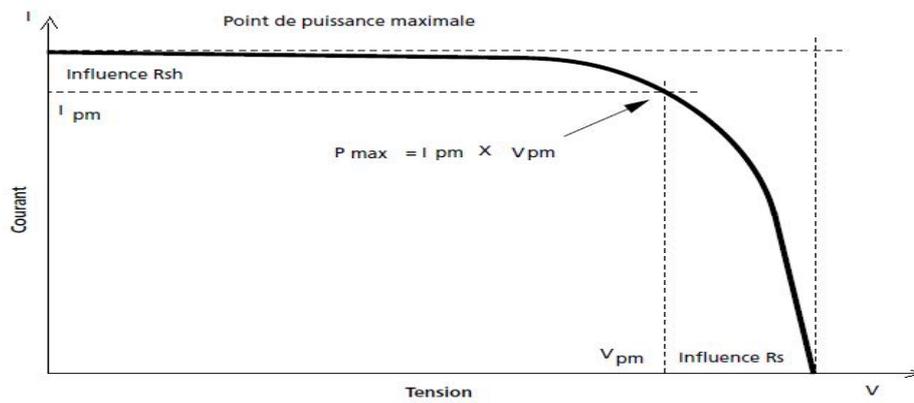
$$I = I_{ph} - I_s \exp \left( \frac{q(V + R_s I)}{\alpha \cdot KT} \right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (1.3)$$

Influence des résistances sur la caractéristique courant-tension

**Résistance série  $R_s$**  : c'est la résistance interne de la cellule, qui dépend du semi-conducteur, de la résistance de contact des grilles collectrices et de leur résistivité. Elle limite le courant lorsque la tension augmente

**Résistance shunt  $R_{sh}$**  : elle est due à un courant de fuite à la jonction, lié à la qualité de fabrication. Elle provoque des pertes de courant, surtout à faible tension.

Ces résistances modifient la courbe caractéristique  $I = f(V)$   $I=f(V)$  de la photopile, et leur prise en compte est essentielle pour un modèle réaliste.[7]



**Figure 1.7.** Influence des résistances série et shunt sur la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque

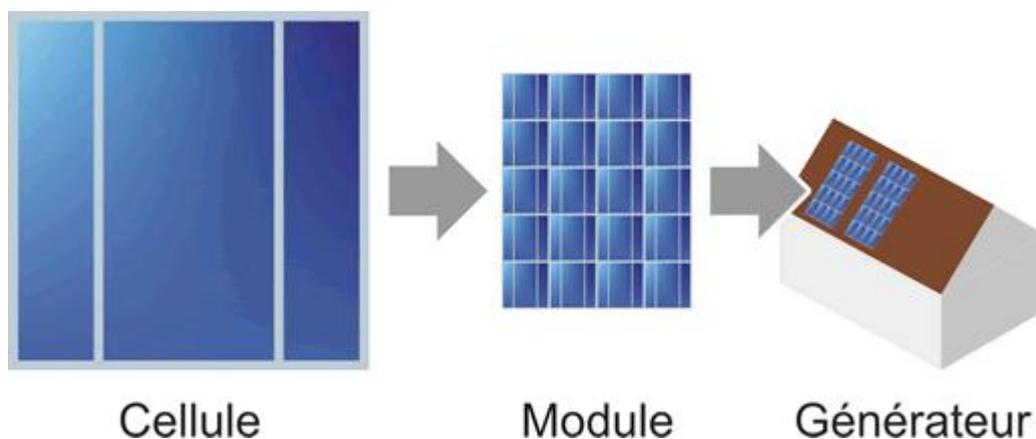
### 1.3. Générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque (GPV), est un ensemble de modules en série/parallèle pour une puissance et tension souhaitées, il est défini par une caractéristique tension de courant statique (IV) non linéaire et comporte un point de puissance maximale (PPM). Cette caractéristique dépend du niveau d'éclairement et de la tension de la cellule. [8]

#### 1.3.1. Le Module Photovoltaïque

Pour générer une tension électrique exploitable, plusieurs cellules sont connectées en série pour former une chaîne. Un module photovoltaïque est constitué de plusieurs chaînes. L'assemblage de ces modules permet :

- D'atteindre une tension adéquate,
- De préserver les cellules et leurs connexions métalliques des agressions extérieures (comme l'humidité),
- D'assurer une protection mécanique des cellules contre les chocs. [9]



**Figure 1.8.** Modules photovoltaïques

### 1.3.2. Association Des Cellules

#### 1.3.2.1. Association en série

L'association en série de  $n_s$  cellules photovoltaïques permet d'augmenter la tension du générateur, tandis que le courant reste constant. Ce montage, très courant dans les modules commerciaux, additionne les tensions de chaque cellule. Il est particulièrement utile car, malgré l'augmentation du courant due à l'agrandissement des cellules, leur tension individuelle reste faible. En connectant 36 cellules en série, on obtient une tension d'environ 21,6 V, adaptée au chargement de batteries 12 V.[9]

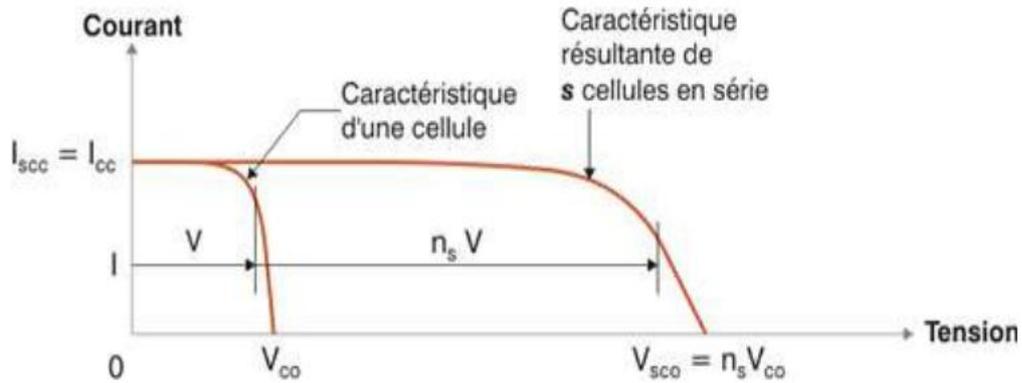


Figure 1.9. Association en série.

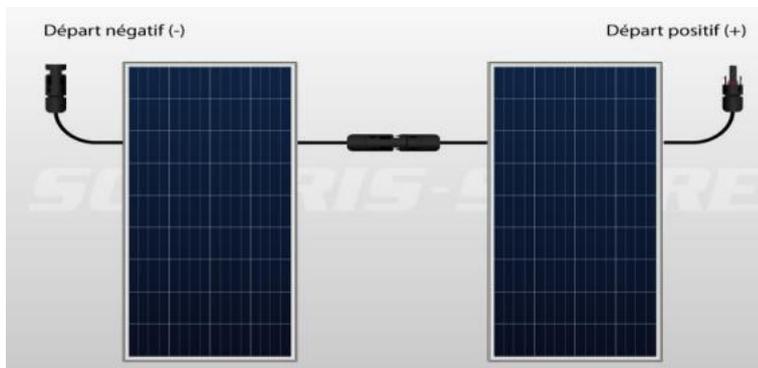


Figure 1.10. Branchement en série

#### 1.3.2.2. Association parallèle

Une configuration parallèle de  $n_p$  cellules peut être réalisée afin d'augmenter le courant de sortie du générateur obtenu. Dans un assemblage de cellules identiques connectées en parallèle, toutes les cellules sont soumises à la même tension. La caractéristique globale du groupement est alors déterminée par la somme des courants individuels. L'équation exprime les caractéristiques électriques d'un tel montage parallèle de  $n_p$  cellules [9], où :

$$I_{cc, np} = n_p \times I_{cc} \quad (1.4)$$

et

$$V_{co,np} = V_{co} \quad (1.5)$$

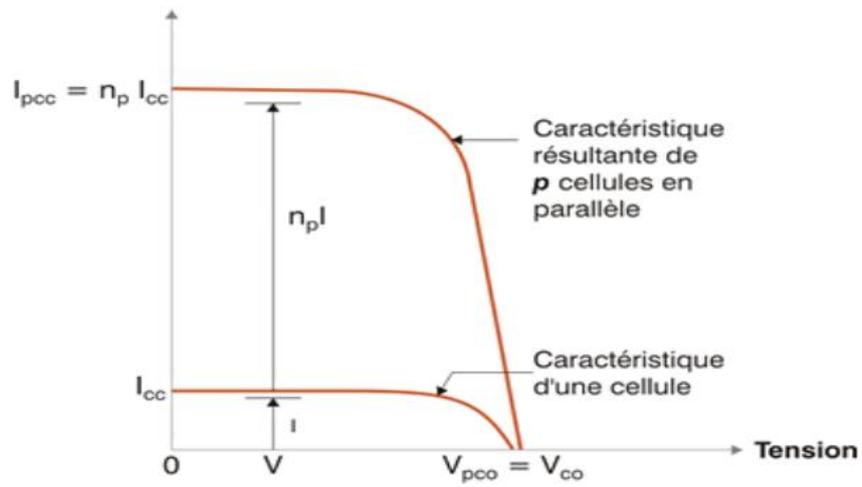


Figure 1.11. Association en parallèle.

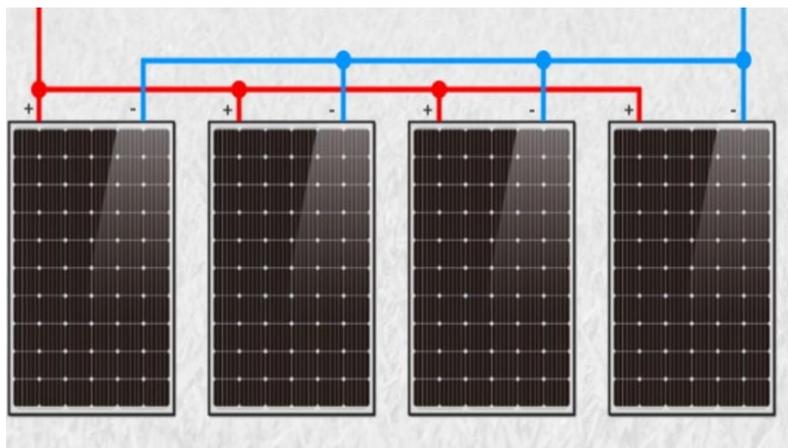


Figure 1.12. Branchement en parallèle

### 1.3.2.3. Association hybride (série parallèle)

Le courant de court-circuit et la tension à vide totaux dépendent du nombre de cellules en parallèle et en série

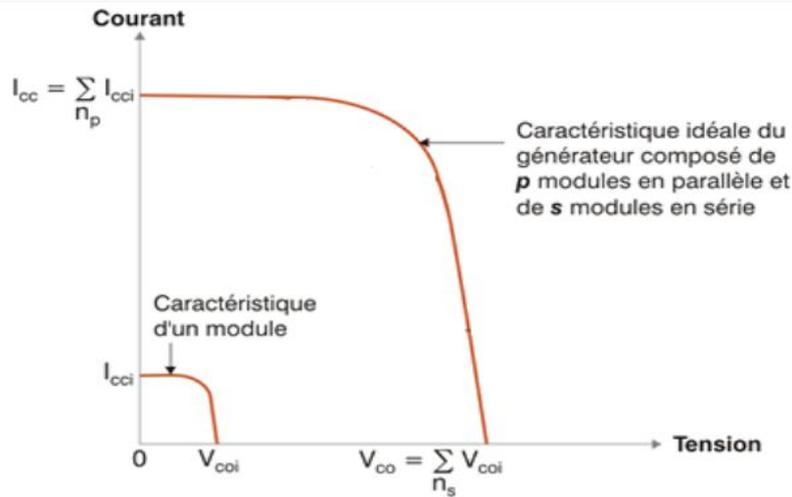


Figure 1.13. association en série/parallèle

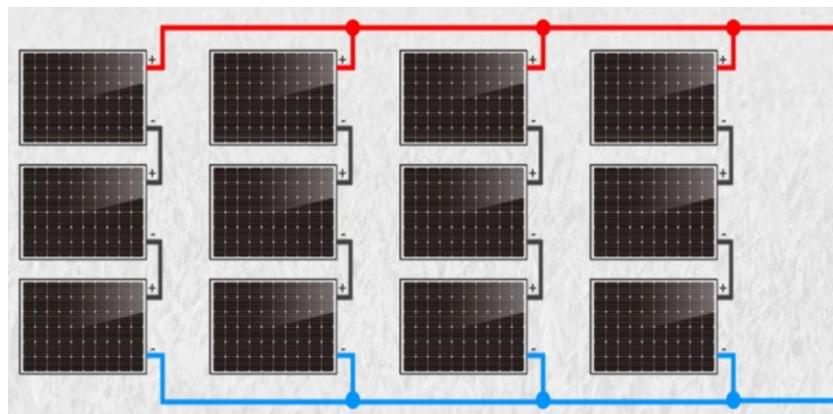


Figure 1.14. branchement hybride (sériés\parallèle)

## 1.4. CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE

### 1.4.1. La tension à circuit ouvert (Voc):

La tension à vide (ou tension en circuit ouvert) est la tension mesurée aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge ou lorsqu'elle est connectée à une charge de résistance infinie. Sa valeur diminue avec l'augmentation de la température et varie peu en fonction de l'irradiation. Elle correspond à la tension lorsque le courant de la cellule est nul. On la note généralement  $V_{co}$  (V lorsque  $I = 0$ ). [10]

### 1.4.2. Le courant de court-circuit (Icc)

C'est le courant maximal que la cellule peut fournir. Ce courant dépend de plusieurs facteurs, notamment la surface de la cellule exposée à la lumière, le spectre du rayonnement solaire ainsi que la

température. Il augmente de manière linéaire avec l'intensité lumineuse reçue par la cellule. Ce courant est mesuré lorsque la tension aux bornes de la cellule est nulle, soit

$$I(V = 0) = I_{cc}. \quad (1.6)$$

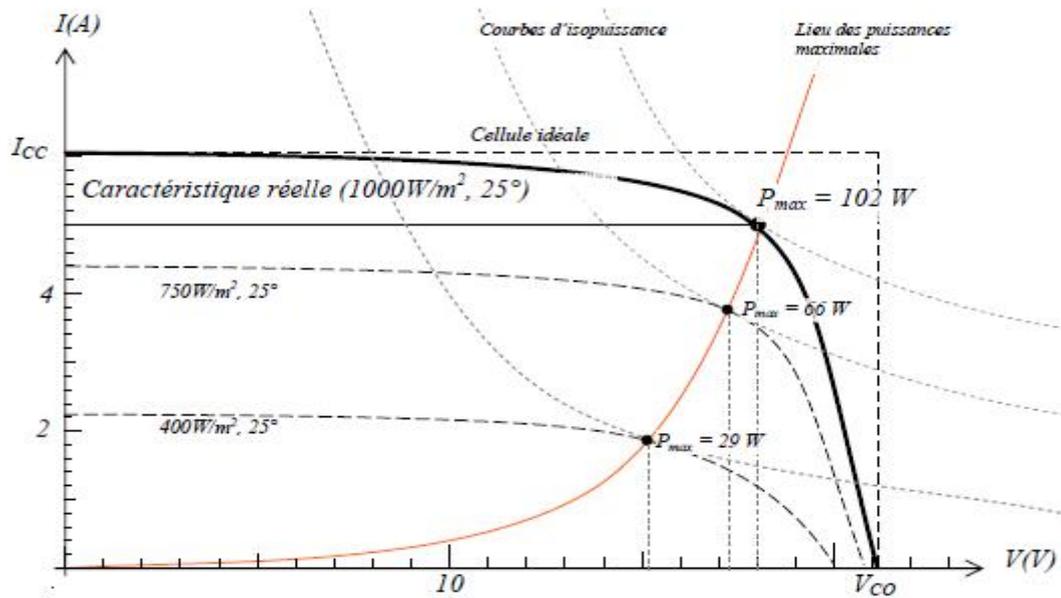


Figure 1.15. Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque

### 1.4.3. La puissance maximale (Pmax)

La puissance maximale fournie par une cellule photovoltaïque correspond au point où le produit de la tension et du courant, mesurés à ses bornes, est le plus élevé.

Cette puissance maximale est généralement déterminée dans des conditions de référence appelées STC (Standard Test Conditions), soit un ensoleillement de  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température ambiante de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . [9]

### 1.4.4. Le Rendement

C'est le paramètre principal des cellules photovoltaïques, représentant en fait le rendement de la conversion en puissance. Ce coefficient est défini par la valeur de la puissance maximum, qui est émise par la cellule  $P_{max}$ , à savoir la puissance de lumière incidente  $P_{in}$ . Ce coefficient est calculé à partir de la relation :

$$\eta = \frac{P_{max}}{S \cdot E} \quad (1.7)$$

Où  $S$  est la surface du photo-générateur [ $\text{m}^2$ ],  $E$  est l'éclairement [ $\text{W/m}^2$ ],  $P_{max}$  est la puissance électrique du photo-générateur [ $\text{W}$ ]. [10]

### 1.4.5. Le facteur de forme (FF)

Le facteur de forme (FF) est essentiellement un indicateur de la qualité d'une cellule solaire. Il se calcule en comparant la puissance maximale délivrée par la cellule ( $P_{max}$ ) à la puissance théorique

(Pt), obtenue en multipliant la tension en circuit ouvert (Voc) par le courant de court-circuit (Icc)[10]. Il est défini par la relation suivante :

$$ff = \frac{P_{max}}{V_{co}.I_{cc}} \quad (1.8)$$

ou:

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

## 1.5. INFLUENCE DE l'éCLAIREMENT ET TEMPERATURE SUR LE COMPORTEMENT DU

### MODULE PV

#### 1.5.1. Influence de l'éclairage

La figure met en évidence à quel point change le courant et la tension d'une cellule solaire monocristalline de taille (10×10) cm<sup>2</sup> selon des différentes intensités de lumière solaire. Nous pouvons voir comment le courant de court-circuit (Icc) augmenter en fonction de l'intensité lumineuse. Ce courant peut être calculé à l'aide de la formule suivante :

$$I_{cc} \approx I_{ph} = \alpha(T) \times E \times S \quad (1.9)$$

Où :

E est l' éclairage (ou la densité de la lumière) en W/m<sup>2</sup> ,S est la surface de la cellule en m<sup>2</sup>,  $\alpha(T)$  est un coefficient de température relativement faible , mesuré en A/W. De plus , à mesure que l' éclairage augmente , la tension du vide ( Vco ) augmente également avec une légère.[11]

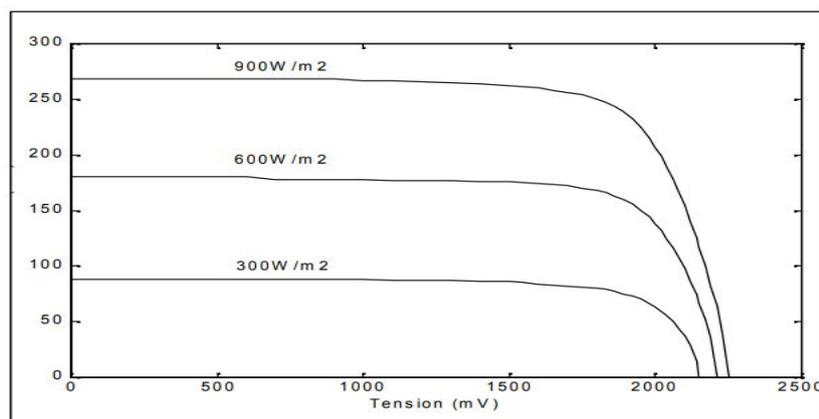
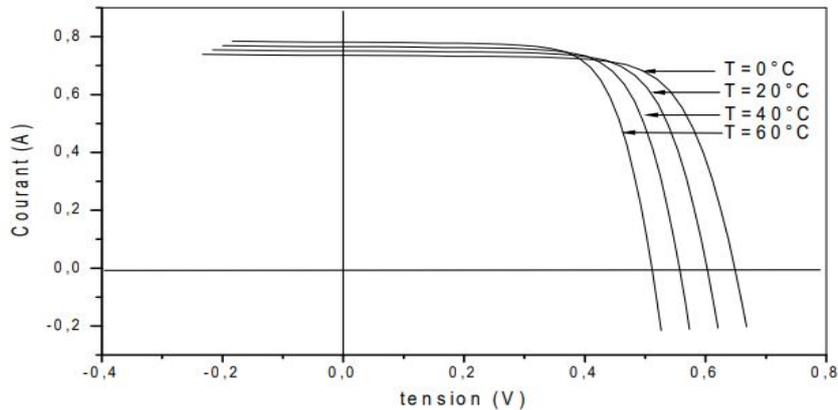


Figure 1.16. Influence de l'éclairage sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire

#### 1.5.2. Influence de température

La température joue un rôle très important dans le fonctionnement des cellules solaires, car elles sont directement exposées au soleil. La figure montre comment la température influence la courbe courant-tension (I-V) d'une cellule solaire.

Quand la température augmente, le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) augmente légèrement, mais la tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ ) diminue fortement. Cela provoque aussi une baisse de la tension ( $V_m$ ), une légère hausse du courant ( $I_m$ ), et finalement une diminution de la puissance maximale ( $P_m$ ) que peut fournir la cellule.[11]



**Figure 1.17.** Influence de la température sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire éclairée.

## 1.6. LES CONVERTISSEURS DC-DC

Les convertisseurs DC-DC sont des dispositifs clés en électronique, permettant de convertir efficacement une tension continue en une autre tension réglable. Ils utilisent des principes électriques et magnétiques, combinant des inductances, des condensateurs et des commutateurs (comme les MOSFET) pour contrôler le transfert d'énergie. Par exemple, dans un convertisseur buck, l'inductance stocke et restitue l'énergie selon le cycle de commutation, assurant une régulation précise de la tension de sortie avec un rendement élevé. Leur commande par un signal à rapport cyclique variable offre une grande flexibilité.[12]

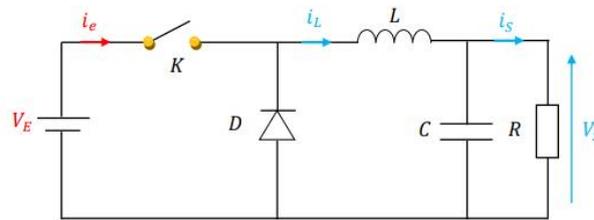
### 1.6.1. Type De Convertisseur DC-DC

En fonction de la configuration du commutateur et du hacheur, il est possible de concevoir différents types de convertisseurs DC-DC :

- Le convertisseur abaisseur de tension, couramment appelé « Buck » ;
- Le convertisseur élévateur de tension, également connu sous le nom de « Boost » ;
- Le convertisseur abaisseur-élévateur de tension, généralement désigné par « Buck Boost ».

### 1.6.2. Hacheur série (Buck)

Un convertisseur Buck est un type de convertisseur continu-continu (DC-DC) qui permet de réduire une tension d'entrée continue à une tension de sortie également continue, mais généralement inférieure. Il assure en même temps une régulation efficace de cette tension de sortie. Ce type de convertisseur repose sur un hacheur en série, dont le schéma de principe est illustré dans la figure.[13]



**Figure 1.18.** Schéma d'un hacheur série (buck)

Pour un rapport cyclique \$D\$ fixé et en régime de conduction continue, la tension moyenne de sortie s'exprime par :

$$V_S = D \cdot V_E \quad (1.10)$$

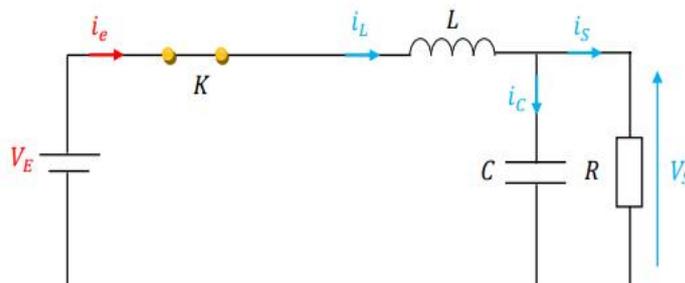
À partir de cette relation, le rapport de conversion du convertisseur Buck est défini par :

$$M(D) = \frac{V_S}{V_E} = D \quad (1.11)$$

**Principe de fonctionnement :**

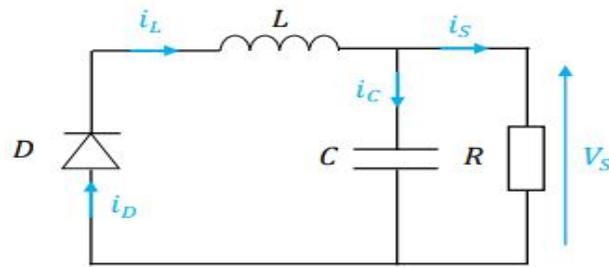
Le fonctionnement du convertisseur abaisseur (Buck) peut être analysé selon deux régimes distincts, déterminés par l'état de l'interrupteur \$K\$ : lorsqu'il est en conduction (état passant) et lorsqu'il est ouvert (état bloqué).[14]

**Pendant la phase de conduction (\$0 < t < DT\$),** l'interrupteur \$K\$ est fermé, ce qui permet au courant de circuler dans le circuit. Durant cette période, l'énergie est stockée dans l'inductance \$L\$, tandis que la diode, polarisée en inverse, bloque le passage du courant. Le courant \$i\_L\$ dans l'inductance croît de façon linéaire, selon la valeur de \$L\$.



**Figure 1.19.** Schéma équivalent du hacheur série (Buck) à l'état de conduction.

**Pendant la phase bloquée ( $DT < t < T$ ),** l'interrupteur K est ouvert. L'énergie emmagasinée dans l'inductance L est alors transférée à la charge à travers la diode. Le courant  $i_L$  dans l'inductance décroît progressivement, fournissant ainsi l'alimentation à la charge connectée au circuit.



**Figure1.20.** Schéma équivalent du hacheur (Buck) à la phase bloquée.

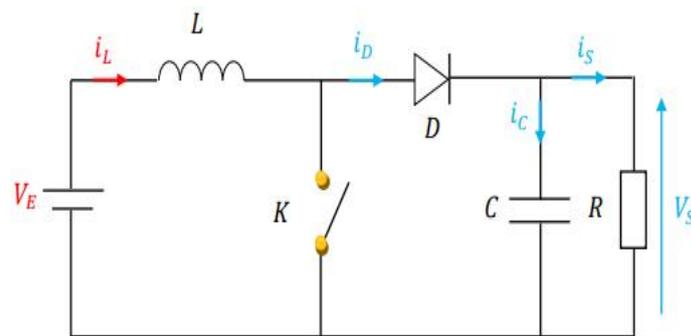
### 1.6.3.Hacheur parallèle (Boost)

Le hacheur boost assure l'interface énergétique entre une source de courant continu et une source de tension continue, avec pour fonction de stabiliser une tension moyenne  $V_s$  aux bornes de la charge[15]. Pour un rapport cyclique donné D, et en régime de conduction continue, la tension moyenne en sortie s'exprime comme suit :

$$V_s = \frac{1}{1-D} \times V_E \tag{1.12}$$

On trouve :

$$M(D) = \frac{V_s}{V_E} = \frac{1}{1-D} \tag{1.13}$$

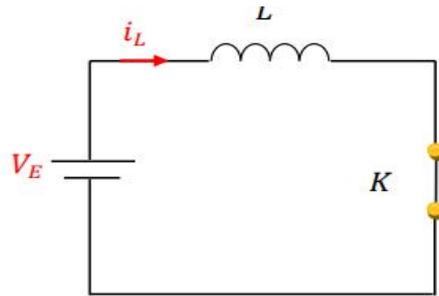


**Figure 1.21.** Schéma d'un hacheur parallèle (boost).

### Principe de fonctionnement

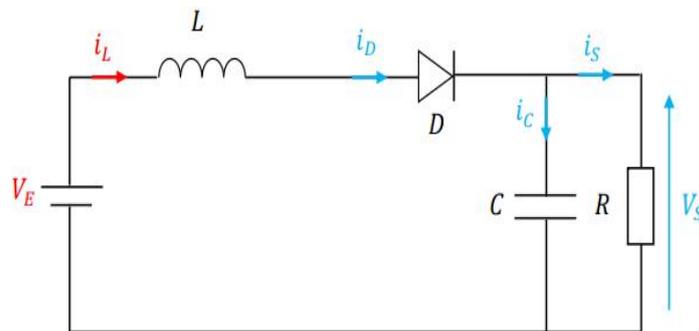
**Pendant l'état passant ( $0 < t < DT$ ),** lorsque l'interrupteur K est fermé, le courant à travers l'inductance L augmente de manière linéaire, entraînant ainsi un stockage d'énergie dans cette

dernière. Le condensateur **C** alimente la charge **R** durant cette phase. La diode étant bloquée, la charge se trouve alors isolée de la source d'alimentation.



**Figure 1.22.** Schéma d'un hacheur parallèle (boost) à l'état passant.

**Pendant la phase bloquée ( $DT < t < T$ ),** lorsque l'interrupteur **k** est ouvert, l'énergie accumulée dans l'inductance **L** est transférée vers le condensateur ainsi que la charge **R**. Au cours de cette période, la disposition de l'inductance **L** en série avec la source de tension d'entrée permet d'assurer un fonctionnement en mode élévateur de tension (boost).[15]

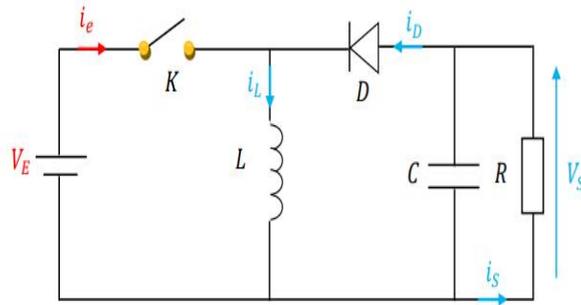


**Figure 1.23.** Schéma d'un hacheur parallèle (boost) à la phase bloquée.

#### 1.6.4. Le convertisseur Buck- Boost

Le convertisseur Buck-Boost est un type d'alimentation à découpage qui transforme une tension continue en une tension continue de valeur différente (inférieure ou supérieure), mais avec une polarité inversée. Cependant, ce convertisseur présente un inconvénient : son interrupteur n'est pas connecté à la masse, ce qui rend sa commande plus complexe.

Le convertisseur buck-boost, aussi connu sous le nom d'abaisseur-élévateur, doit son appellation à sa capacité à délivrer une tension de sortie soit inférieure, soit supérieure à la tension d'entrée. Cette caractéristique est directement déterminée par la valeur du rapport cyclique. [16],Le hacheur Buck-Boost opère en mode Boost pour  $D > 0,5$  et en mode Buck pour  $D < 0,5$ .

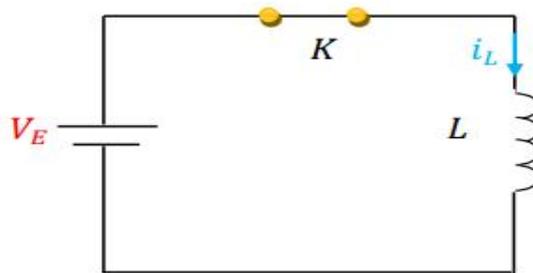


**Figure 1.24.** Schéma d'un hacheur Buck-boost.

### Principe de fonctionnement

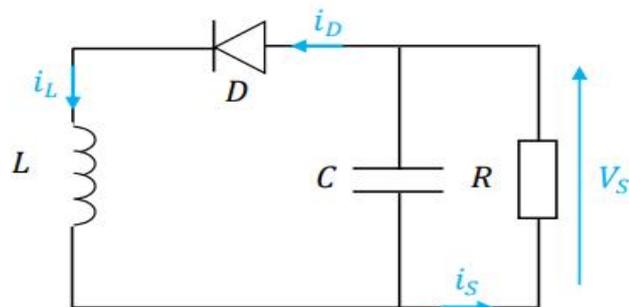
Le convertisseur Buck-Boost opère selon deux modes distincts, déterminés par l'état de l'interrupteur K (ouvert ou fermé).

- **En mode passant**( $0 < t < DT$ ), l'interrupteur K1 est fermé, ce qui permet une augmentation de l'énergie stockée dans l'inductance.



**Figure 1.25.** Schéma d'un hacheur série-parallèle (buck-boost) à en mode passant.

- **En mode bloqué é** ( $DT < t < T$ ), l'interrupteur K1 est ouvert. L'inductance est alors connectée à la charge et au condensateur, ce qui entraîne un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la charge et le condensateur.[16]



**Figure 1.26.** Schéma d'un hacheur série-parallèle (buck-boost) à l'état bloqué.

## 1.7. LA COMMANDE MPPT

### 1.7.1. Définition De MPPT

Le MPPT (Maximum Power Point Tracking) est une technique qui permet à un générateur photovoltaïque de fonctionner à sa puissance maximale, quelle que soit l'évolution des conditions météorologiques (ensoleillement et température). Son principe repose sur l'ajustement automatique du rapport cyclique (D) d'un convertisseur DC-DC, afin d'atteindre la valeur optimale pour maximiser en permanence la puissance délivrée par le panneau solaire. Les hacheurs, utilisés comme interfaces de puissance, sont pilotés par le régulateur MPPT pour adapter la tension de sortie à celle requise par la charge. Selon le type de contrôleur utilisé, différentes méthodes peuvent être appliquées pour extraire le maximum de puissance disponible du panneau solaire.[17]

### 1.7.2. Principe De MPPT

Le principe de base du MPPT (Maximum Power Point Tracking) a pour objectif de maximiser la puissance extraite d'un générateur photovoltaïque (GPV) en ajustant en permanence son point de fonctionnement pour qu'il coïncide avec le Point de Puissance Maximale (PPM), lequel varie en fonction des conditions d'ensoleillement, de température et de charge. Pour cela, un étage d'adaptation (convertisseur statique DC/DC ou DC/AC) est inséré entre le GPV et la charge, et la commande MPPT agit sur le rapport cyclique du convertisseur afin de modifier la tension ou le courant du GPV, permettant ainsi d'atteindre et de maintenir le PPM dans des conditions variables.[18]



Figure 1.27. principe générale d'une commande MPPT.

### 1.7.3. Méthodes de Commande MPPT

#### 1.7.3.1. Méthodes Indirectes

Ce type de commande MPPT exploite la relation entre des variables mesurables, comme le courant de court-circuit (**I<sub>cc</sub>**) ou la tension en circuit ouvert (**V<sub>oc</sub>**), pour estimer la position approximative du point de puissance maximale (MPP). Certaines méthodes s'appuient sur un modèle paramétrique

prédéfini pour évaluer le point de fonctionnement du générateur photovoltaïque (GPV). D'autres approches se basent uniquement sur les variations de température mesurées par un capteur pour ajuster la tension optimale.

Ces commandes sont simples à mettre en œuvre et conviennent particulièrement aux systèmes économiques et peu précis, destinés à des zones aux conditions climatiques stables. Parmi ces méthodes, on trouve notamment :

- La méthode de la tension en circuit ouvert (**Voc**)
- La méthode du courant de court-circuit (**Icc**)

Ces techniques offrent une solution abordable mais moins adaptée aux environnements à forte variabilité météorologique[19].

### **1.7.3.2.Méthodes Directes**

Les techniques directes consistent à mesurer la tension et le courant du panneau photovoltaïque et à calculer sa puissance. Si la puissance augmente , la recherche se poursuit dans la même direction ; sinon , elle est inversée. Des perturbations sinusoïdales sont utilisées dans certains algorithmes pour comparer les parties continue et alternative de la tension , ajustant ainsi le point de fonctionnement au point de puissance maximal. Ces techniques , telles que Perturbe & Observe (P&O) et la conductance incrémentale (Inc), sont précises et rapides .[19]

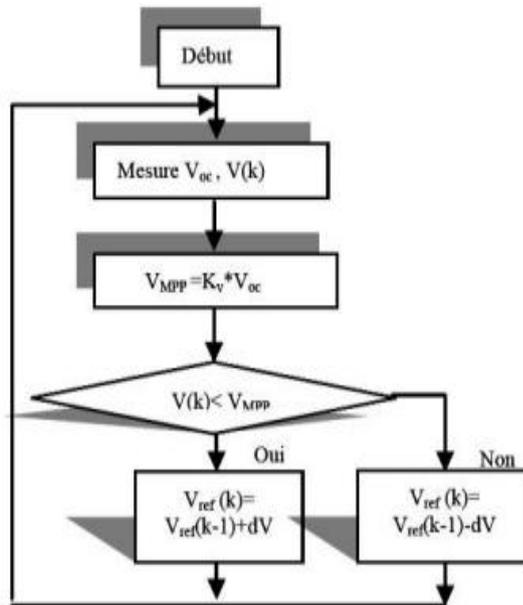
### **1.7.4. Les différents algorithmes MPPT**

#### **1.7.4.1.La méthode de la tension de circuit ouvert du générateur (VOC)**

Cet algorithme repose sur une relation linéaire entre la tension en circuit ouvert et la tension optimale, exprimée par l'équation suivante :

$$V_{mp} = K \times V_{oc} \quad (1.14)$$

où **k** est un coefficient de tension dépendant des caractéristiques de la cellule photovoltaïque (PV), dont la valeur se situe généralement entre 0,73 et 0,8.



**Figure 1.28.** Organigramme de l'algorithme Voc

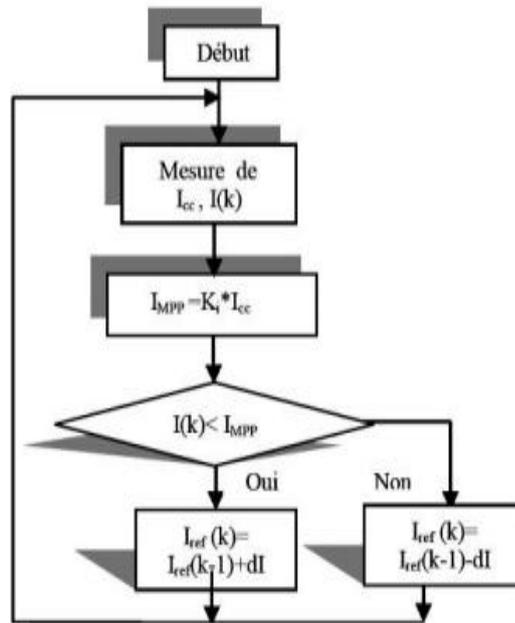
Afin de déterminer la tension optimale, il est nécessaire de mesurer la tension à circuit ouvert (Voc). Ainsi, le point de fonctionnement du panneau est maintenu proche du point de puissance maximale en ajustant la tension du panneau à la valeur optimale obtenue. Ce procédé repose sur une action cyclique sur le rapport cyclique, permettant d'atteindre progressivement la tension optimale.[20]

#### 1.7.4.2. La méthode de court-circuit (Icc)

Cette méthode s'appuie sur la relation linéaire entre le courant de court-circuit (Icc) et le courant optimal (Imp), exprimée par l'équation :

$$I_{mp} = K \times I_{cc} \quad (1.15)$$

où k représente un coefficient dépendant des caractéristiques de la cellule photovoltaïque, dont la valeur typique se situe entre 0,85 et 0,92.



**Figure 1.29.** Organigramme de l'algorithme Icc.

En effet, pour atteindre le point de fonctionnement optimal, il faut ajuster le courant du panneau afin qu'il corresponde au courant optimal. Pour cela, on modifie le rapport cyclique progressivement jusqu'à ce que le panneau fonctionne dans des conditions idéales.[20]

### 1.7.4.3. La méthode Conductance Incrémentale (INC)

L'algorithme utilise la conductance ( $G = I/V$ ) et sa variation ( $dG$ ) pour déterminer le point de puissance maximale (PMP). Si  $dG$  est supérieur à  $-G$ , le rapport cyclique est réduit ; dans le cas contraire, il est augmenté. Cette opération est répétée jusqu'à l'obtention du PMP.

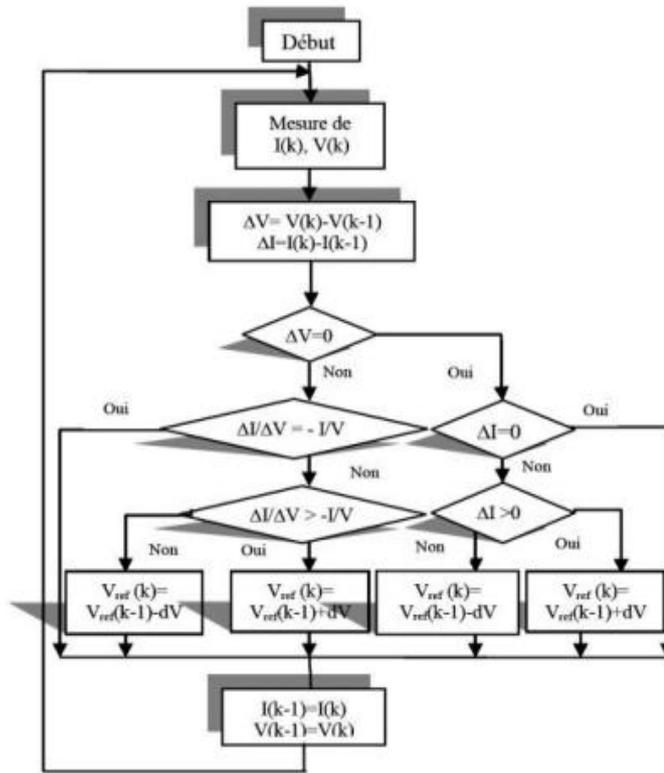


Figure 1.30. Organigramme de l'algorithme 'INC'

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

**Principe de l'algorithme :** Cet algorithme repose sur la perturbation de la tension du panneau photovoltaïque (PV) en ajustant le rapport cyclique . À chaque itération, la puissance générée par le panneau à l'instant (k) est mesurée et comparée à celle de l'instant précédent (k-1).

**Si la puissance augmente,** cela indique que le système converge vers le point de puissance maximale (MPP), et la variation du rapport cyclique est maintenue dans le même sens.

**Si la puissance diminue,** cela signifie que le système s'éloigne du MPP, et la variation du rapport cyclique doit alors être inversée.

Cette méthode permet d'atteindre et de maintenir le MPP de manière dynamique.[20]

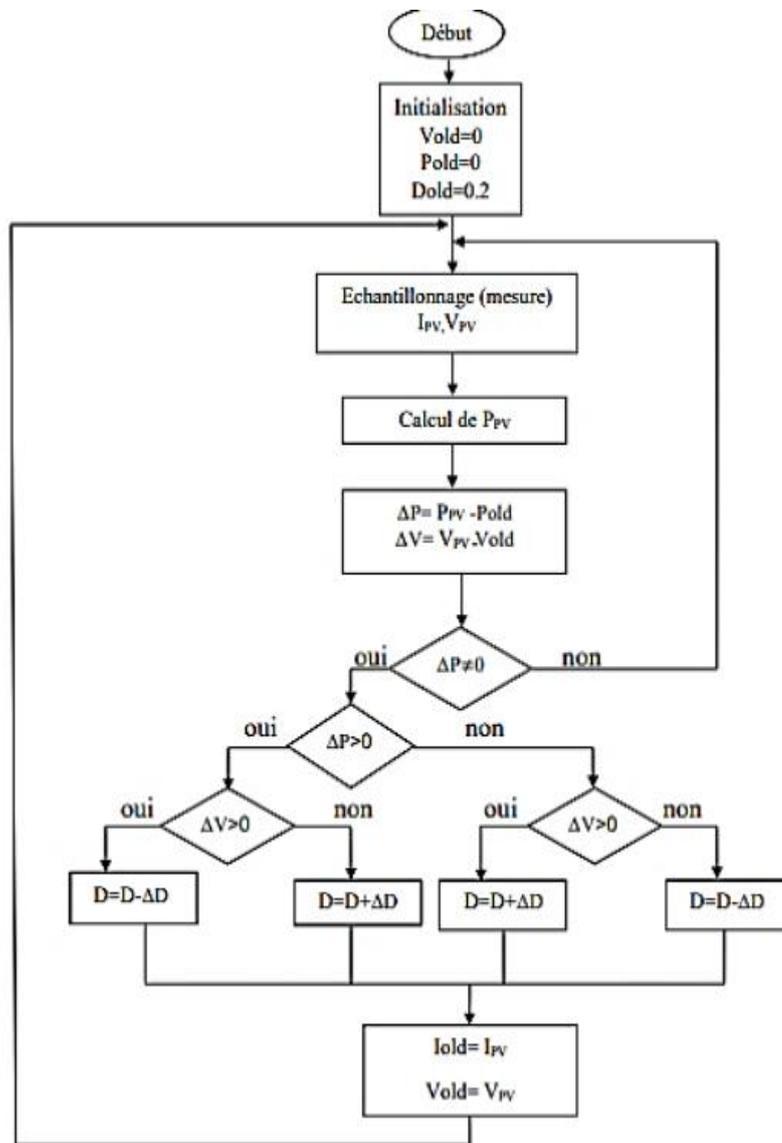


Figure 1.31. organigramme de la méthode P&O.

## 1.8.CONCLUSION

Ce premier chapitre a posé les bases de la compréhension du fonctionnement d'un système photovoltaïque, en abordant les mécanismes physiques de l'effet photovoltaïque, les technologies des cellules solaires et leur modélisation électrique. Il a également contextualisé le rôle du générateur photovoltaïque et de son association sous forme de modules pour obtenir une tension et une puissance adaptées aux applications pratiques. L'analyse des convertisseurs DC-DC, c'est-à-dire les convertisseurs Buck, Boost et Buck - Boost, a permis d'aborder leur rôle essentiel dans l'adaptation énergétique d'un système photovoltaïque. Enfin, l'aperçu des techniques MPPT, c'est-à-dire la technique P & O, a abordé la nécessité de tirer le maximum de puissance des panneaux en fonction des conditions environnementales. Ces éléments constituent une première base théorique pour l'approche d'optimisation des performances photovoltaïques qui sera développée dans les chapitres suivants.

**Chapitre 02**  
**SYNTHSE ET SIMULATION**  
**D'UNE COMMANDE MPPT**

### 2.1. Introduction

Dans la poursuite d'une exploitation optimale des systèmes photovoltaïques (PV), le suivi du point de puissance maximale (MPPT) constitue une technologie essentielle pour maximiser le rendement énergétique face aux variations climatiques. Parmi les diverses méthodes disponibles, la commande Perturb and Observe (P&O) se démarque par sa simplicité et son efficacité pratique. Toutefois, sa sensibilité inhérente aux bruits de mesure et aux oscillations autour du point de puissance maximale (MPP) révèle la nécessité de stratégies d'amélioration, notamment par l'intégration de techniques de filtrage numérique. Ce chapitre a donc pour objectif central d'explorer la synthèse et la simulation d'une commande MPPT améliorée. Il se concentrera spécifiquement sur l'implémentation d'une commande P&O de base sous MATLAB/Simulink, puis sur l'intégration d'un filtre numérique de type FIR (à Réponse Impulsionnelle Finie) afin d'en optimiser la stabilité et la précision. Notre démarche consistera d'abord en une modélisation fondamentale de la commande P&O standard. Ensuite, nous synthétiserons un filtre FIR adapté et étudierons son intégration à l'algorithme P&O pour atténuer efficacement le bruit. Enfin, une validation expérimentale rigoureuse sera menée par simulation du système PV amélioré ; nous analyserons comparativement les performances obtenues avec différents ordres de filtre FIR (32, 64 et 128), cherchant à établir le meilleur compromis entre rapidité de convergence et réduction des perturbations. En s'appuyant sur les fondements théoriques posés au chapitre précédent, ce volet appliqué ouvre la voie à l'optimisation des commandes MPPT par traitement numérique du signal, préparant le terrain pour des études comparatives ultérieures.

### 2.2. schema synoptique

Un schéma synoptique d'un système photovoltaïque (PV) avec commande MPPT illustre l'architecture essentielle pour optimiser la production d'énergie solaire. Les panneaux PV convertissent la lumière en courant continu (DC), dont la tension et le courant varient avec l'ensoleillement et la température. Un contrôleur MPPT (Maximum Power Point Tracking) mesure en temps réel ces paramètres, calcule la puissance générée, et ajuste dynamiquement le duty cycle d'un convertisseur DC-DC (via un signal PWM) pour maintenir le système au point de puissance maximale (MPP).

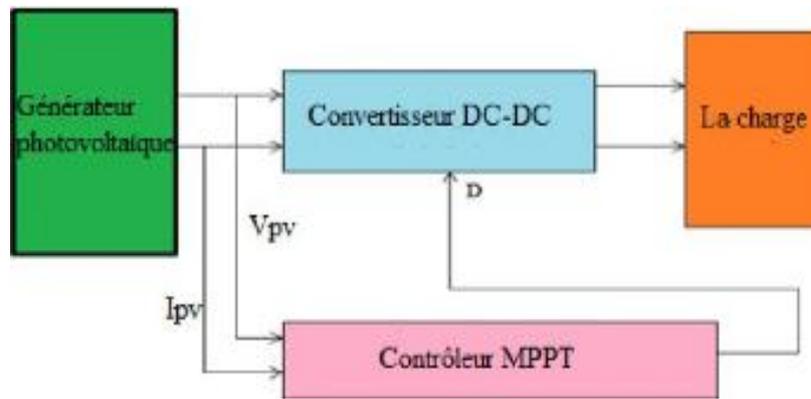


Figure 2.1. synoptique d'un PV avec commande MPPT

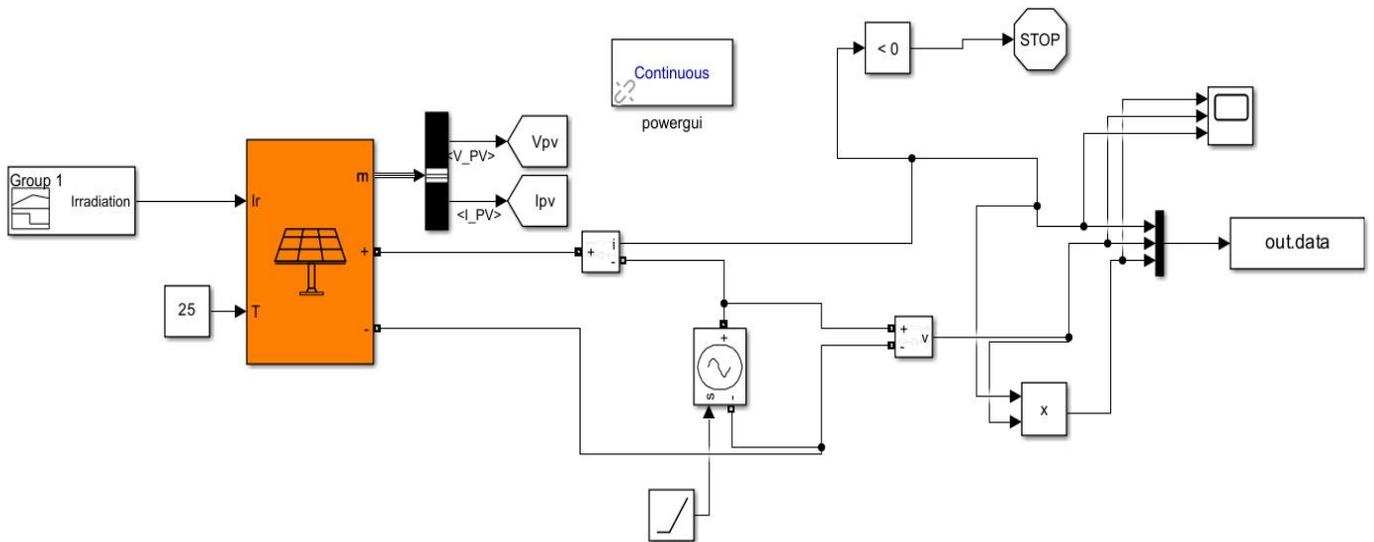
## 2.3. IMPLEMENTATION D'UNE COMMANDE MPPT P&O DE BASE SUR MATLAB

### SIMULINK

Le système photovoltaïque (PV) étudié se compose d'un panneau solaire convertissant l'énergie lumineuse en électricité, associé à un convertisseur DC-DC de type élévateur (boost) et piloté par un algorithme MPPT (Maximum Power Point Tracking). Une charge résistive permet d'évacuer le surplus d'énergie en cas de faible consommation. Les simulations réalisées sous MATLAB/Simulink démontrent que la stratégie MPPT par Perturbation et Observation (P&O) parvient à suivre avec efficacité le point de puissance maximale (MPP), même sous des conditions variables d'irradiance et de température, tout en garantissant une bonne stabilité du système.

#### 2.3.1. Le panneau photovoltaïque

Le modèle **Sun Power SRP-315EWH-T-D** dans Simulink/MATLAB représente un panneau photovoltaïque haute performance conçu pour simuler le comportement réel d'un module solaire de 315 W. Ce modèle est basé sur des caractéristiques électriques précises fournies par le fabricant, telles que la tension en circuit ouvert, le courant de court-circuit, le point de puissance maximale (MPP), et les coefficients de température. Il permet d'analyser la production d'énergie en fonction de l'ensoleillement, de la température ambiante et des conditions de charge, ce qui le rend idéal pour des études de performance, d'optimisation de systèmes PV, ou d'intégration réseau dans un environnement de simulation réaliste.



**Figure 2.2.** Modèle panneau photovoltaïque sur Simulink.

**Tableau 2.1.** Caractéristiques électriques du module PV.

<b>Module</b>	<b>SRP-315WHT-D</b>
Nombre de cellule par module	96
Courant optimale ( $I_{mp}$ )	5.76A
Tension optimale ( $V_{mp}$ )	54.7 V
Puissance maximale ( $P_{max}$ )	315.072 W
Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ )	6.14 A
Tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ )	64.6 V
Coefficient de température de $I_{cc}$	0.061743 %/deg.C

Coefficient de température de Voc	-0.2727 %/deg.C
-----------------------------------	-----------------

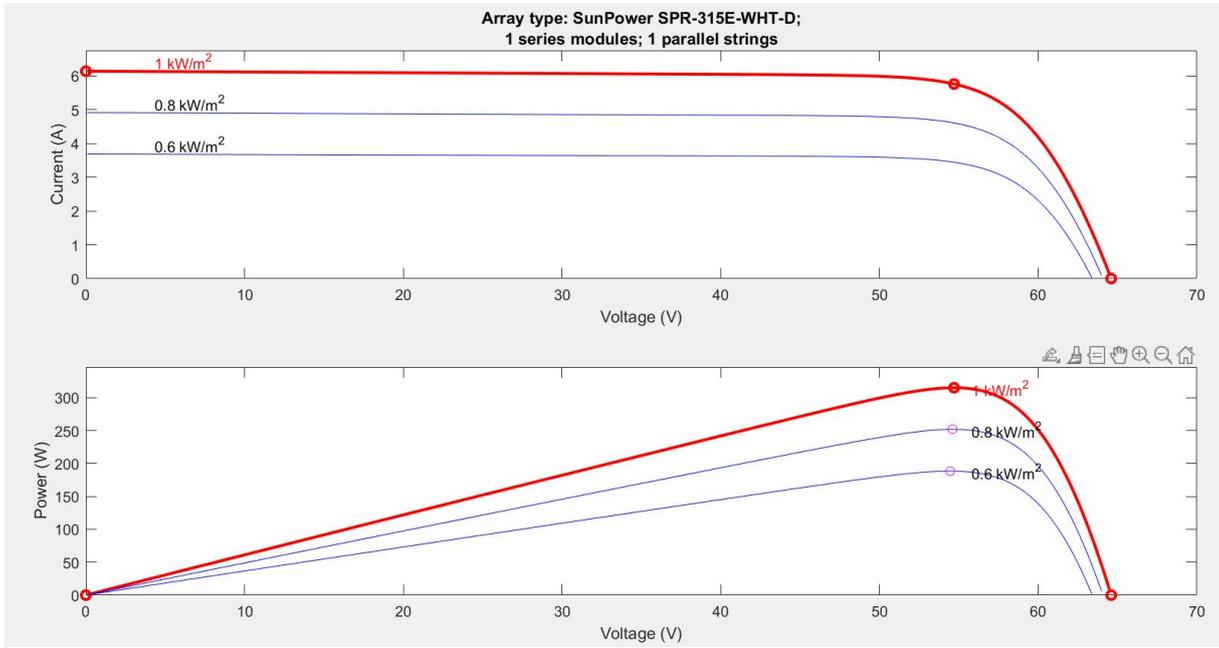


Figure 2.3. Caractéristiques I-V et P-V du module PV utilisé.

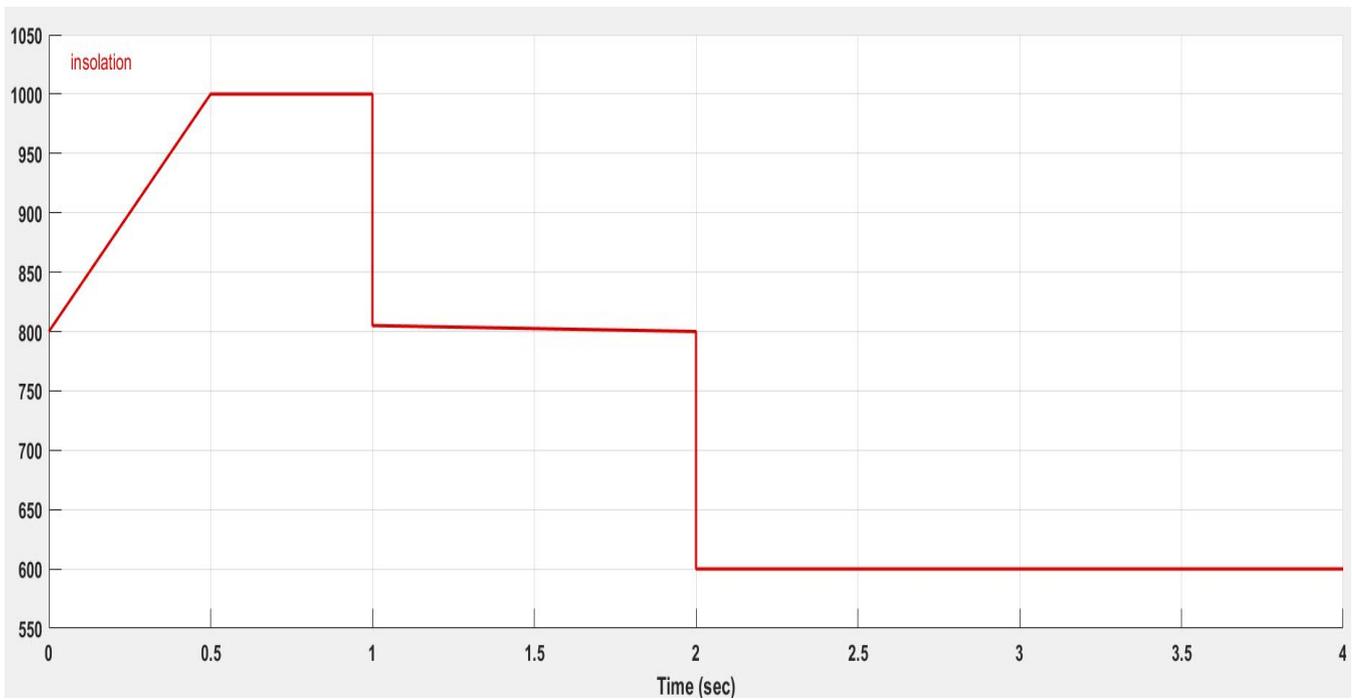


Figure 2.4. courbe de l'insolation

### 2.3.2. Le convertisseur élévateur (boost)

Le convertisseur DC/DC permet de transférer efficacement l'énergie produite par le panneau solaire vers la charge, tout en assurant une transmission à puissance maximale. Cet ajustement s'effectue par modulation de la largeur d'impulsion (PWM), à l'aide d'un dispositif de commutation tel qu'un MOSFET ou un IGBT. L'optimisation de la puissance est assurée grâce à un algorithme MPPT, qui adapte dynamiquement le rapport cyclique du convertisseur. Le schéma du système a été conçu sous Matlab/Simulink, et les valeurs des composants électroniques utilisés (diode, IGBT, condensateur, charge) sont présentées dans le tableau ci-dessous.

composants	C_in	L	C_out	R_ch
Valeur	100e-6 (F)	5e-3 (H)	6e-4 (F)	20 (ohm)

Tableau 2.2. Les valeurs des composants du convertisseur boost.

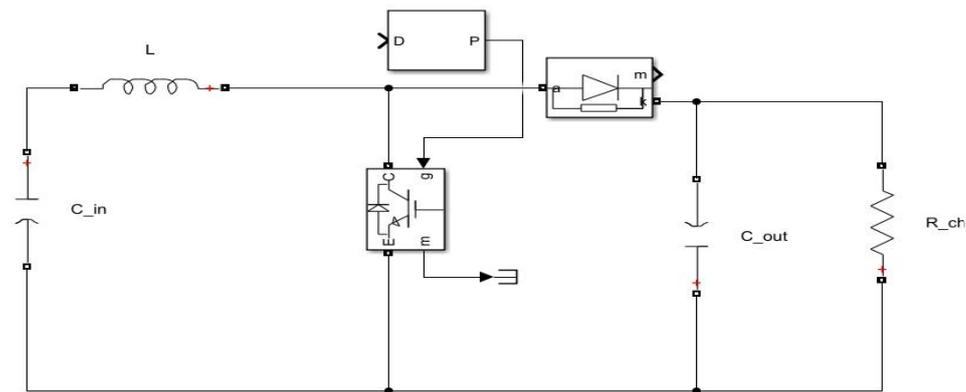


Figure 2.5. Modèle boost sur Simulink.

### 2.3.3. Contrôleur PWM

Nous avons utilisé un régulateur de charge PWM configuré comme suit :

Paramètre	Valeur
Switching frequency (Hz)	50000
Sample time	5e-6

Tableau 2.3. les paramètres utiliser dans le régulateur de charge PWM.

### 2.3.4. Le schéma de la commande P&O sur Matlab Simulink

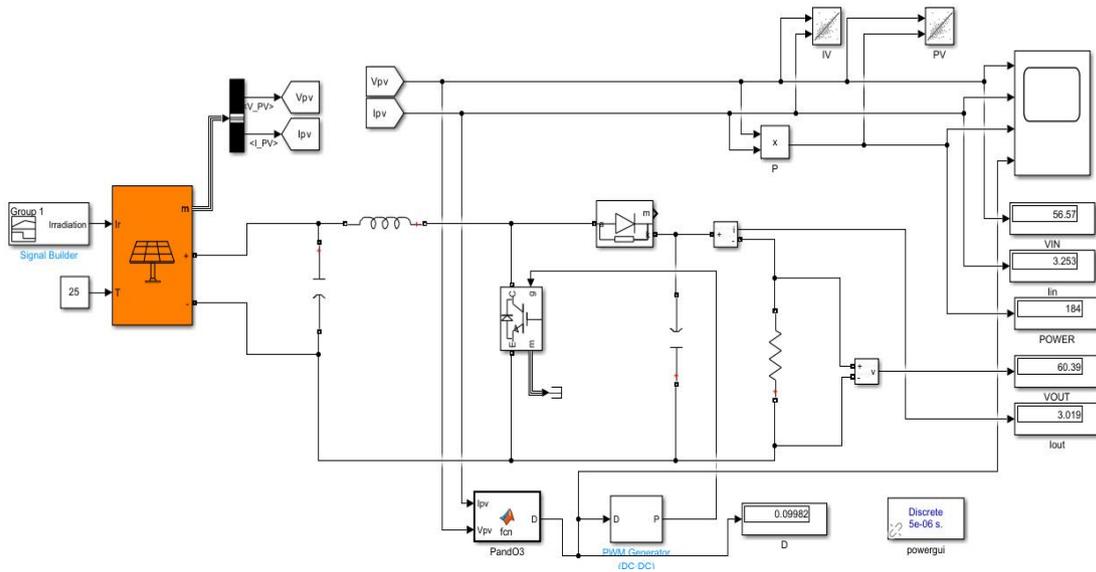


Figure 2.6. schéma de la commande P&O sur Matlab Simulink.

### 2.3.5. Résultat et interprétation

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

#### ❖ La tension ( $V_{pv}$ ) :

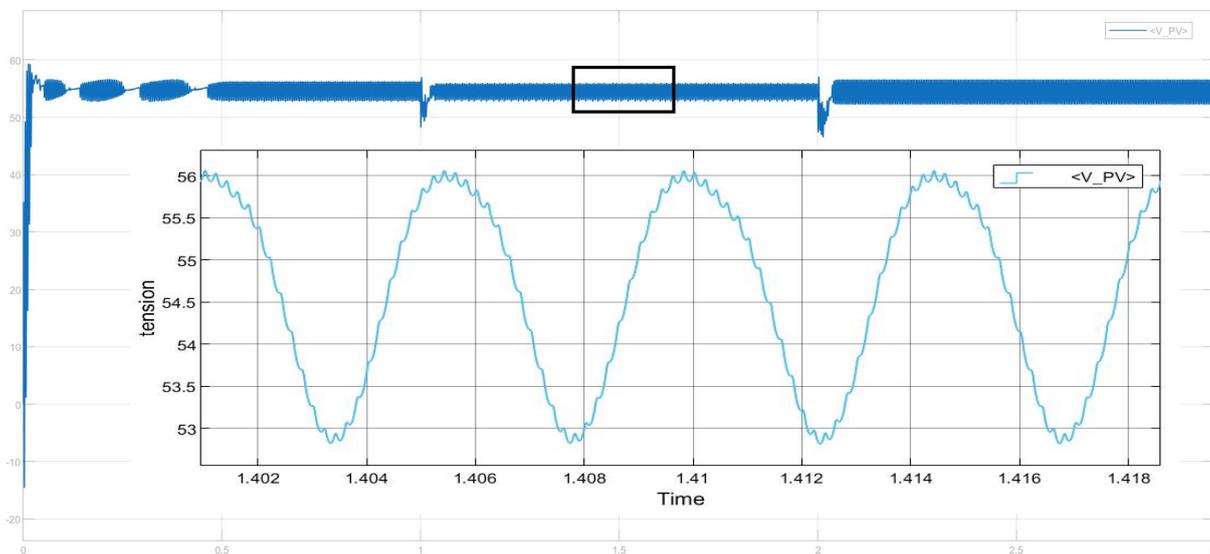
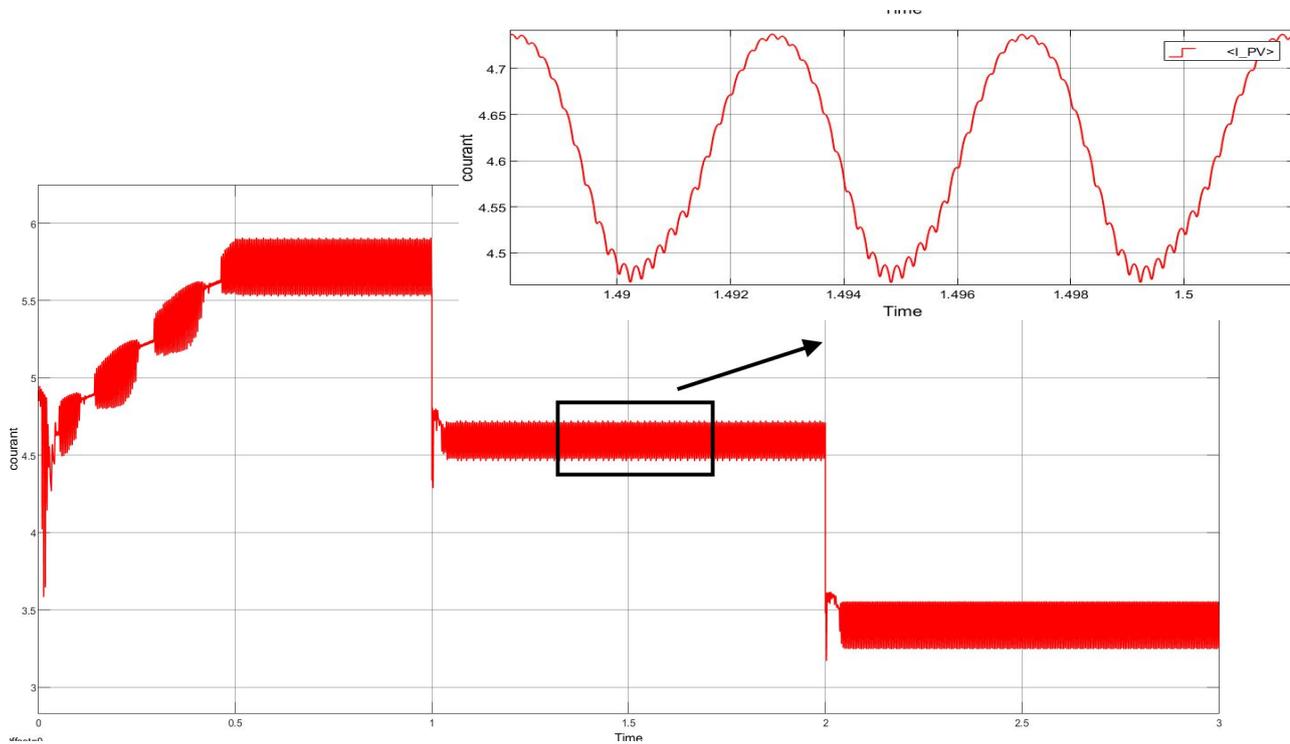


Figure 2.7. La variation de la tension  $V_{pv}$  (V) en fonction du temps (s)

**Observations :** On observe la tension d'un panneau  $V_{pv}$  elle ne change pas malgré le changement de l'éclairage ,mais on vois des petites variation de tension .

**Analyse** :La tension reste presque constante, se maintenant proche de la valeur optimale permettant d'atteindre une puissance maximale, même si l'éclairement varie. Cette condition est importante pour assurer la performance du système.

❖ **Le Courant ( $I_{pv}$ ) :**



**Figure 2.8.** La variation du courant  $I_{pv}$  (A) en fonction du temps (s).

**Observation** : on observe que le tracé montre que le courant délivré par le panneau photovoltaïque varie selon les conditions de test, avec un comportement en marches et des oscillations légères superposées, illustrant le fonctionnement typique d'un système MPPT.

**Analyse** :La courbe présente une caractéristique typique du fonctionnement d'un panneau solaire suivant les variations d'ensoleillement. Les variations détectées présentent un risque d'instabilité qui pourrait être améliorée par un raffinement de la gestion de charge ou un meilleur suivi solaire.

❖ **La puissance ( $P_{pv}$ )**

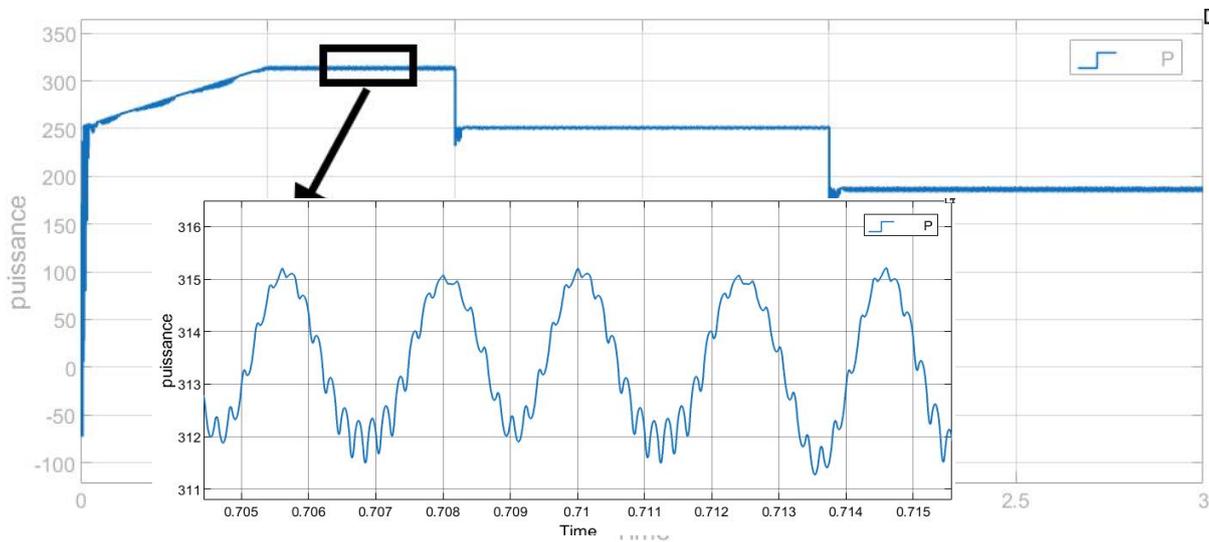


Figure 2.9. La variation de la puissance Ppv (W) en fonction du temps (s).

**Observation :** La production d'énergie par le panneau photovoltaïque est en accord avec les évolutions de la lumière avec retard, du fait de l'inertie du système. Lorsque l'intensité lumineuse croît, la puissance puisée croît relativement vite pour s'établir à un nouveau maximum ; tandis qu'à l'inverse, lorsque la lumière décroît, la puissance décroît pour s'adapter au nouvel état, en s'élevant légèrement.

**Analyse :** La réponse du système face aux variations de lumière montre que l'algorithme MPPT P&O est bien adapté à l'optimisation de la puissance du panneau photovoltaïque. Le léger retard temporel du réglage est typique des systèmes régulés, notamment en raison des temps de réponse des composants électroniques et de la dynamique du système dans son ensemble.

❖ **Le rapport cyclique (D)**

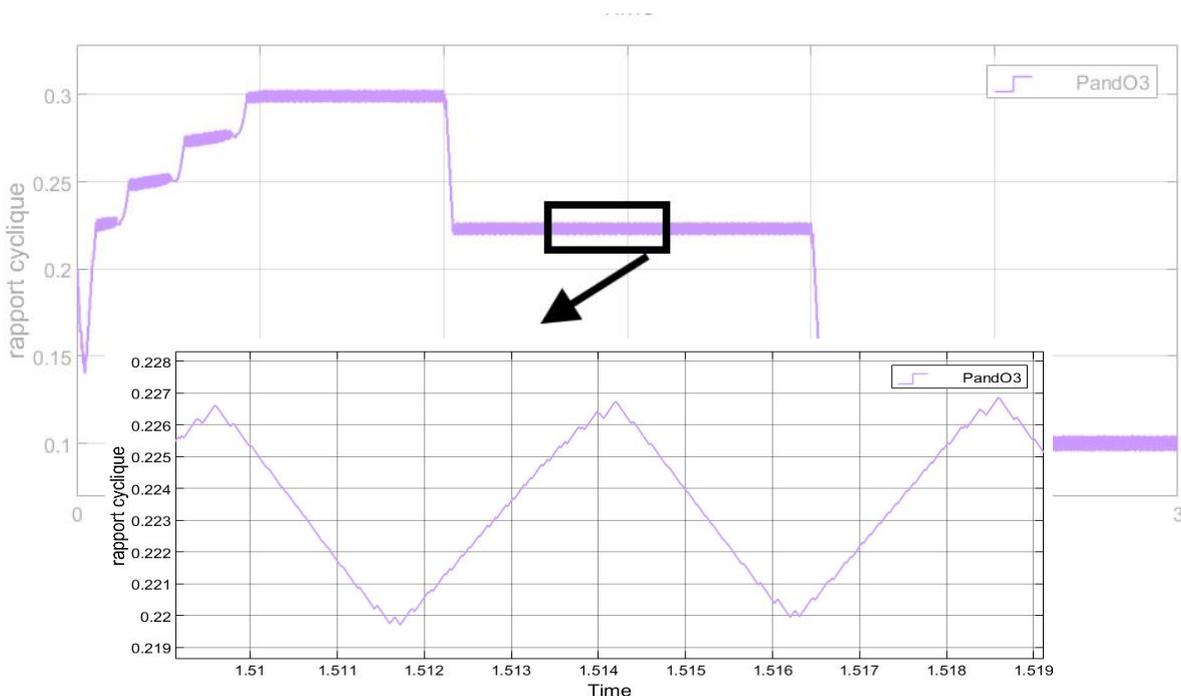


Figure 2.10. La variation du rapport cyclique en fonction du temps (s).

**Observation :** Le rapport cyclique se régule constamment afin de garantir le fonctionnement au point de puissance maximale (MPP) en dépit des fluctuations d'ensoleillement.

**Analyse :** Un rapport cyclique ajusté de manière constante rend le monitoring en temps réel du point de puissance maximale (MPP) du panneau solaire possible au sein du système. Les variations observées autour de ce point sont propres à la méthode P&O, méthode qui cherche à mesurer l'évolution de la puissance grâce à une perturbation intentionnelle, quelles que soient les petites fluctuations (mais de façon régulière) qui sont nécessaires au bon fonctionnement de l'algorithme pour lui permettre de s'adapter à des variations d'ensoleillement et maintenir son rendement maximal.

## 2.4.SYNTHESE D'UN FITRE FIR

Les filtres numériques à réponse impulsionnelle finie (RIF) sont des systèmes linéaires discrets invariants dans le temps, définis par une équation selon laquelle un échantillon de sortie, représentant le signal filtré, est obtenu par une sommation pondérée d'un ensemble fini d'échantillons d'entrée. Les coefficients de cette sommation constituent la réponse impulsionnelle du filtre, et seul un nombre fini d'entre eux prend des valeurs non nulles.

Ces filtres sont de type « à mémoire finie », c'est-à-dire que leur sortie ne dépend que d'une quantité limitée d'informations passées en entrée. Ils sont aussi qualifiés de filtres non récursifs, car leur structure ne nécessite pas de boucle de rétroaction (contrairement aux filtres à réponse impulsionnelle infinie, RII).[21]

Les équations ci-après illustrent la fonction de transfert en domaine z ainsi que l'équation aux différences associée, correspondant à la forme générale d'un filtre RIF :

$$H(Z) = \sum_{i=0}^{N-1} b_i Z^{-i} \quad (2.1)$$

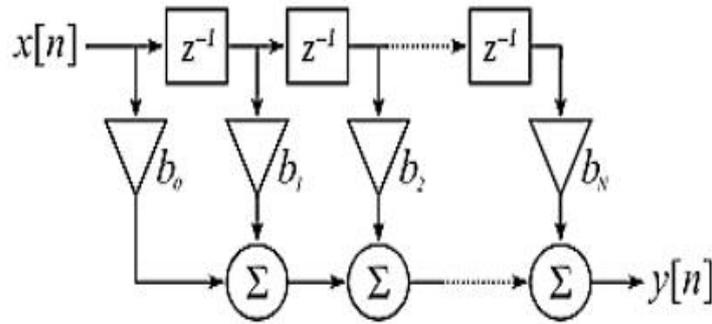
$$y(n) = \sum_{i=0}^{N-1} b_i x(n - i) = \sum_{i=0}^{N-1} h(i) x(n - i) \quad (2.2)$$

Ou

N : Nombre de coefficients (ordre du filtre)

$b_i$  : Coefficients de la fonction de transfert du filtre.

La conception de filtres numériques utilise ce qu'il est convenu d'appeler comme étant les trois éléments ou opérations fondamentales pour la réalisation des filtres, à savoir le gain, l'élément de sommation et le retard unitaire qui permettent la mise en œuvre de tous les filtres numériques linéaires possibles.[22].



**Figure 2.11.** Réalisation directe de type 1 d'un filtre FIR.

Seuls les filtres RIF peuvent être définis dans le domaine discret. À ce titre, leurs méthodes de synthèse ne relèvent pas du filtrage analogique. On distingue alors trois méthodes principales[23], dont deux seront développées dans les sections suivantes:

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

#### 2.4.1. Propriétés et Caractéristiques des filtres RIF

##### ❖ Symétrie et Déphasage Contrôlés

Les filtres RIF peuvent être conçus avec une réponse impulsionnelle qui est soit symétrique, soit antisymétrique, ce qui permet d'obtenir un déphasage linéaire (ou presque linéaire dans certains cas).

Un déphasage linéaire signifie que le retard de groupe reste constant pour toutes les fréquences, ce qui aide à éviter la distorsion de phase.

C'est particulièrement important dans des domaines où il est essentiel de préserver la forme d'onde, comme le traitement audio ou les communications.

##### ❖ Moins Sensibles aux Erreurs de Quantification

À la différence des filtres RII (Filtres à Réponse Impulsionnelle Infinie), les filtres RIF sont moins vulnérables aux erreurs de quantification des coefficients lors de leur mise en œuvre numérique.

Cela s'explique par l'absence de rétroaction (pas de boucle de récursion), ce qui empêche l'accumulation d'erreurs numériques.

Cette caractéristique les rend plus robustes dans des applications à précision finie, comme dans les DSP ou les FPGA.

##### ❖ Stabilité Garantie

Étant donné qu'un filtre RIF n'a pas de pôles en dehors de l'origine (pas de rétroaction), il est toujours stable, peu importe la réponse impulsionnelle.

Cette stabilité naturelle est un atout majeur par rapport aux filtres RII, qui peuvent devenir instables si leurs pôles sortent du cercle unité.

### ❖ Complexité Réduite

Bien que les filtres RIF nécessitent généralement un plus grand nombre de coefficients que les filtres RII pour obtenir des performances similaires, leur structure non récursive facilite leur mise en œuvre.

Des algorithmes comme la transformée de Fourier rapide (FFT) peuvent être utilisés pour une convolution efficace.

### ❖ Sélectivité Réduite :

Contrairement aux filtres RII, les filtres RIF présentent une sélectivité, disons, atténuée comme le montrent les courbes plus progressives de la transition entre bande passante et bande d'atténuation, ou tout au moins une réduction progressive des fréquences.

### ❖ Symétrie et déphasage Vérifiés :

Les filtres RIF sont en effet capables de fournir une réponse impulsionnelle symétrique, ce qui introduit dans le signal un retard temporel sans déphasage, permettant une restitution maximisée de la phase du signal à la 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

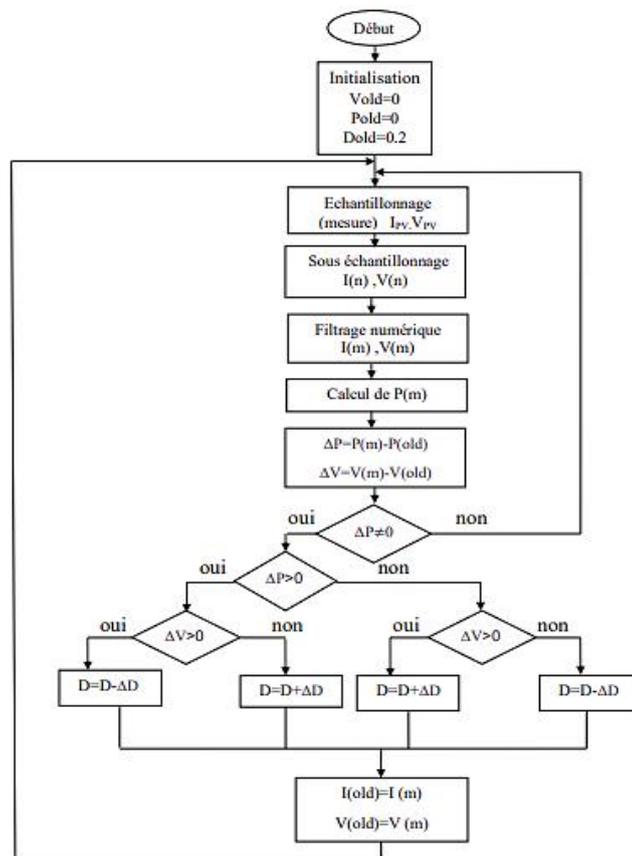


Figure 2.12. Organigramme de l'algorithme P&O avec un filtre.

### 2.5.2. Conception et calcul des coefficients et le filtre FIR

Dans cette section, nous avons conçu un filtre FIR. Pour cela, nous avons d'abord généré les coefficients  $h$  en utilisant Matlab. Nous allons étudier 3 types de filtres, bien que le filtre présenté dans le programme ci-dessous soit d'ordre 32.

```
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 = 31; % 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 = 12; % Fixation de n à 12 bits
m = n + 1;
mn = n * 2 + 1; % Les signaux Mi
```

% Quantification des coefficients

$H = H_b * (2^{(n+1)})$ ; % n bits + 1 bit pour les multiplications avec signe

$H_{bin} = \text{dec2bin}(H, m)$ ; % Conversion en binaire

$H_{b2d} = \text{bin2dec}(H_{bin})$ ; % Conversion en décimal

$H_d = H_{b2d} / (2^n)$ ; % Normalisation des coefficients

% Affichage des coefficients quantifiés

`disp('Coefficients quantifies:');`

`disp(Hd);`

### 2.5.3. Le schéma du système PV avec la commande P&O avec filtrage FIR sur Simulink

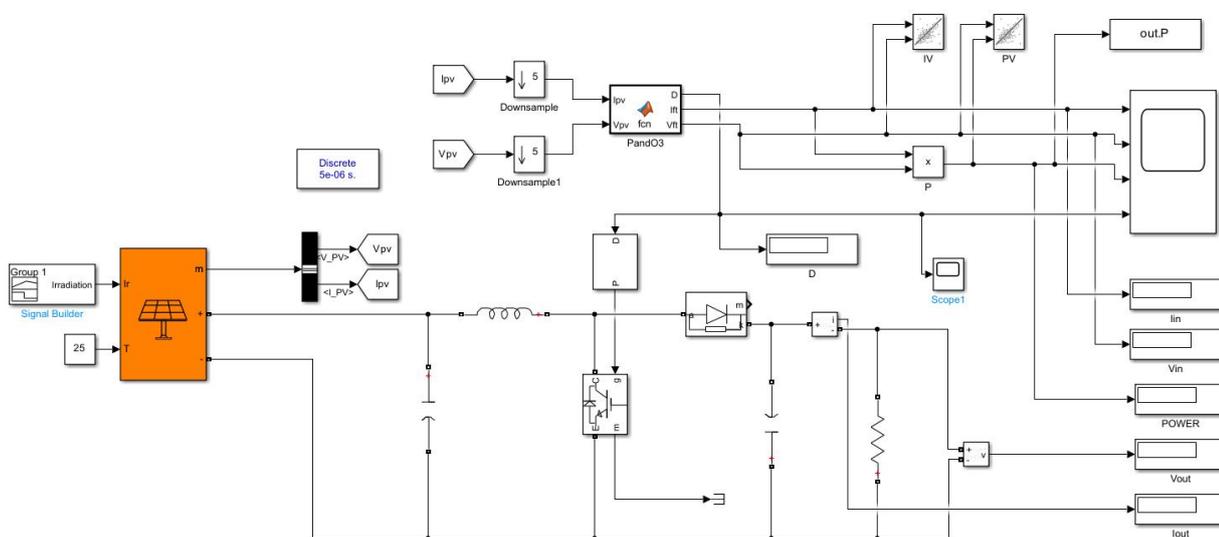


Figure 2.13. Le schéma Simulink du système PV avec la commande P&O avec filtrage FIR.

### 2.5.4. Résultat de filtre d'ordre 32

❖ Le courant Filtrée d'ordre (Ifpv) :

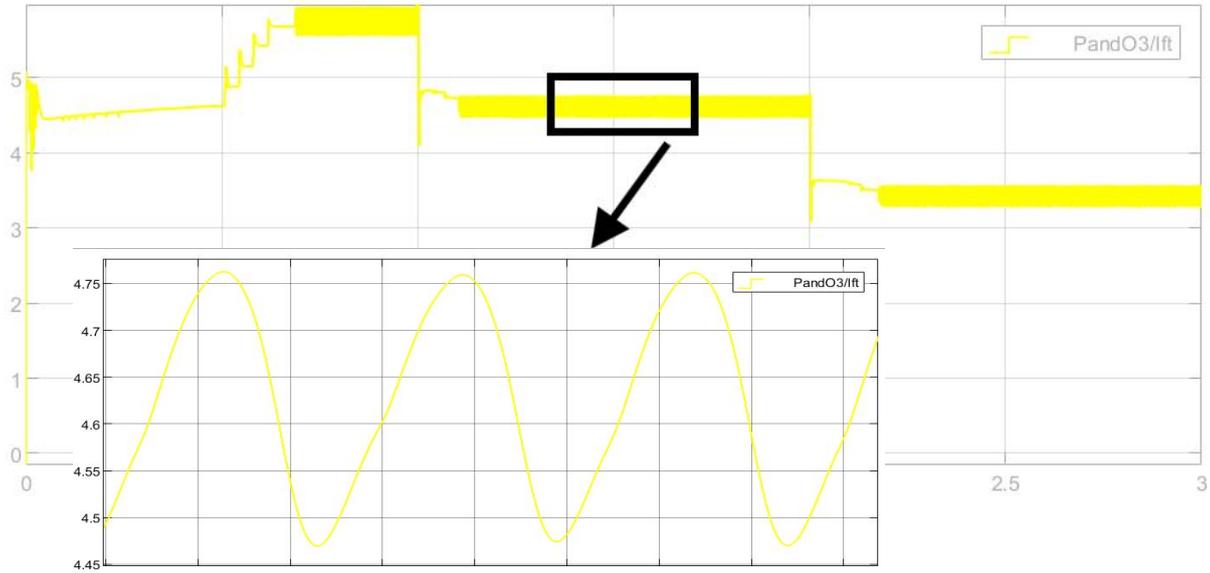


figure 2.14. La variation de courant filtrée  $I_{fpv}$  d'ordre 32 (A) en fonction du temps (s)

❖ **La Tension Filtrée ( $V_{fpv}$ )**

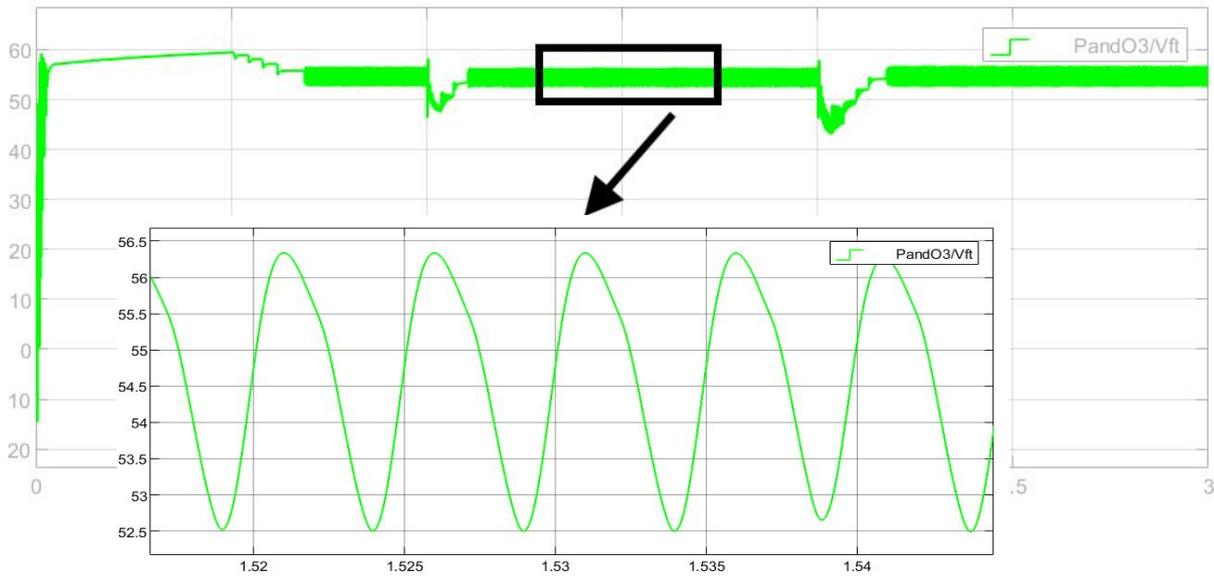
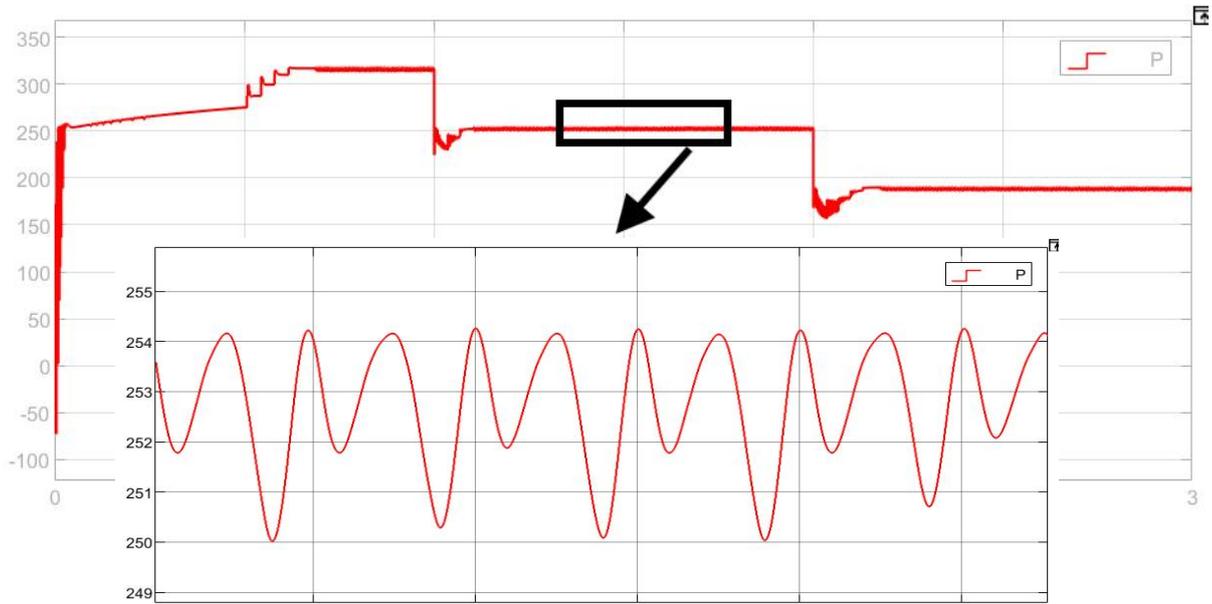


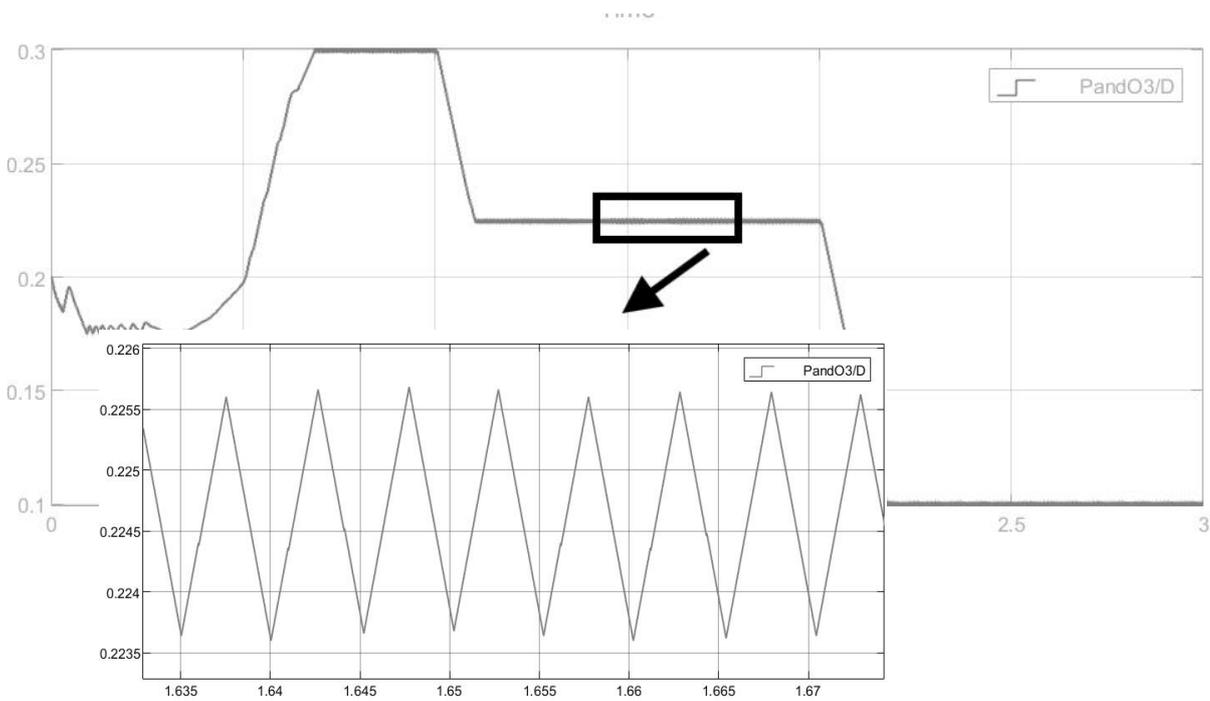
Figure2.15. La variation de tension filtrée  $V_{fpv}$  d'ordre 32 en fonction du temps (s)

❖ **Puissance filtré ( $P_{fpv}$ )**



**Figure 2.16.** La variation de puissance filtrée  $P_{fpv}$  d'ordre 32 en fonction du temps (s)

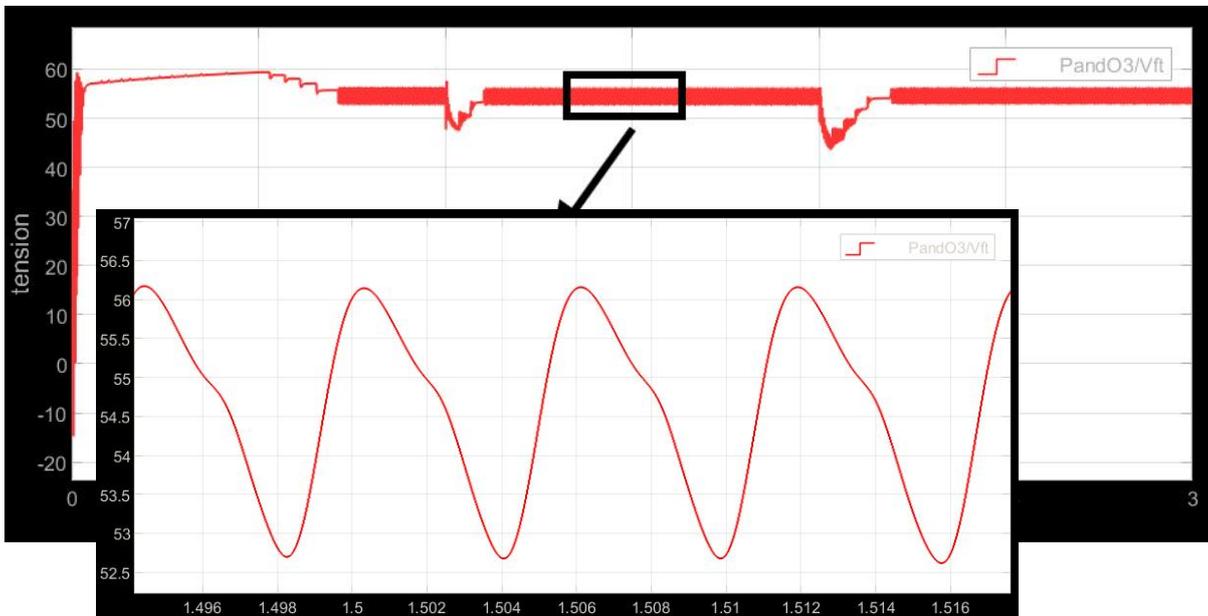
❖ **Rapport cyclique (D)**



**Figure 2.17.** La variation de rapport cyclique en fonction du temps (s) dans le cas de filtre d'ordre 32.

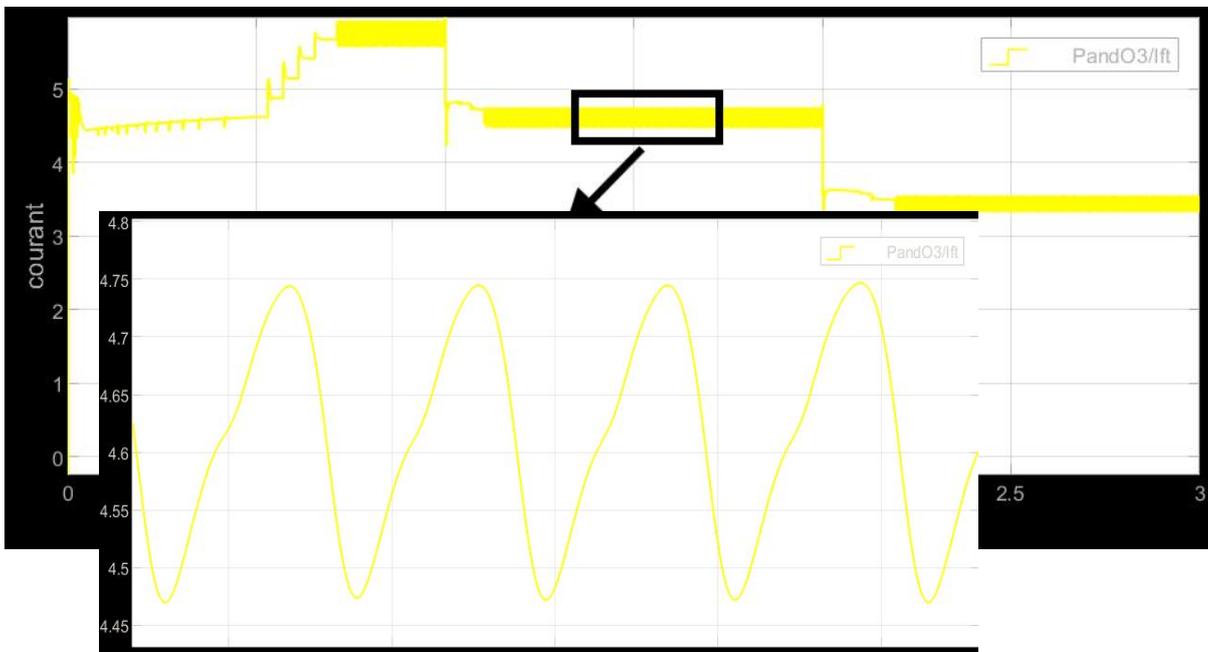
**2.5.5. Résultat de filtre d'ordre 64**

❖ **La Tension Filtrée ( $V_{fpv}$ ) :**



**Figure 2.18.** La variation de la tension filtrée  $V_{fpv}$  (V) en fonction du temps (s) de filtre d'ordre 64

❖ **Le Courant Filtrée ( $I_{fpv}$ ) :**



**Figure 2.19.** La variation du courant filtrée  $I_{fpv}$  (A) en fonction du temps (s) de filtre d'ordre 64

❖ **Puissance filtré ( $P_{fpv}$ ) :**

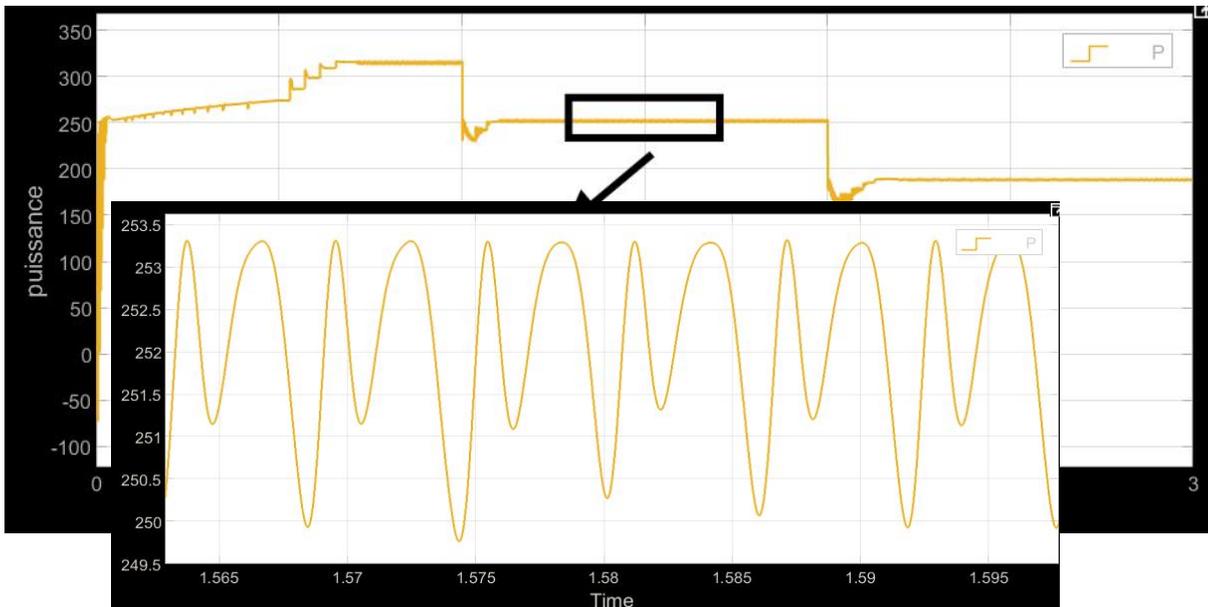


Figure 2.20. La variation de la puissance filtrée  $P_{fpv}$  (W) en fonction du temps (s) de filtre d'ordre 64

### ❖ Rapport cyclique (D)

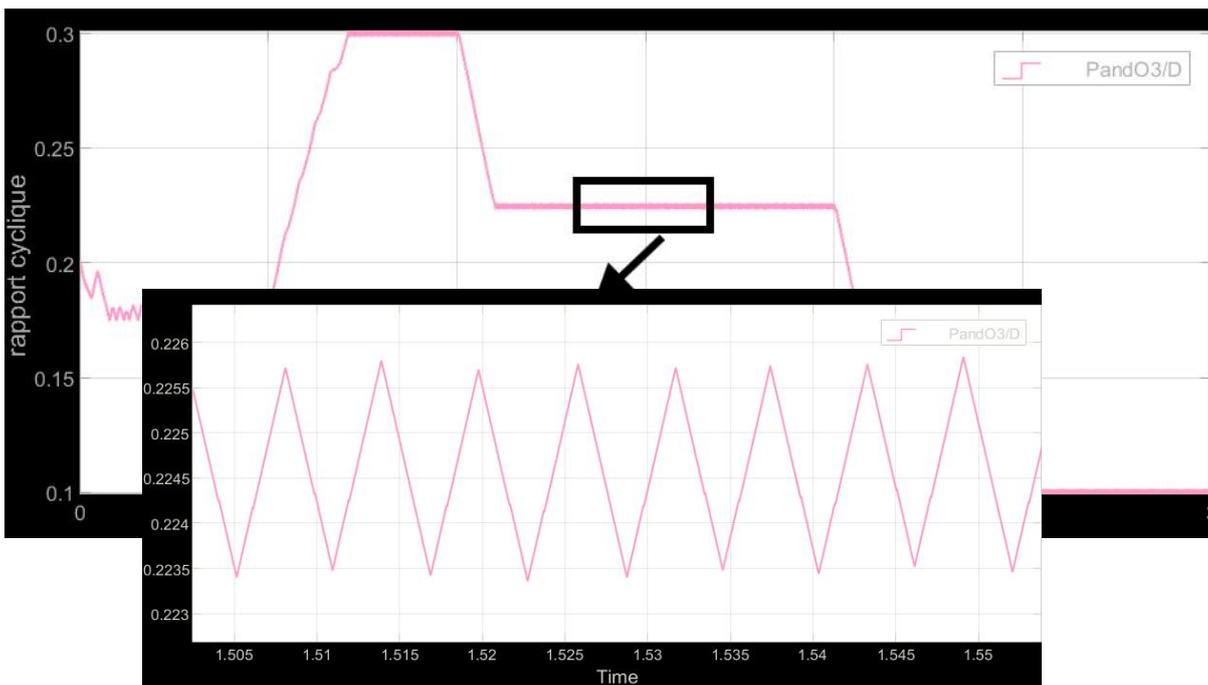


Figure 2.21. La variation de rapport cyclique en fonction du temps (s) dans le cas de filtre d'ordre 64.

## 2.5.6. Résultat de filtre d'ordre 128

### ❖ Le courant filtre ( $I_{fpv}$ )

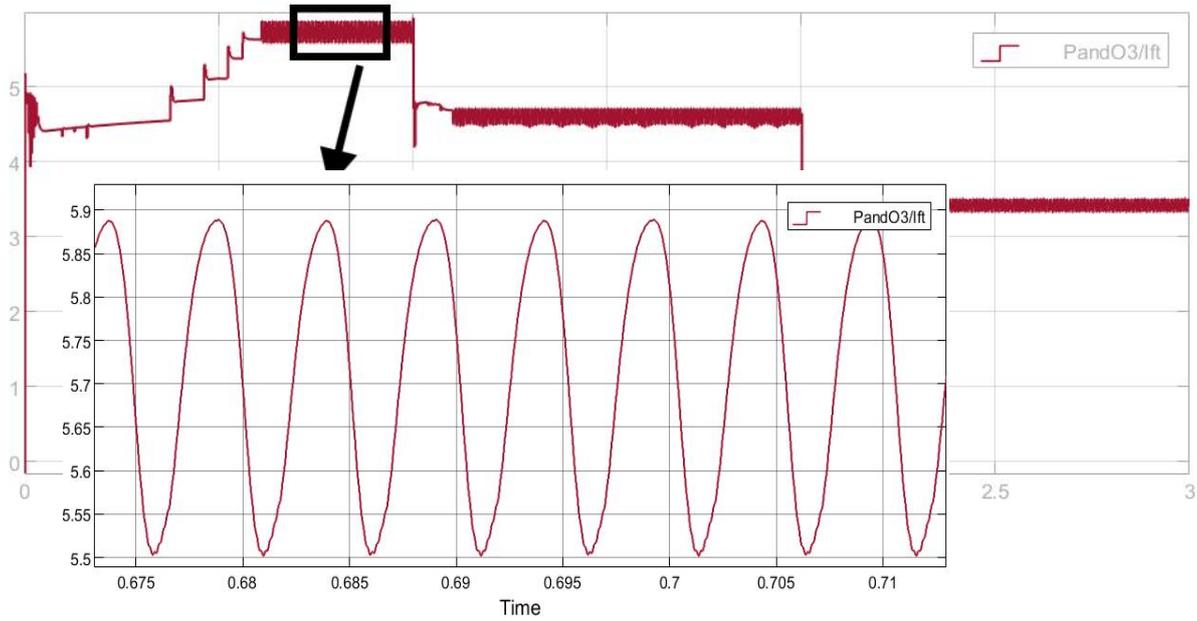


Figure 2.22. La variation de courant filtrée  $I_{fpv}$  d'ordre 128 en fonction du temps (s)

❖ **La Tension Filtrée ( $V_{fpv}$ ) :**

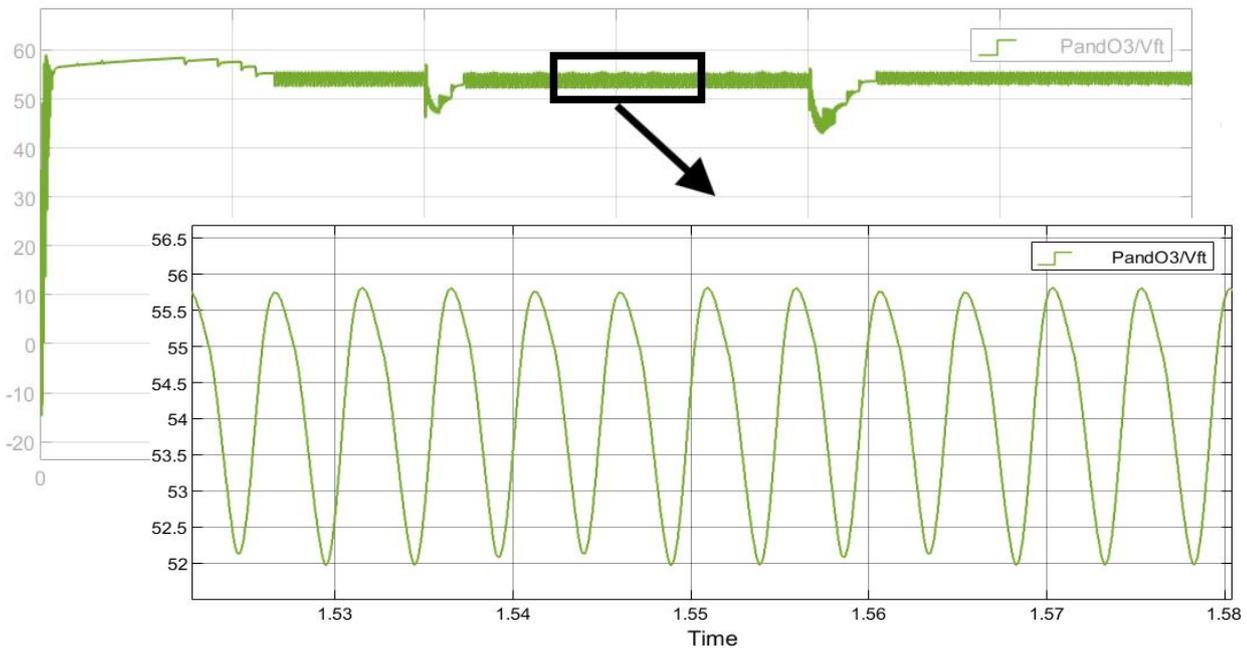
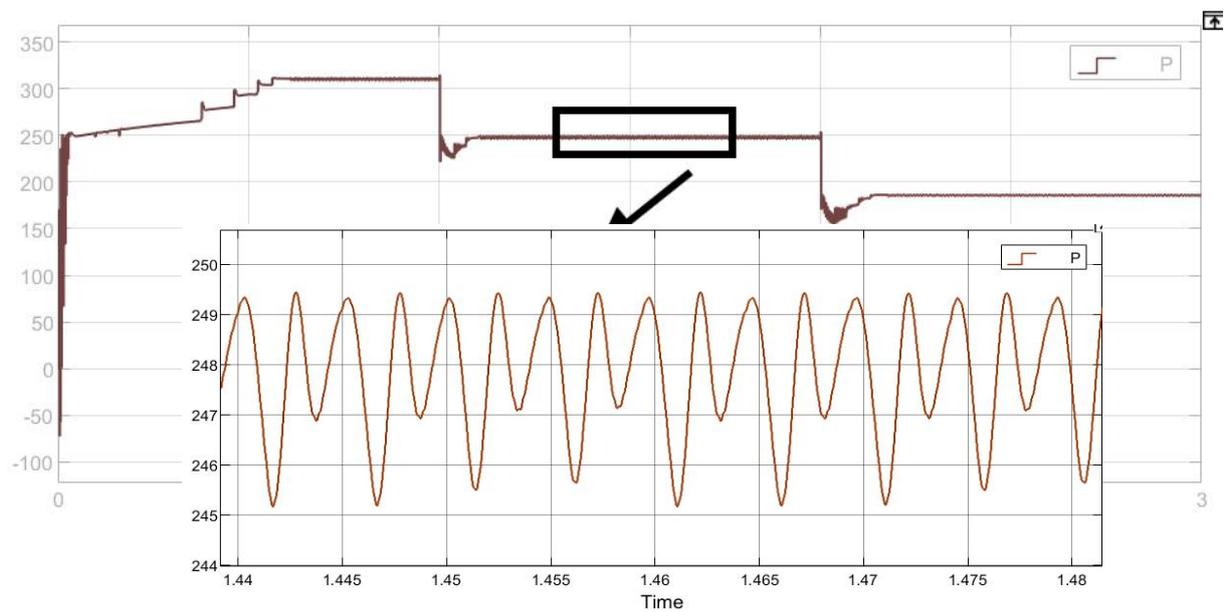


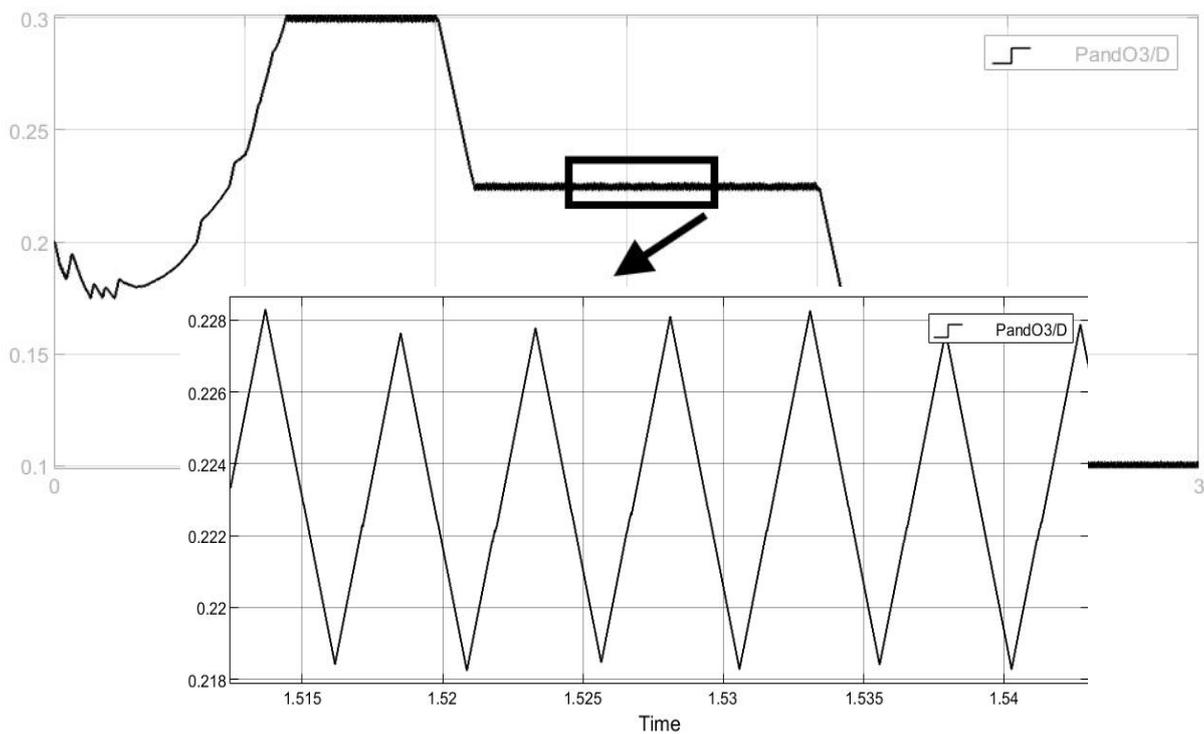
Figure 2.23. La variation de tension filtrée  $V_{fpv}$  d'ordre 128 en fonction du temps (s)

❖ **Puissance filtré ( $P_{fpv}$ ) :**



**Figure 2.24.** La variation de puissance filtrée  $P_{fvp}$  d'ordre 128 en fonction du temps (s)

### ❖ Rapport cyclique (D)



**Figure 2.25.** La variation de rapport cyclique en fonction du temps (s) 1 dans le cas de filtre d'ordre 128.

## 2.5.7. Interpretation

### ❖ Interprétation du courant

- **Filtre d'ordre 32**

Courant moins lissé : on peut observer des fluctuations rapides (bruit) mais une réponse plus rapide aux changements.

Les oscillations autour du MPP sont plus rapides et de plus faible amplitude (car le retard est faible) mais le bruit peut induire des erreurs de décision.

- **Filtre d'ordre 64:**

Un compromis entre le lissage et le retard.

Moins de bruit que l'ordre 32, mais un retard plus important. Les oscillations autour du MPP sont plus amorties mais avec une réponse plus lente aux variations.

- **Filtre d'ordre 128 :**

Courant très lissé : les fluctuations rapides sont fortement atténuées.

Cependant, le retard est important, ce qui peut causer :

Une réponse très lente aux variations d'ensoleillement.

Des oscillations plus larges et plus lentes autour du MPP, car l'algorithme P&O, basé sur des valeurs retardées, peut prendre des décisions inappropriées.

**Effets des filtres FIR sur la courbe de courant**

<b>Ordre du filtre</b>	<b>Temps de repense</b>	<b>Atténuation du bruit</b>	<b>Impact sur le P&amp;O</b>
<b>32</b>	tribunal	Modérée	Réaction rapide, oscillations plus marquées autour du MPP.
<b>64</b>	moyen	bonne	Oscillations réduites, convergence plus stable mais légèrement plus lente.
<b>128</b>	long	Excellent	Oscillations très atténuées, convergence lente avec risque de dépassement.

**Tableau 2.4.** Effets des filtres FIR sur la courbe de courant

❖ **Interprétation de tension .**

- **FIR ordre 32**

Filtrage relativement faible sur la tension de sortie (extrêmement haute fréquence), on observe tout de même une forme "lissée" sur la courbe (perte de certains détails)

Retard faible, réponse dynamique rapide de l'algorithme P&O sur les variations d'irradiance

Comme observer sur la courbe, les oscillations autour du MPP sont plus grandes qu'avec les filtres supérieurs et on peut voir sur la tension des variations assez "rapide" atténuées par rapport au cas sans filtre

- **FIR ordre 64**

Filtrage "significatif" sur la tension de sortie (extrêmement haute fréquence)

Retard plus important, réponse dynamique plus faible de l'algorithme P&O sur les variations d'irradiance

Comme observer sur la courbe, les oscillations autour du MPP sont plus faible et la tension plus stable mais on peut observé des overshoot en cas de transition très rapide de la tension comme en cas de nuage

- **FIR ordre 128**

Filtrage "très" fort sur la tension de sortie (extrêmement haute fréquence), le bruit est quasi-inexistants mais par conséquent le capteur "filtre" également le signal à mesure basse fréquence  
Retard "très" important, réponse dynamique "très" faible de l'algorithme P&O sur les variations d'irradiance

Comme observer sur la courbe, la tension est très stable une fois le système en régime permanent mais en cas de variation rapide elle mets du temps à converger vers le nouveau MPP (d'où des pertes d'énergie)

### Effets des filtres FIR sur la courbe de tension

Ordre de filtre	Stabilité	Reponse dynamique	Perte de puissance	Adaptation aux variations
32	Modérée	rapide	Modérée (oscillations)	bonne
64	bonne	moyen	faible	acceptable
128	Excellent	lent	tres faible	Mauvaise (retard élevé )

Tableau 2.5. Effets des filtres FIR sur la courbe de tension

- ❖ **Interprétation de puissance**

- **Filtre FIR d'ordre 32**

Dynamique forte : Réponse rapide à un échelon de consigne grâce à une fenêtre de filtrage courte (N=32). L'algorithme P&O est réactif aux perturbations. Présence d'ondulations en régime permanent .

Filtrage modéré : Le filtrage appliqué ne lisse pas totalement le signal de puissance et le bruit n'est pas totalement atténué. C'est pourquoi les ondes persistantes autour du point de MPP sont toujours visibles (voir amplitude des ondes autour de la valeur de régime permanent idéal qui est plus élevée que celle des filtres de plus grand ordre).

Du bruit persiste :La courbe est un peu moins lisse et présente une petite instabilité égale au compromis fait entre la vitesse de l'algorithme et le filtrage (passerelle entre commande et chauffage).

- **Filtre FIR d'ordre 64**

Meilleur compromis : Filtrage plus efficace que l'ordre 32 et lisse fortement le signal. Moins d'ondulations autour du point de MPP (amplitude des ondulations atténuée de 30 à 50% en fonction du point de MPP considéré par rapport à un ordre de filtre de 32). Légère dynamique en moins : Temps de convergence un peu plus long vers le point de puissance maximale parfait après une perturbation du signal. Meilleure stabilité en régime permanent que pour un ordre de filtre 32 avec une puissance moyenne très proche de la valeur idéale.

- **Filtre FIR d'ordre 128 :**

Très stable en régime permanent : Filtrage très efficace : lissage du signal de puissance et atténuation quasi parfaite du bruit. Les ondulations autour du point de MPP sont très atténuées et peuvent même se considérer comme nulles (courbe quasi-plate en régime permanent). Inertie forte , Mauvaise dynamique , plus de temps de réponse et de collecte des signaux. Lors d'une variation de l'ensoleillement le système met plus de temps à retrouver sa position au point de MPP et des pertes énergétiques peuvent alors être enregistrées sur les transitoires.

### Effets des filtres FIR sur la courbe de puissance

Ordre du filtre	Bruit reseduel	Oscillations au MPP	Reponse dynamique	Stabilite en regime	Perte d'énergie
32	Eleve	Amplés et fréquentes	rapide	instable	Pertes par oscillations
64	modere	reduite	légèrement ralentie	optimale	Pertes minimales
128	très faible	négligeables	lente	très faible	Perte durant les transitoires

Tableau 2.6. Effets des filtres FIR sur la courbe de puissance

### ❖ Interprétation du rapport cyclique

- **filtre d'ordre 32**

la dynamique rapide et la faible inertie permettent un temps de réponse court, idéal pour réagir aux variations brusques d'ensoleillement. Toutefois, la courbe de puissance (D) présente des oscillations fréquentes autour du MPPT, bien que d'amplitude modérée. Le compromis bruit/stabilité est limité : la réduction du bruit est faible, rendant le P&O sensible aux perturbations haute fréquence. Résultat : une convergence rapide vers le MPPT, mais avec des fluctuations visibles, adaptée aux conditions météorologiques très changeantes.

- **filtre d'ordre 64**

offre un équilibre entre stabilité et rapidité. Son filtrage plus efficace réduit significativement le bruit, atténuant les oscillations de la courbe de puissance. La convergence vers le MPPT est plus lente qu'avec l'ordre 32, mais la trajectoire est plus lisse. Le délai introduit par le filtre ralentit toutefois les décisions du P&O, créant un risque de dépassement lors de variations rapides. Résultat : une stabilité

améliorée en régime permanent avec une légère perte de réactivité, optimal pour des conditions semi-stables.

- **filtre d'ordre 128**

priorise la stabilité avec une inertie élevée. Son filtrage très sélectif supprime quasi totalement le bruit, produisant une courbe de puissance lisse aux oscillations négligeables. Cependant, la convergence vers le MPPT est lente, et le délai important empêche le P&O de suivre les variations rapides (ex. passages nuageux). Résultat : une excellente stabilité en régime permanent, mais des pertes d'énergie lors de transitions rapides, réservé aux environnements très stables.

### Effets des filtres FIR sur la courbe de rapport cyclique

Ordre du filtre	Oscillations de D	Temps de convergence	Stabilité	Adaptations aux variations
32	Amplitudes modérées	Rapide	moyenne	excellente
64	faibles	moyen	bonne	Bonne
128	négligeable	lent	excellente	mauvaise

Tableau 2.7. Effets des filtres FIR sur la courbe de rapport cyclique

### 2.5.8. Resultat globale

Le choix de l'ordre du filtre FIR est un compromis entre deux critères : la précision (lissage du bruit) et la rapidité (capacité à suivre rapidement le point de puissance maximal). Pour un système photovoltaïque connecté à une charge résistive, un filtre d'ordre 64 est souvent recommandé pour des conditions d'utilisation en extérieur car c'est celui qui apportera le meilleur compromis entre la stabilité et la rapidité. En effet, les deux ordres les plus "extrêmes" ont des inconvénients : l'ordre 32, qui a pour avantage d'être rapide (recommandé pour des conditions d'utilisation très dynamique comme un ciel très changeant) présente de nombreuses nuisances tel que des fluctuations visibles et une sensibilité au bruit, tandis que le filtre d'ordre 128 qui a pour avantage d'être stable, et donc efficace pour le rendement en régime permanent (recommandé pour des conditions d'utilisation très stables comme en laboratoire) est trop peu rapide pour être robuste à des changements rapides (exemple, passages nuageux).

## 2.6. Conclusion

Ce chapitre a permis la conception, l'implémentation et l'analyse approfondie d'une commande MPPT de type Perturb & Observe (P&O), intégrant un filtre numérique FIR pour optimiser ses performances. Après avoir présenté l'environnement de simulation MATLAB/Simulink et implémenté la commande P&O de base, l'accent a été mis sur la synthèse et l'intégration d'un filtre FIR au sein de la boucle de commande.

Les travaux ont démontré l'efficacité du filtrage FIR pour atténuer significativement les oscillations autour du point de puissance maximale (MPP), phénomène inhérent à l'algorithme P&O standard. L'analyse comparative des filtres d'ordre 32, 64 et 128 a révélé un compromis clé :

Les filtres d'ordre supérieur (128) offrent une atténuation plus marquée du bruit et des oscillations résiduelles, conduisant à une plus grande stabilité en régime permanent.

Les filtres d'ordre inférieur (32) préservent une dynamique plus rapide lors des variations d'ensoleillement, au prix d'ondulations résiduelles plus importantes.

L'ordre 64 s'est souvent positionné comme un compromis intéressant entre précision de suivi et rapidité de réponse.

Ces résultats valident l'intérêt de l'approche combinant commande P&O et filtrage FIR pour améliorer la qualité de l'énergie produite par un système photovoltaïque. Ils soulignent également l'importance cruciale du choix de l'ordre du filtre, qui doit être optimisé en fonction des priorités (stabilité vs. rapidité) et des caractéristiques du système PV considéré. La méthodologie de synthèse et de simulation mise en œuvre fournit une base solide pour l'évaluation et l'optimisation de stratégies de commande MPPT avancées.

**Chapitre 03**  
**IMPLEMENTATION ET TEST**  
**DE COMMANDE P&O SUR**  
**ESP32**

### 3.1.INTRODUCTION

Dans ce chapitre , nous étudions la mise en œuvre effective ainsi que les tests de la commande par perturbation et observation (P&O) sur un microcontrôleur ESP32, proposée dans le chapitre précédent. Cette partie C'est détaillé de quatre grands axes. Le premier axe concerne l'interfaçage entre l'ESP32 et le convertisseur DC-DC (choix des composants et description du circuit de gestion de l'énergie). Le second axe est consacré à la mise en œuvre initiale de l'algorithme P&O, qui traite des programmations, de l'acquisition et des méthodes mises en œuvre afin de suivre le point de puissance maximale (MPPT). Le troisième axe introduit l'intégration d'un filtre passe-bas au sein de la boucle de régulation en vue de réduire les oscillations et améliorer le système. Dans le dernier axe, nous mettons en œuvre une comparaison expérimentale entre la version classique et celle avec filtrage en termes d'efficacité, de rapidité, de stabilité. L'analyse ainsi produite permet déjà de dégager des conclusions positives sur les avantages et les limites de chacune des voies envisagées tout en ouvrant des perspectives d'optimisation dans les applications photovoltaïques.

### 3.2.ÉTAPES DE REALISATION ET IMPLEMENTATION

La présente section est entièrement consacrée à la description exhaustive des étapes de conception, de mise en œuvre de notre projet, pour lesquelles nous utilisons divers composants, matériels spécifiques, choisis pour leurs performances et leur fiabilité au service des objectifs du système. Voici donc en premier lieu les principaux éléments qui le constituent :

#### 3.2.1.Emulateur PV

L'émulateur photovoltaïque permet le fonctionnement d'un panneau photovoltaïque sans besoin d'éclairage solaire, ce qui est un avantage pour tester les dispositifs et systèmes dans des conditions maîtrisées et permet de quantifier le rendement des systèmes connectés. Dans notre cas, nous avons utilisé une alimentation de 24V avec une résistance de 10 Ohms et un interrupteur. Si l'interrupteur est ouvert, le courant circule dans la résistance de 10 Ohms. Si l'interrupteur est fermé, la résistance est court-circuitée, et le courant peut passer librement.

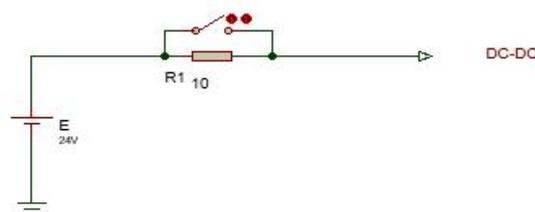


Figure 3.1. schéma de émulateur PV

### 3.2.2. Microcontrôleur Wemos D1 R32 ESP32

Le dispositif WeMOS D1 R32 ESPDuino32, muni de Wi-Fi et Bluetooth bimode 2,4 GHz, renferme une antenne, un balun RF, un amplificateur de puissance, des amplificateurs à faible bruit, des filtres et un module de gestion d'énergie. Cela permet de réduire la superficie occupée sur le circuit imprimé. Cette technologie TSMC 40 nm à faible consommation et à excellente performance RF est robuste et résiliente pour un vaste éventail d'applications.

Un contrôleur PWM (Modulation de Largeur d'Onde) composé de 16 canaux indépendants est intégré au système ESP32, chaque canal pouvant être réglé pour un signal PWM donné. Toutes les GPIO capables de fonctionner comme sorties peuvent être affectées en tant que broches PWM, à l'exception des GPIOs 34 à 39 qui ne sont pas aptes à produire un PWM. Les paramètres nécessaires à la caractérisation d'un signal PWM dans le code sont la fréquence, le rapport cyclique (duty cycle), le canal PWM et la GPIO sur laquelle sera diffusé le signal PWM. [23]

La carte présente les spécificités techniques suivantes : une alimentation sous 5VDC, une tension d'entrée comprise entre 7 et 12V, une tension de sortie de 3,3V, un courant minimum requis de 250mA, 520 Ko de RAM, 4 Mo de mémoire flash externe, 20 pin numériques et 6 pin analogiques.

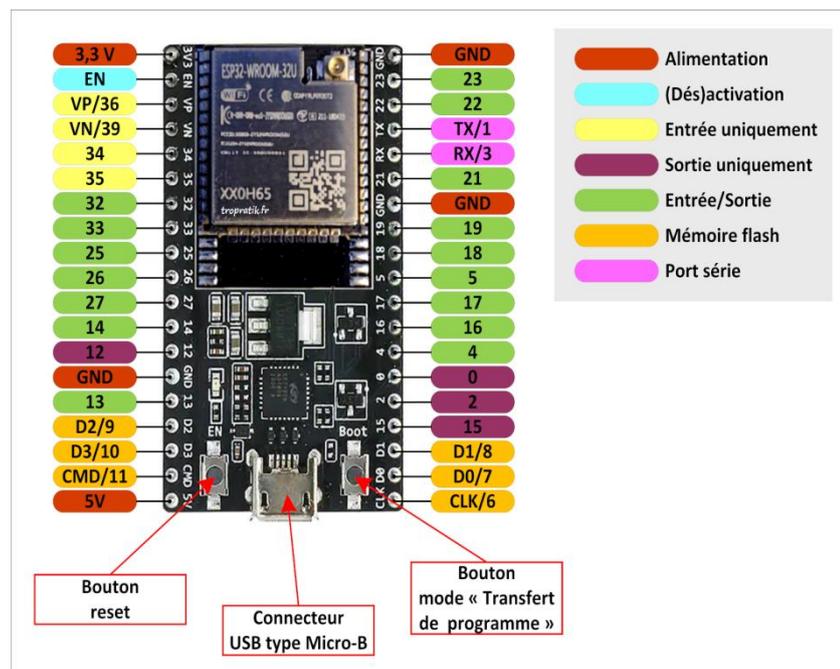


Figure 3.2. description de la carte ESP32.

### 3.2.2. Convertisseur DC/DC De Type Buck XL4015

Le XL4015 est un convertisseur DC/DC abaisseur (buck) à fréquence fixe de 180 KHz, qui peut livrer un courant de 5A avec un bon rendement, peu de bruit de sortie et une bonne régulation à vide, en ligne et sous charge. Le régulateur se manipule facilement avec peu de composants externes. Il dispose d'une compensation de fréquence interne et d'un oscillateur à fréquence fixe. Le circuit de contrôle PWM permet de faire varier le rapport cyclique de manière linéaire, de 0 à

100%. Une protection contre les surcharges de courant est intégrée. En cas de court-circuit, la fréquence de fonctionnement est réduite de 180KHz à 48KHz. Il est prévu un module de compensation interne limitant le nombre de composants externes.[24]

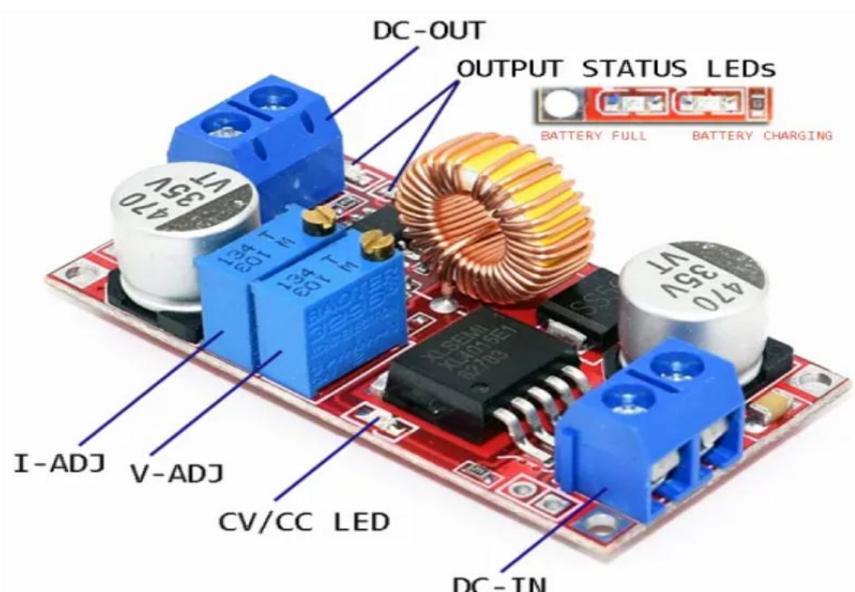
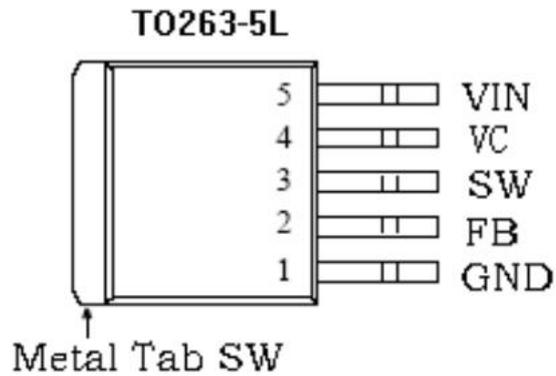


Figure 3.3. Schéma fonctionnel de convertisseur buck xl4015

#### Caractéristiques :

- ◆ Plage de tension d'entrée étendue : 8V à 36V
- ◆ Tension de sortie réglable de 1,25V à 32V
- ◆ Cycle de service maximal : 100 % maximum
- ◆ Tension de déchet minimum : 0,3V
- ◆ Fréquence de commutation fixée à 180 KHz
- ◆ Capacité de courant de sortie constant de 5A
- ◆ MOSFET de puissance optimisé intégré
- ◆ Rendement très élevé : jusqu'à 96 %
- ◆ Excellente régulation en ligne et en charge
- ◆ Fonction de protection thermique intégrée
- ◆ Fonction de limitation de courant intégrée
- ◆ Fonction de protection contre les courts-circuits de sortie intégrée

#### Les pins de configuration :



**Figure 3.4.** Configurations des broches de buck xl4015.

**Tableau 3.1.** Description des broches

Numéro de pin	Nom de pin	description
1	GND	Broche de terre. Une attention particulière doit être portée à sa disposition. Cette broche doit être placée à l'extérieur du chemin de masse reliant la diode Schottky au condensateur de sortie afin d'éviter que les pics de courant de commutation n'induisent du bruit de tension dans le XL4015.
2	BF	Broche de rétroaction (FB). Grâce à un réseau de résistances diviseur externe, la FB détecte la tension de sortie et la régule. Le seuil de tension de rétroaction est de 1,25 V.
3	SW	Broche de sortie du commutateur d'alimentation (SW). SW est le nœud de commutation qui alimente la sortie.
4	VC	Capacité de dérivation du régulateur de tension interne. Dans une application système typique, la broche VC connecte une capacité de 1 $\mu$ F à VIN.
5	VIN	Broche d'entrée de tension d'alimentation. Le XL4015 fonctionne avec une tension continue de 8 à 36 V. Reliez Vin à la masse avec un condensateur suffisamment grand pour éliminer le bruit en entrée.

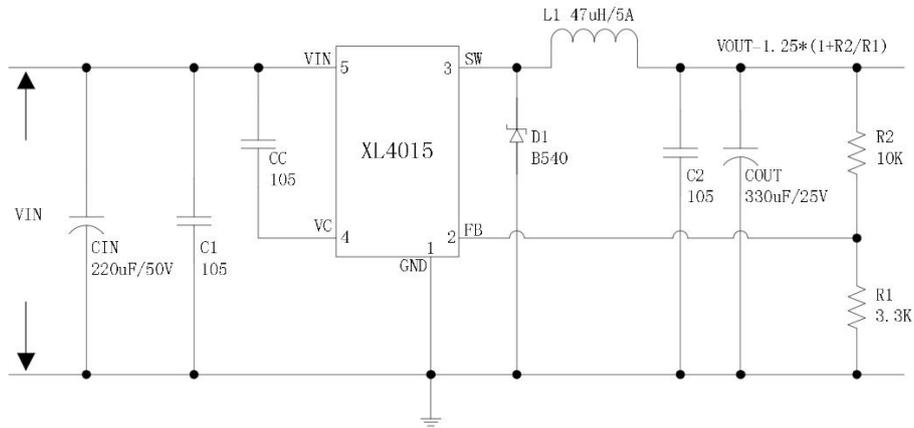


Figure 3.5. Schéma fonctionnel de buck xl4015(VIN=8V~36V, VOUT=5V/5A).

### 3.2.3. Passage d'un Convertisseur DC-DC Fixe à un Convertisseur DC-DC Variable

La conversion d' un convertisseur DC-DC à tension fixe é e vers un convertisseur DC-DC à tension variable nécessite plusieurs modifications dans la conception du circuit qui va permettre une régulation dynamique de la tension de sortie. Cette transition peut se faire par l' adjonction de composants réglables voire d' outils de contrôle ad hoc . Un convertisseur DC-DC à tension fixe est conçu pour fournir en permanence une tension de sortie constante qui permet de réguler les variations de charge ou de tension d' entrée . La configuration typique du convertisseur à tension fixe é e utilise un couple de résistances fixes pour d é terminer la valeur du rapport de division de tension qui impose la tension de sortie. Dans notre application basée sur un régulateur de type XL4015, la tension de sortie est dé terminée par un rapport de résistances (R1 et R2) lié à la patte de rétroaction ( FB) du régulateur comme le montre la figure suivante :

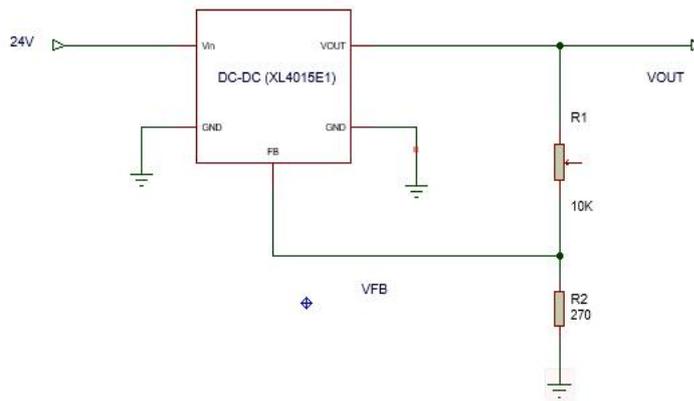


Figure 3.6. schéma de convertisseur XL4015E1 dans le cas fixe.

Convertisseur DC-DC : Le dispositif de transformation de tension DC-DC.

R1 et R2 : Deux résistances reliées en configuration de diviseur de tension.

FB (Feedback) : La broche de rétroaction qui reçoit une portion de la tension de sortie Vout via le diviseur de tension constitué par R1 et R2

Vout : La formule qui suit détermine la tension de sortie du convertisseur en fonction des valeurs des résistances R1 et R2 :

$$V_{out} = V_{ref} \left(1 + \frac{R1}{R2}\right) \quad (3.1)$$

Dans le cas où Vref=1,25 V est déjà la tension de référence interne du module DC-DC.

En réalité le convertisseur buck XL4015E1 délivre une tension fixée obligatoirement RDC05CD n'alimente que les dispositifs alimentés sous tension fixe, alors qu'en variable, peut restaurer une tension variable capable d'alimenter une large gamme de dispositifs à tension variable.

Dans le cadre de la modification du convertisseur en variable, les étapes retenues sont :

- R1 fixé : La résistance variable R1 est ajustée à une valeur fixe (ici de 3.85kΩ) pour établir une première base de tension de sortie à partir de laquelle la tension de sortie ancrée se déplacera
- Ajout de R2 : La résistance R3 (1kΩ) est ajoutée avec R1 pour réaliser un nouveau diviseur de tension avec R2.
- Signal V-PWM : Un signal PWM est appliqué à ce nouveau diviseur (venant en amont d'un circuit d'adaptation) permettant de régler dynamiquement la tension de sortie Vout à partir de la profondeur du signal PWM. En effet, le signal PWM va modifier la tension de feedback VFB qui, à son tour, va déterminer la tension de sortie Vout.

La tension de la sortie peut modifiée puis être calculée à l'aide de la formule modifiée :

$$V_{out} = V_{ref} \left(1 + \frac{R1}{R2}\right) + (V_{ref} - V_{BF}) \frac{R1}{R3} \quad (3.2)$$

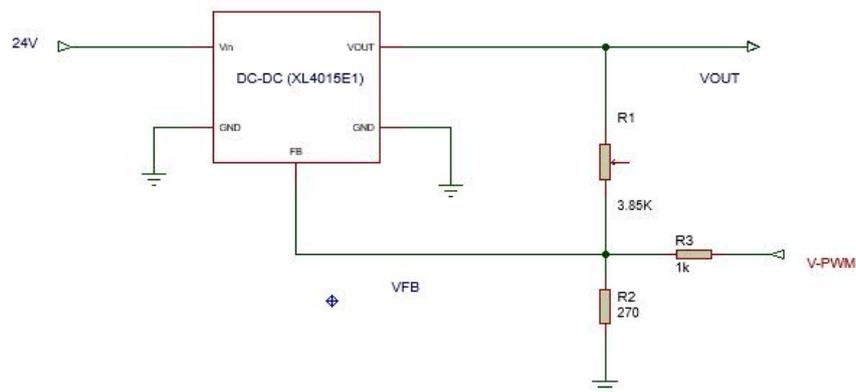
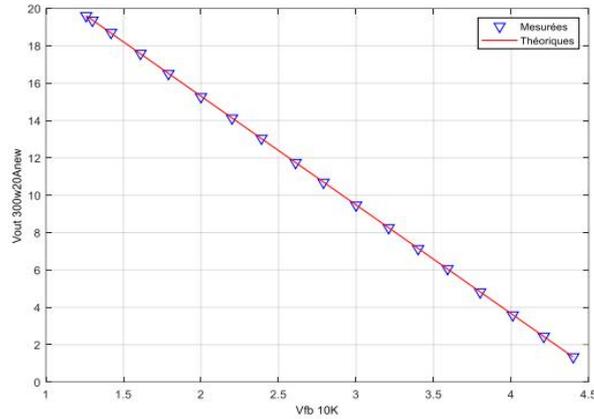


Figure 3.7. schéma de convertisseur xl4015e1 dans le cas variable.

La loi qui lie la tension de rétroaction Vfb et la tension de sortie Vout pour le cas du convertisseur buck XL405E1 est présentée graphiquement ci-dessous. Les données expérimentales, représentées par des triangles bleus, sont confrontées aux résultats de la théorique (courbe rouge).



**Figure 3.8.** montre la relation entre Vfb et Vout.

Le graphique montre une bonne équivalence entre les valeurs prédites et celles obtenues expérimentalement. On peut observer que les points expérimentaux sont bien alignés sur la courbe théorique correspondant au comportement du dispositif étudié : le modèle théorique est d'une bonne précision.

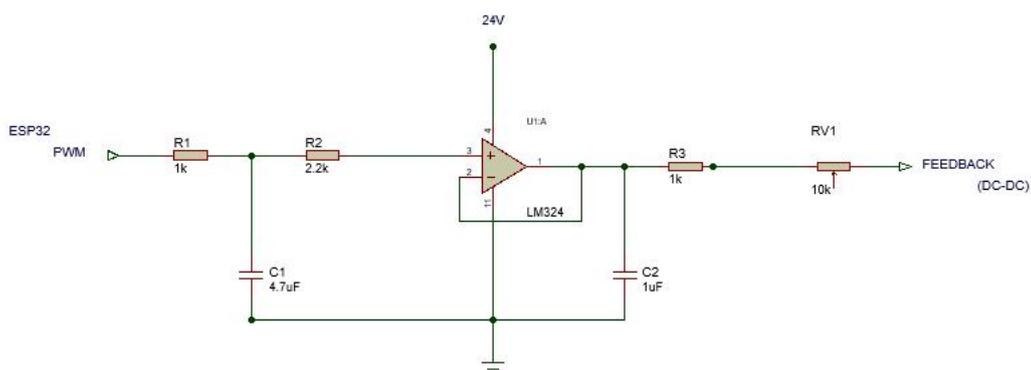
L'on observe une liaison inverse entre Vout. En effet, plus Vfb augmente, plus Vout diminue, situation habituelle pour de nombreux régulateurs de tension.

Le diagramme comporte une bonne représentation du modèle théorique permettant de prédire Vout, en fonction de Vfb.

Les valeurs expérimentales sont bien conformes aux valeurs théoriques, ce qui permet de conclure que l'équation servant à modéliser ce convertisseur DC-DC variable est d'une bonne qualité.

### 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 permet un contrôle précis et performant de la tension de sortie du convertisseur DC-DC, en se servant du signal PWM comme principal outil de gestion et en tirant parti des caractéristiques des composants passifs et actifs pour assurer la constance et le sérieux du système

dans une variété de situations d'opération. Voici comment chaque phase participe au fonctionnement global du système :

### **Génération du Signal PWM**

L'ESP32 est capable de produire un signal PWM sous la forme d'une onde carrée avec des cycles de fonctionnement qui peuvent varier. Ce signal régule la puissance fournie au convertisseur DC-DC. Le rapport cyclique du signal PWM détermine la tension moyenne fournie à l'étape suivante du circuit.

### **Mise à l'échelle et Filtrage du Signal PWM**

Le signal PWM est transmis à travers un réseau de division de tension constitué de R1 (1k $\Omega$ ) et R2 (2.2k $\Omega$ ). Ce circuit diminue le niveau de tension du signal PWM.

C1 (4,7 $\mu$ F) fonctionne comme un filtre de type passe-bas, atténuant les éléments de haute fréquence du signal PWM afin de générer une tension continue plus stable.

### **Traitement avec l'Amplificateur Opérationnel LM324**

Le signal filtré arrive à l'entrée non\_inverseuse (+) de l'amplificateur opérationnel, ce dernier étant ici configuré en suiveur de tension avec la sortie reliée à l'entrée inverseuse (-). De cette manière, la tension de sortie suit avec fidélité la tension d'entrée, avec faible impédance et un haut degré de précision, en sorte que l'amplificateur opérationnel fournisse un signal de commande au convertisseur DC-DC du système.

### **Rétroaction et Stabilisation**

L'amplificateur opérationnel a sa sortie reliée à l'entrée de rétroaction (FB) du convertisseur DC-DC via R3 (1k $\Omega$ ) et le potentiomètre RV1 (10k $\Omega$ ). C2 (1 $\mu$ F) offre une filtration plus poussée du signal, garantissant sa stabilité et minimisant le bruit à haute fréquence. On surveille le signal de rétroaction (FB) afin d'ajuster en temps réel le signal PWM, selon la tension de sortie du convertisseur DC-DC.

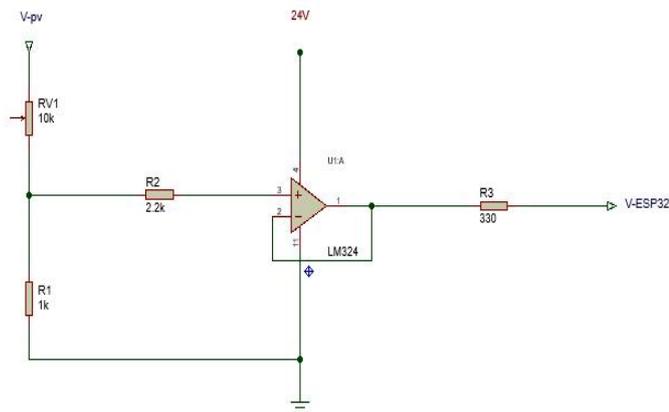
### **Contrôle du Convertisseur DC-DC**

Le convertisseur de courant continu à courant continu adapte sa tension de sortie en fonction du signal de contrôle reçu de l'amplificateur opérationnel. Si la tension de sortie s'écarte de la valeur désirée, le circuit de rétroaction (par l'intermédiaire du FB) signale au système de contrôle, qui modifie par la suite le rapport cyclique PWM pour garantir une tension de sortie stable.

### **Contrôle Réglable de la Rétroaction**

Le potentiomètre ajustable RV1 permet de contrôler finement la boucle. En variant RV1, nous changeons le volume de rétroaction et ainsi nous précisons la stabilisation de la tension de sortie. Ce réglage est nécessaire pour une tension de sortie qui doit être stable face à des variations de charge mais aussi des fluctuations de la tension entrée.

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



**Figure 3.10.** Circuit de Mesure de Tension (VPV).

Le circuit de mesure de tension du panneau solaire (VPV) utilise plusieurs composants nécessaires pour une mesure correcte et pour un suivi de la tension fournie par le panneau photovoltaïque (PV). Voilà comment chacune des étapes complète le fonctionnement du circuit :

### Division de Tension

La tension VPV est fractionnée par le circuit de résistances RV1 et R1. Le potentiomètre RV1 offre la possibilité d'ajuster avec précision le niveau de tension destiné à l'entrée de l'amplificateur opérationnel LM324. Cela rend possible l'ajustement de l'échelle de mesure à l'entrée de l'ESP32 pour une lecture précise.

### Calibration Fine

R3 restreint le flux de courant provenant de l'amplificateur vers l'ESP32. Le potentiomètre RV1 offre un réglage précis de la tension d'entrée de l'amplificateur opérationnel, garantissant ainsi une précision optimale. Ceci assure que la tension de sortie est ajustée pour s'accorder avec l'échelle de mesure de l'ESP32, garantissant une surveillance constante et exacte de la tension du panneau solaire.

### Entrée de Tension (VPV)

Le voltage engendré par le panneau photovoltaïque varie en fonction de l'exposition au rayonnement solaire. Ce voltage est appliqué à un circuit de répartition de tension constitué du potentiomètre RV1 (10 k $\Omega$ ) et de la résistance R1 (1 k $\Omega$ ).

### Amplification

L'entrée non-inverseuse (+) de l'amplificateur opérationnel LM324 reçoit ensuite la tension divisée et modifiée. Il est paramétré en tant qu'amplificateur non-inverseur.

Le rapport des résistances R2 (2.2 k $\Omega$ ) et R1 détermine le gain de l'amplificateur. Par conséquent, la tension à la sortie (Vout) est une expression amplifiée de la tension VPV, offrant ainsi une interprétation précise et amplifiée de la tension générée par le panneau solaire.

### Sortie vers ESP32

La tension de sortie, amplifiée et réajustée au besoin, est envoyée sans intermédiaire vers un ESP32 où elle servirait à faire un suivi continu et approfondi, ce qui lui permet de mieux maîtriser déjà le fonctionnement du panneau photovoltaïque et d'être au service d'une régulation de l'énergie fournie.

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

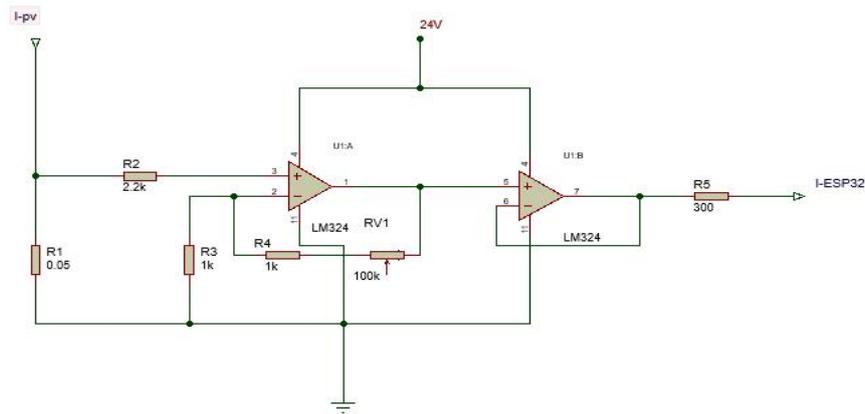


Figure 3.11. Circuit de Mesure de Courant (IPV)

Le circuit de mesure de courant du panneau solaire (IPV) repose sur plusieurs éléments fondamentaux pour assurer une mesure fiable et un suivi optimal du courant délivré par le panneau solaire. Chaque phase a sa manière de contribuer au fonctionnement du circuit :

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

La faible tension produite par R1 est mise à l'entrée non-inverseuse (+, Pin 3) de l'amplificateur opérationnel U1. Cet amplificateur renforce cette tension en fonction du réseau de rétroaction formé par les résistances R2, R3, R4 et le potentiomètre RV2, modifiant ainsi le gain de l'amplificateur pour produire une sortie appropriée à l'ESP32.

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

L'amplification de la tension par U1 est ensuite transmise à l'entrée non-inverseuse (+) de l'amplificateur opérationnel U2. Ce second amplificateur opérationnel fonctionne en tant que suiveur de tension, assurant une impédance d'entrée élevée et une impédance de sortie basse pour transmettre fidèlement la tension au microcontrôleur ESP32 à travers sa sortie.

### Résistance Shunt (R1)

Le réseau de résistance shunt R1 ( $0.05\Omega$ ) connecté en série à la ligne de courant du panneau solaire a pour but de nous fournir un bas niveau de tension proportionnelle au courant circulant dans le circuit (loi d'Ohm :  $V = I \times R$ ), pour la mesure du courant.

Limite de Courant avec R5

Calibrage Fin avec RV1

### Limite de Courant avec R5

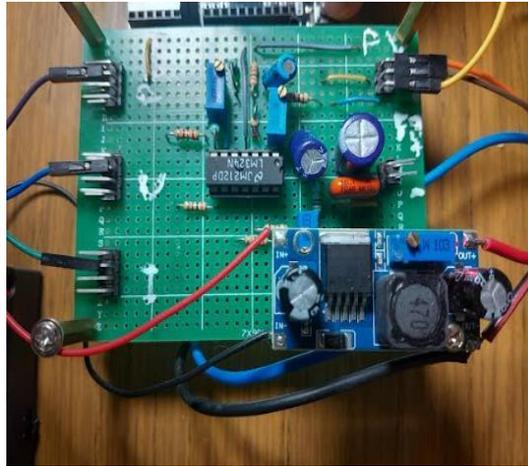
Afin de garantir la sécurité de l'entrée de l'ESP32, la connexion entre la sortie de l'amplificateur U2 et l'entrée de l'ESP32 est réalisée au moyen d'une résistance R5 ( $300\Omega$ ) à travers laquelle on contrôle le courant pour éviter une surcharge.

### Calibrage Fin avec RV1

Le régulateur de tension RV1 permet un réglage pointu du gain d'U1A, assurant que la tension de sortie est adéquate dans la plage de mesure de l'ESP32. Cela ouvre la voie à un réglage pointu du circuit pour une performance optimale.

### Lecture du Courant par l'ESP32

L'ESP32 traite la tension qui a été amplifiée et stabilisée par l'amplificateur U2. Cette tension est proportionnelle au courant généré par le panneau solaire (IPV). L'ESP32 se sert de cette information pour contrôler le courant solaire et réaliser les actions appropriées selon les intensités mesurées.



**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)

Nous avons utilisé une ampoule à LED COB de la marque FTVOGUE de puissance nominale 10 Watts sous 12 Volts, qui produit une lumière blanche chaude de 6500 Kelvin. Elle est idéale pour créer une luminosité agréable, accompagnée d'un ventilateur sous 12 Volts, énergie nécessaire pour assurer son bon fonctionnement, sa mise en mouvement.



**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 AVEC FILTRE FIR

#### SUR SYSTEME PV

Après avoir calculé les coefficients du filtre, nous les avons intégrés dans un code Arduino pour l'ESP32. En prenant un filtre d'ordre 32 comme exemple, le code est structuré comme suit :

```
// #define V pin, I pin and PWM pin
int VpvPin = 14; // V pin
int IpvPin = 27; // I pin
int PWMout =2; // PWM pin (LED)
int V=0, I=0;
float Vpv = 0, DV=0, valv=0;
float Ipv = 0;
float Vmax=24;
float Imax=1.15;
int Dpwm = 1047; // 0.25 of 4096 (12 bits PWM)
int Dold =2047;
int pwm = 63;

int Dmax = 3700; // 0.9 of 4096
int Dmin=409; // 0.1 of 4096
int Delta=1; // 1/4096

const int N = 32; // N: ordre du filtre
float H[N] = {-0.0044, -0.0047, -0.0061, -0.0068, -0.0061, -0.0035, 0.0016, 0.0094, 0.0199, 0.0327,
0.0471, 0.0619, 0.0759, 0.0879, 0.096, 0.1012, 0.1012, 0.0966, 0.0879, 0.0759, 0.0619, 0.0471, 0.0327,
0.0199, 0.0094, 0.0016, -0.0035, -0.0061, -0.0068, -0.0061, -0.0047, -0.0044}; // Les coefficients H(i)
//H[N]= {-0.0044, -0.0047, -0.0061, -0.0068, -0.0061, -0.0035, 0.0016, 0.0094, 0.0199, 0.0327, 0.0471,
0.0619, 0.0759, 0.0879, 0.096, 0.1012, 0.1012, 0.0966, 0.0879, 0.0759, 0.0619, 0.0471, 0.0327, 0.0199,
0.0094, 0.0016, -0.0035, -0.0061, -0.0068, -0.0061, -0.0047, -0.0044}; % Coefficients H(i)
```



$I_{pv} = (I_{max} * I) / 4096;$

```
// ***** Code du FIR entree:Vpv sortie:Vft *****  
for(int i=1; i< N; i++) { Dv[N-i] = Dv[N-1-i]; } // Calcul des retards  
Dv[0]=Vpv;  
for(int i=1; i< N; i++) { Mv[i] = Dv[i-1]*H[i]; } // Calcul des multiplications  
Mv[0]=Vpv*H[0];  
for(int i=0; i< N; i++) { Vft += Mv[i]; } // Calcul de l'addition (sortie filtre)  
// ***** Fin du code FIR *****
```

```
// ***** Code du FIR entree:Ipv sortie:Ift *****  
for(int i=1; i< N; i++) { Di[N-i] = Di[N-1-i]; } // Calcul des retards  
Di[0]=Ipv;  
for(int i=1; i< N; i++) { Mi[i] = Di[i-1]*H[i]; } // Calcul des multiplications  
Mi[0]=Ipv*H[0];  
for(int i=0; i< N; i++) { Ift += Mi[i]; } // Calcul de l'addition (sortie filtre)  
// ***** Fin du code FIR *****
```

$P_{pv} = V_{ft} * I_{ft};$   
 $DV = V_{ft} - V_{old};$   
 $DP = P_{pv} - P_{old};$

```
if (DP!=0) {  
    if (DP<0) {  
        if (DV<0) {  
            Dpwm=Dold-Delta;  
        }  
        else {  
            Dpwm=Dold+Delta;  
        }  
    }  
}
```

```

else {
    if (DV<0) {
        Dpwm=Dold+Delta;
    }
    else {
        Dpwm=Dold-Delta;
    }
}
}
else { Dpwm=Dold;}

if (Dpwm>=Dmax || Dpwm<=Dmin) {
    Dpwm=Dold;
}
Dold=Dpwm;
Vold=Vft;
Pold=Ppv;
pwm = (255-Dpwm/16);
//pwm = (Dpwm/16);
//D = (Dpwm)*(1/4095);

analogWrite(PWMout, pwm);
delayMicroseconds(10);

//sprintf(buffer, "%.2f ; %.2f ; %d ; %2.f;", Vft, Ift, Dpwm, Ppv);
sprintf(buffer, "%.2f ; %.2f ; %d ;", Vft, Ift, Dpwm);
Serial.println(buffer);

//valv=(3.15*pwm)/256;
//Serial.println(Vft);
//Serial.println(" V");

```

```
//Serial.println(Dpwm);  
//Serial.println(D);  
//Serial.println(pwm);  
//Serial.println(Ipv);  
//Serial.println(Ppv);  
//Serial.println(myTime);  
  
}
```

### **3.4.Conclusion**

Ce chapitre présente l'implémentation pratique de l'algorithme MPPT P&O sur un microcontrôleur ESP32, couvrant la conception, l'intégration et les tests du système. L'ESP32 pilote efficacement un convertisseur Buck XL4015 pour réguler dynamiquement la tension en fonction de l'ensoleillement, tandis que des circuits dédiés assurent une mesure précise du courant et de la tension photovoltaïque. L'ajout d'un filtre passe-bas réduit significativement les oscillations autour du point de puissance maximale (MPP), améliorant la stabilité et le rendement énergétique. Les tests comparatifs démontrent la faisabilité et l'efficacité de la commande P&O, validant son applicabilité pour des systèmes photovoltaïques. Les perspectives incluent l'optimisation via des algorithmes hybrides, l'intégration de communications sans fil (Wi-Fi/Bluetooth) pour un suivi à distance, et le renforcement de la robustesse face aux perturbations externes.

## Conclusion générale

Cette recherche a démontré l'efficacité de l'intégration d'un filtre numérique RIF (Réponse Impulsionnelle Finie) au contrôleur MPPT de type Perturber et Observer (P&O) classique. L'objectif principal était d'améliorer l'efficacité du suivi du point de puissance maximale (MPPT) et la production énergétique globale des systèmes photovoltaïques face aux variations environnementales.

Les résultats obtenus sont concluants : le filtrage RIF, appliqué via convolution pour traiter les signaux sonores des capteurs, améliore significativement les performances du contrôleur P&O par rapport à sa version non filtrée. Cette se traduit par un suivi plus précis du point de puissance (MPP) du générateur photovoltaïque (GPV) et conduit ainsi à une optimisation maximale du rendement énergétique.

Cependant, l'implémentation pratique de cette solution sur plate-forme embarquée, notamment le microcontrôleur ESP32 utilisé pour la démonstration, représente un défi technique majeur. Les limitations inhérentes aux ressources matérielles des microcontrôleurs, telles que la puissance de calcul (CPU) et la mémoire disponible, compliquent l'exécution efficace du filtrage RIF en temps réel.

En résumé , bien que l'approche P&O filtrée par RIF se révèle techniquement supérieure pour optimiser l'extraction de puissance des systèmes PV, son déployé à grande échelle dans des applications embarquées nécessitant des travaux complémentaires pour surmonter les contraintes de ressources informatiques et rendre cette solution pleinement viable et robuste.

## Références bibliographiques

- [1] Lund, H., Østergaard, P. A., Connolly, D., & Mathiesen, B. V. (2015). **Smart energy and smart energy systems**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 51, 1377–1387.
- [2] EF4. (s.d.). **Effet photovoltaïque**. <https://www.ef4.be/fr/pv/composants-dun-systeme/effet-photovoltaïque.html> .[accès le 05/03/2025]
- [3] Bachiri, L. et Mida, A., «Etude d'un système photovoltaïque optimisé par une technique MPPT intelligente (neurone-floue) ANFIS,» Université Kasdi Merbah, Ouargla., 2021.
- [4] **Discover the Green Tech**. (s.d.). **Cellules photovoltaïques monocristallines**. <https://www.discoverthegreentech.com/enr/energie-solaire/photovoltaïque/cellules/monocristallines/>.[accès le 05/03/2025]
- [5] Discover the Green Tech. (n.d.). **Cellules photovoltaïques polycristallines**. <https://www.discoverthegreentech.com/enr/energie-solaire/photovoltaïque/cellules/polycristallines/>.[accès le 05/03/2025]
- [6] Solarpedia.Cellule au silicium amorphe. [https://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Cellule au silicium amorphe](https://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Cellule_au_silicium_amorphe).[accès le 05/03/2025]
- [7] Chapitre 5: Capteurs solaires photovoltaïques: . Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque,» Université Alioune DIOP de Bambey, 2015.
- [8] Bouacha, K., & Mazari, B. (2022). **Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque par la commande MPPT**.
- [9] R.Arbouche,M.Aichi (2022). Identification des paramètres d'un module photovoltaïque [Mémoire de master, Université de Ouargla].
- [10] H. Yatimi, E. Aroudam, et M. Louzazni, « Modeling and Simulation of photovoltaic Module using MATLAB/SIMULINK ». MATEC Web of Conferences, EDP Sciences, pages 1-5, 2014.
- [11] B. Equer, Energie solaire photovoltaïque (volume1 : physique et technologie de la conversion photovoltaïque), 1ère édition, ELLIPES, Paris, 1993
- [12] N. Abouchabana, « Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT,» Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2009.
- [13] Messas et M. R.Ourchane, «Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque raccordé au réseau électrique,» Université Djilali Bounaama, Khemis Miliana, 2016.
- [14] S. Ghandour, «conception de convertisseurs DC/DC à base de mems,» université de Grenoble, Saint-Martin-d'Hères, France, 2011.
- [15] Abri, F. (2014). **Commande par mode glissant d'un hacheur parallèle : Application à l'extraction de la puissance maximale d'une pile à combustible** [Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou].

- [16] A.Achour. 2018. «**Analyse et commande d'un hacheur Buck-boost**». [mémoire de master, Université de Biskra.
- [17] A. e. M. A.GUELLAL, «La Commande MPPT Basée sur les Algorithmes Intelligents Destinée aux Applications Photovoltaïques : Etude comparative et implémentation sur FPGA, Le 4ème Séminaire International sur les Energies Nouvelles et renouvelables,» 2016.
- [18] CABAL.C., «Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque,» université de Toulouse III, Toulouse ,France, 2008
- [19] Hatti, M. (2008). Contrôleur flou pour la poursuite du point de puissance maximum d'un système photovoltaïque. *Centre de Recherche Nucléaire de Birline, BP , 180 .*
- [20] n.Abbes, H., Abid, H., Loukil, K., Toumi, A., & Abid, M. (2014). Étude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque. *Revue des Énergies Renouvelables*, 17(3), 435–445
- [21] Bellanger, M. (1981). *Traitement numérique du signal: théorie et pratique*. Ed. Techniques Ingénieur.
- [22] M. R. CHEBOUROU, «Modélisation d'un filtre numérique multi-cadence à l'aide d'un DSP TMS320VC5416,» Université Aboubakr Belkaïd , Tlemcen, 2018.
- [23] «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-bluetoothboard/>. [accès le 01/05/2025]
- [24] «XL4015 Step-Down DC Module with CV/CV Control,» Handson Technology, 2021. [En ligne]. Available: <https://www.handsontec.com/dataspecs/module/XL4015-5APS.pdf>. [accès le 01/05/2025]