

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

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

جامعة سعد دحلب بليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Filière Électronique
Spécialité Instrumentation

Présenté par :

Ahmed BENZADA & Akram KETTAB

Thème :

**Commande MPPT à base de la Logique Floue sur Microcontrôleur
à 32 bits appliquée à un Système Photovoltaïque**

Soutenue devant le jury composé de :

Madame N. CHEGGAGA	Université Blida 1	Président
Monsieur R. BOUKENOU	Université Blida 1	Examineur
Monsieur R. TADRIST	ENS-KOUBA	Encadreur
Monsieur M. MAAMOUN	Université Blida 1	Co-Encadreur

2023-2024

ملخص

يقدم هذا العمل تنفيذ وحدة تحكم تتبع نقطة الطاقة القصوى (MPPT) لنظام الطاقة الشمسية بكفاءة عالية باستخدام محول DC-DC من نوع (Buck) خافض وميكروكنتروالر 32-بت. تم تحقيق توليفة تحكم تتبع نقطة الطاقة القصوى باستخدام تقنية P&O (الاضطراب والمراقبة) وتقنية المنطق الضبابي، لتنفيذها على الميكروكنتروالر 32-بت ESP32 من شركة "ESPRESSIF SYSTEMS". تم تصميم دائرة محول محكومة تعتمد على المحول XL4015E، قادرة على تشغيل حمولة بقدرة 5 أمبير. أظهرت النتائج زيادة في الكفاءة من 92.85% إلى 99.67% على التوالي، من استخدام التحكم بتقنية الاضطراب والمراقبة إلى التحكم بتقنية المنطق الضبابي مع دالة العضوية المكونة من 5 عناصر.

الكلمات المفتاحية:

نظام الطاقة الشمسية، محول DC-DC، تتبع نقطة الطاقة القصوى (MPPT)، خوارزمية P&O، المنطق الضبابي، ميكروكنتروالر 32-بت.

ABSTRACT

This work presents the implementation of an MPPT controller for a photovoltaic system with high efficiency using a Buck DC-DC converter and a 32-bit microcontroller. A synthesis of an MPPT command with Perturb and observe (P&O) and with fuzzy logic algorithms, for implementation on the 32-bit microcontroller ESP32 from ESPRESSIF SYSTEMS, has been realized. A controlled DC-DC conversion circuit was designed based on the XL4015E converter, capable of driving a 5A load. The results showed an efficiency increase from 92.85% to 99.67%, with the respective use of the control with the P&O approach and the control with our fuzzy logic approach with a 5-membership function.

Keywords:

Photovoltaic System, DC-DC converter, MPPT, PO algorithm, Fuzzy logic, 32-bit microcontroller.

RÉSUMÉ

Ce travail présente la mise en œuvre d'un contrôleur MPPT pour un système photovoltaïque avec un rendement élevé utilisant un convertisseur DC-DC du type Buck (abaisseur) et un microcontrôleur à 32 bits. Une synthèse d'une commande MPPT avec les algorithmes P&O (Perturbation et Observation) et logique floue, pour implémentation sur le microcontrôleur à 32 bits ESP32 d'ESPRESSIF SYSTEMS, a été réalisée. Un circuit de conversion DC-DC commandé a été conçu à base du convertisseur XL4015E, capable de piloter une charge de 5 A. Les résultats obtenus ont montré une augmentation du rendement de 92,85 % à 99,67 %, avec l'utilisation respective de la commande avec l'approche P&O et la commande avec notre approche à logique floue à 5 fonctions d'appartenance.

Mots-clés :

Système Photovoltaïque, Convertisseur DC-DC, MPPT, Algorithme P&O, Logique Floue, Microcontrôleur à 32 bits.

REMERCIEMENTS

Nous remercions tout d'abord Dieu Tout-Puissant, le Seigneur de tous les temps, pour son aide et sa grande miséricorde. C'est grâce à Lui que nous avons pu accomplir et présenter ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à nos professeurs, Monsieur Rezki TADRIST et Monsieur Mountassar MAAMOUN, pour avoir accepté de diriger ce travail. Nous leur témoignons toute notre reconnaissance pour leurs conseils, orientations et encadrements. Nous remercions également Monsieur Mohamed BOUNEKHLA pour ses orientations, Madame Nawal CHEGGAGA et Monsieur Rachid BOUKENOUI, membres du jury, pour leur précieuse contribution.

Un grand merci à toutes les personnes qui ont aidé, de près ou de loin, à l'accomplissement de ce travail, ainsi qu'à notre famille et nos amis pour leur soutien inestimable.

Table des matières

REMERCIEMENTS.....	4
LISTE DES ILLUSTRATIONS GRAPHIQUES.....	7
LISTE DES ILLUSTRATIONS TABLEAUX :	8
LISTE DES SYMBOLES :	9
1.LE SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE	3
1.1. Introduction	3
1.2. Le générateur PV	3
1.2.1. L'effet photoélectrique :	3
1.2.2. Les processus impliqués dans la conversion photovoltaïque :	4
1.2.3. Technologies des cellules PV :.....	5
1.2.4. Caractéristiques électriques d'un générateur photovoltaïque :.....	7
1.3. Le convertisseur continu-continu (hacheur) :.....	8
1.3.1 Principe du MLI (PWM) [2]:.....	8
1.3.2 Les types des convertisseurs DC-DC :	9
1.3.3 Convertisseur Buck :	10
1.3.4 Convertisseur Boost :	14
1.3. Conclusion :.....	17
2.Commandes MPPT par Perturbation et Observation et Logique Floue avec Simulation.....	18
2.1. Introduction :	18
2.2. Principe De La Commandes MPPT :	18
2.3. Les techniques MPPT :	19
2.3.1. L'algorithme MPPT P&O (Perturb & Observe) :.....	19
2.3.2. L'algorithme Logique floue (FLC) :.....	21
2.4. Simulation méthode P&O et logique flou :.....	25
2.4.1. Caractéristique des panneaux solaire :.....	25
2.4.2. Simulation des caractéristiques courant-tension et puissance-tension :.....	25
2.4.3. Signaux de référence :.....	26
2.4.4. Les valeurs de composant d'hacheur :.....	27
2.4.5. Simulation méthode P&O :.....	27
2.4.6. Simulation méthode logique floue :	29
2.4.7. Comparaison des deux algorithmes :.....	30
2.4.8. Critère de performance des contrôleurs MPPT : le rendement.....	32
2.5. Conclusion :.....	33
CHAPITRE 3	34

3. Implémentation et résultats.....	34
3.1. Introduction :	34
3.2 Présentations du système MPTT :	34
3.2.1 Emulateur de PV :	35
3.2.2. Caractéristiques de convertisseur utilisé :	35
3.2.3. Caractéristiques de ESP32 :	37
3.2.4 Caractéristiques de la Charge :	38
3.3. Adaptation DC/DC :	39
3.3.1 Fonctionnement de base du convertisseur Buck	39
3.3.2. Schéma typique du XL4015E :	39
3.3.3. Contrôle d'un convertisseur XL4015 (transformer dc-dc fixe vers variable) :	41
3.3.4. Conception de circuit adaptation :	42
3.4. Réalisation du système :	47
3.5. Résultat du système avec les deux algorithmes :	49
3.5.1. Comparaison des algorithmes	53
3.5.2. Rendement globale de système :	55
3.6. Conclusion :	55

LISTE DES ILLUSTRATIONS GRAPHIQUES

Figure 1.1: L'effet photoélectrique	4
Figure 1.2: cellule photovoltaïque (PV).....	5
Figure 1.3: (a) Un monocristal à deux dimensions, (b) Une coupe d'un polycristal suivant plan, (c) Cristaux d'un polycristal séparés par les joints de grains	6
Figure 1.4: Caractéristiques électriques d'un module photovoltaïque.....	8
Figure 1.5: Signal PWM.....	9
Figure 1.6 : Schéma du convertisseur Buck	10
Figure 1.7: circuit de convertisseur buck lorsque s1 est fermé.....	11
Figure 1.8: circuit du convertisseur buck lorsque s1 est ouvert et FD est fermé.....	13
Figure 1.9: Schéma du convertisseur Boost.....	14
Figure 1.10: circuit de convertisseur boost lorsque s1 est fermé.....	15
Figure 1.11: circuit de convertisseur boost lorsque s1 est ouvert.....	16
Figure 2.1: Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge	18
Figure 2. 2: Schéma de principe de la méthode P&O	19
Figure 2. 3: Organigramme de la méthode P&O.....	20
Figure 2. 4: Schéma bloc de l'algorithme à base de la logique floue.....	21
Figure 2. 5 : variable d'entrée E.....	22
Figure 2. 6 : Variable d'entrée CE	22
Figure 2. 7 : Variable de sortie D.....	23
Figure 2. 8: la technique MPPT basée sur le contrôleur flou	24
Figure 2. 9: Influence de l'irradiation sur la courbe caractéristiques $P=f(V)$	25
Figure 2. 10: Influence de l'irradiation sur la courbe caractéristiques $I=f(V)$	26
Figure 2. 11: L'éclairement appliqué au panneau	26
Figure 2. 12 : puissance maximale	27
Figure 2.13:circuit de p&o dans Simulink Matlab	27
Figure 2. 14: Superposition de la puissance idéale avec la puissance de la sortie du panneau.....	28
Figure 2. 15: Superposition de la puissance idéale avec la puissance de la sortie de l'hacheur.....	28
Figure 2. 16: circuit de logique flou dans Simulink Matlab.....	29
Figure 2. 17: Superposition de la puissance idéale avec la puissance de la sortie du panneau.....	29
Figure 2. 18: Superposition de la puissance idéale avec la puissance de la sortie du hacheur.....	30
Figure 2. 19: Superposition de la puissance de sortie du Panneau algorithme p&o avec la puissance de la sortie du Panneau algorithme logique flou.....	30
Figure 2. 20: Superposition de la puissance de sortie de l'hacheur algorithme p&o avec la puissance du hacheur algorithme logique flou	31
Figure 3. 1: Schéma général du contrôleur de charge solaire MPPT	34
Figure 3. 2: convertisseur Buck XL4015E	36
Figure 3. 3: carte développement D1 R32(esp32)	37
Figure 3. 4: PINOUT (ESP32 D1 R32).....	38
Figure 3. 5: Circuit d'application typique XL4015E	39
Figure 3. 6 : convertisseur dc-dc (XL4015) fixe.....	40
Figure 3. 7 : convertisseur (XL4015E) variable	41
Figure 3. 8: Relation entre la tension de sortie et la tension de feedback du XL4015E	41
Figure 3. 9 : Pin configuration d'un LM324.....	42
Figure 3. 10 : le circuit de PWM.....	43
Figure 3. 11: circuit de capteur de tension (PV).....	45

Figure 3. 12: circuit du capteur de courant (PV).	46
Figure 3. 13 : circuit d'adaptation	46
Figure 3. 14 : schéma électrique du système.....	47
Figure 3. 15: circuit global de système MPPT	47
Figure 3. 16: la charge du système.....	48
Figure 3. 17 : Tension du panneau solaire en fonction du temps (p&o).....	49
Figure 3. 18 : Courant du panneau solaire en fonction du temps (p&o)	49
Figure 3. 19 : puissance du panneau solaire on fonction du temps (p&o).....	50
Figure 3. 20 : rapport cyclique de L'algorithme (p&o).....	50
Figure 3. 21 : Tension du panneau solaire en fonction du temps (logique flou)	51
Figure 3. 22 : Courant du panneau solaire en fonction du temps (logique flou)	51
Figure 3. 23 : puissance du panneau solaire on fonction du temps (logique flou)	52
Figure 3. 24 : rapport cyclique de L'algorithme (logique flou)	52
Figure 3. 25 : Comparaison de la puissance de sortie du Panneau algorithme p&o avec la puissance de la sortie du Panneau algorithme logique flou.....	53
Figure 3. 26 : Comparaison du rapport cyclique dans les 2 algorithmes p&o et logique flou	53

LISTE DES ILLUSTRATIONS TABLEAUX :

Tableau 1. 1 : Points forts et faibles des Silicium monocristallin et poly cristallin	6
Tableau 2. 1: Matrice d'inférence.....	23
Tableau 2. 2: caractéristiques de panneau.....	25
Tableau 3. 1 : Critère de performance des contrôleurs MPPT : le rendement.....	55

LISTE DES SYMBOLES :

c	La célérité de la lumière
d	L'épaisseur traversée
D	rapport cyclique
DC-DC	Direct Current to Direct Current
E	l'éclairement
Einc	L'intensité lumineuse incidente
FF	facteur de forme
GPV	générateur photovoltaïque
h	Constante de Plank
IMPP	Courant au Point de Puissance Maximale
I _{pv}	Courant de panneau solaire
MPPT	Maximum Power Point Tracking
P _{max}	La puissance maximale
P _{pv}	Puissance de panneau solaire
PWM	Pulse Width Modulation
S	la surface active de la cellule
U _v	la tension à vide
V _{co}	La tension en circuit ouvert
VMPP	Tension au Point de Puissance Maximale
V _{pv}	Tension de panneau solaire
α	Le coefficient d'absorption
λ	La longueur d'onde du photon
η	Le rendement

INTRODUCTION

L'industrie moderne a des besoins croissants en énergie, ce qui pousse à privilégier les énergies renouvelables. En effet, la hausse du prix du pétrole a incité les pays développés à investir dans des sources d'énergie telles que le solaire, l'éolien, le marémoteur ou le géothermique. Ces énergies, en plus d'être inépuisables, contribuent au développement durable et à la préservation de l'environnement.

L'énergie solaire est particulièrement élégante comme source d'énergie renouvelable. Silencieuse et intégrable aux constructions, elle ne nécessite pas d'entretien spécifique grâce à l'absence de pièces mobiles, ce qui en fait une référence pour les applications spatiales et les sites isolés. Devenue plus abordable, elle est également de plus en plus utilisée pour les applications à petite et moyenne consommation d'énergie. Cependant, les panneaux solaires, malgré leurs progrès, restent relativement peu efficaces (environ 20% de rendement). Il est donc essentiel d'exploiter au maximum la puissance qu'ils peuvent produire en minimisant les pertes d'énergie. Pour cela, il faut suivre le "Maximum Power Point" (MPP), le point de fonctionnement optimal qui varie en fonction des conditions météorologiques et de la charge. Cela nécessite un dispositif de suivi du (MPP).

Il existe plusieurs méthodes de MPPT, de la plus simple à la plus complexe. Nous nous intéressons ici à deux d'entre elles : la méthode Perturbation et Observation (P&O), bien connue dans le domaine, et la méthode utilisant la logique floue. La difficulté actuelle réside dans la détermination des performances exactes de ces nouvelles techniques de commande et le choix optimal à effectuer. Plusieurs questions se posent en relation avec notre problématique, notamment :

- Quel impact l'intégration de la logique floue a-t-elle sur l'efficacité globale de la production d'énergie dans les systèmes photovoltaïques ?
- Quelles sont les conditions nécessaires pour appliquer efficacement cette approche dans un système photovoltaïque ?

Ce projet vise à implémenter ces deux méthodes MPPT sur le microcontrôleur ESP32. Il comprend plusieurs étapes, de la simulation temporelle à la programmation en langage C, en passant par la conception du système et du circuit d'adaptation, jusqu'au chargement du programme sur l'ESP32.

Ce mémoire a été divisé en trois chapitres. Le premier chapitre est une introduction à l'énergie photovoltaïque, ont expliqué brièvement les différents composants d'un système photovoltaïque le champ de modules photovoltaïques, le convertisseur continu-continu. Le second chapitre, après avoir introduit la théorie ont expliqué le principe des deux méthodes MPPT qui nous intéressent (P&O et floue). Dans le troisième chapitre, on aborde la transition vers la mise en œuvre pratique des algorithmes MPPT étudiés.

CHAPITRE 1

1.LE SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

1.1. Introduction

L'énergie solaire est une ressource abondante et renouvelable, principalement utilisée pour produire de l'électricité via des générateurs photovoltaïques (GPV). Ces générateurs convertissent directement la lumière du soleil en énergie électrique grâce aux cellules photovoltaïques.

Pour optimiser le fonctionnement des GPV, il est crucial de tracer les caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) des cellules photovoltaïques, ce qui nécessite une modélisation mathématique précise. Les conditions climatiques, comme l'ensoleillement et la température, ont une influence significative sur le comportement des cellules PV, et leur étude est essentielle pour améliorer l'efficacité des générateurs.

1.2. Le générateur PV

1.2.1. L'effet photoélectrique :

L'effet photoélectrique est à la base de l'effet photovoltaïque, découvert par Antoine Becquerel et son fils en 1839. Il fut expliqué pour la première fois par Einstein en 1905 grâce à la théorie des quanta de lumière, qui avait été d'abord proposée par Planck en 1900. Il a reçu une application industrielle à partir de 1954 avec les panneaux solaires, offrant un rendement de 6 %.

Le rayonnement solaire est un rayonnement électromagnétique : $E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$

h est la constante de Plank ($6,62 \cdot 10^{-34}$ J.s), c la célérité de la lumière ($3 \cdot 10^8$ m.s⁻¹) et λ la longueur d'onde du photon (m).

Le spectre lumineux est composé d'une gamme de longueurs d'ondes. Lorsqu'il entre en contact avec la surface du panneau, une partie de la lumière est transmise, une autre réfléchiée et une autre absorbée.

La partie qui nous intéresse le plus dans le panneau photovoltaïque est l'absorption celle où l'énergie lumineuse est convertie en électricité, car c'est par ce processus que la conversion s'effectue

La lumière est absorbée par le matériau suivant la loi de Beer-Lambert :

$$E = E_{inc} \cdot e^{(-ad)} \quad (1.1)$$

E_{inc} représente l'intensité lumineuse incidente ($W m^{-2}$), α le coefficient d'absorption (cm^{-1}) et d l'épaisseur traversée (cm). Le coefficient d'absorption dépend du matériau et de la longueur d'onde de l'énergie incidente.

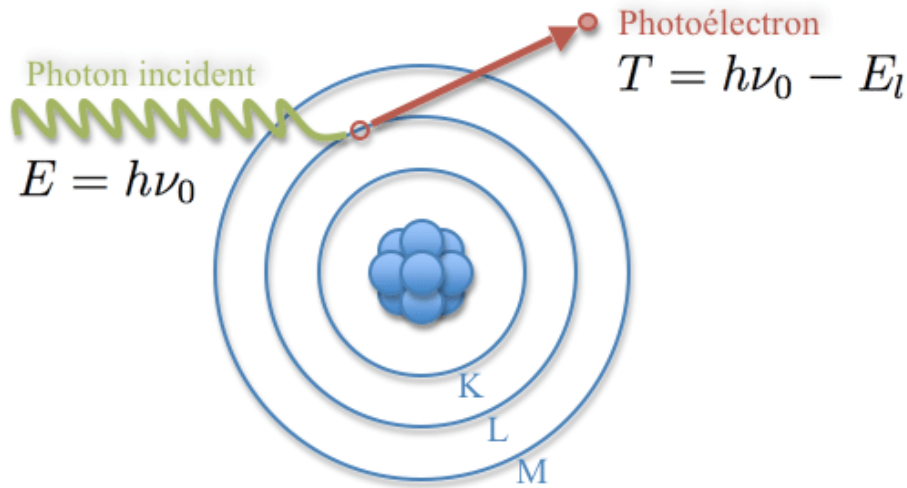


Figure 1.1: L'effet photoélectrique

1.2.2. Les processus impliqués dans la conversion photovoltaïque :

Les photons ayant une énergie supérieure au gap énergétique de notre cellule photovoltaïque (PV) incident sur le panneau cèdent leur énergie aux derniers électrons de la couche de valence afin de créer des paires électron-trou. Toutefois, cela ne suffit pas car ces derniers peuvent se recombiner naturellement. Pour augmenter le temps de vie de ces porteurs de charges, la cellule est conçue sous forme de jonction constituée de deux régions, P et N, juxtaposées. La différence de concentration entre les porteurs de charges crée un courant de diffusion. Les trous de la région P diffusent vers la région N, laissant derrière eux des atomes ionisés, qui constituent autant de charges négatives fixes. Il en est de même pour les électrons de la région N qui diffusent vers la région P, laissant derrière eux des charges positives. Au niveau de la jonction, il apparaît aussi une zone contenant des charges fixes positives et négatives. Ces charges créent une différence de potentiel donc un champ électrique E . La hauteur de la barrière de potentiel, et donc l'intensité du champ électrique, sont diminuées par la polarisation directe de la jonction, qui permet le passage de porteurs. Une polarisation inverse augmentera la hauteur de la barrière. Les types de barrières les plus courantes sont l'homojonction (une jonction p-n dans le même semi-conducteur), l'hétérojonction (une jonction p-n entre deux matériaux semi-conducteurs différents) et la barrière Schottky (un contact entre un métal et un semi-conducteur).

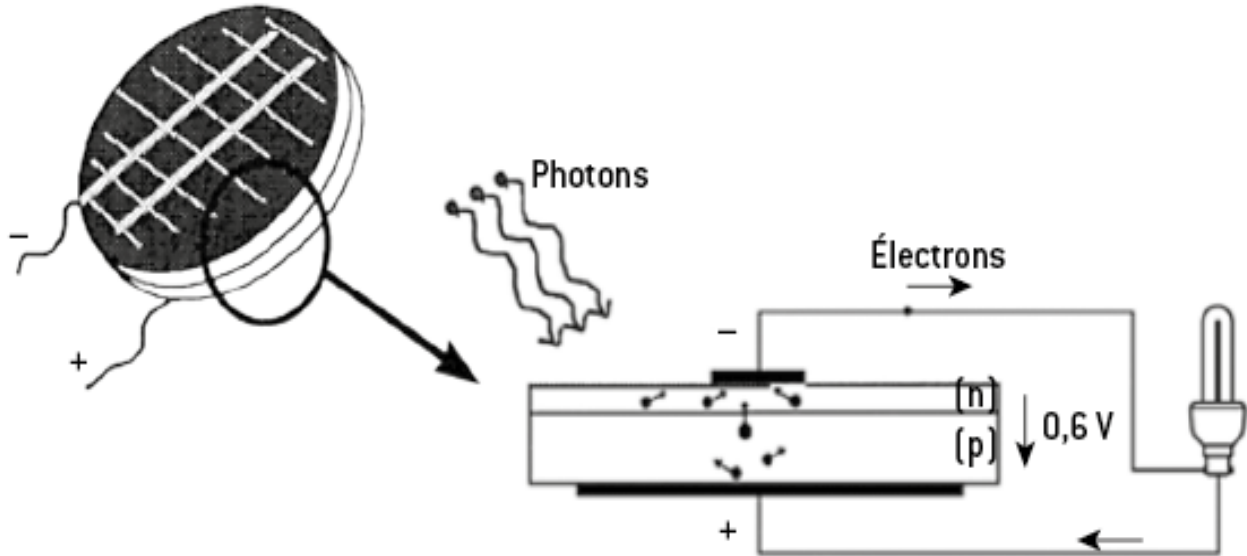


Figure 1.2: cellule photovoltaïque (PV)

1.2.3. Technologies des cellules PV :

Aujourd'hui, il existe trois générations de panneaux photovoltaïques, chacune avec une grande variété d'architectures :

Première génération (80% des panneaux sur le marché) :

Une seule jonction à base de Silicium monocristallin (16-23% de rendement) ou polycristallin (rendement 14-21%) durée de vie 25 ans

Technologies : ALBSF (Back surface field) tendance 2017, cellule solaire PERC tendance 2024, cellule solaire Top-con.

Une structure amorphe se caractérise par un ordre atomique à courte distance, alors qu'une structure cristalline présente un agencement ordonné des atomes sur de longues distances, doté d'une périodicité.

Pour produire le silicium de grade solaire 4N (degré de pureté), on commence par traiter du quartz (SiO_2) via un procédé carbothermique. Cependant, une fois obtenu, ce silicium ne peut pas être utilisé directement ; il nécessite une cristallisation il existe différentes méthodes pour réaliser ce processus. Ces méthodes déterminent si le résultat final sera un monocristal ou un polycristal

-la méthode HEM (Heat Exchanger Method) : efficace pour produire du silicium polycristallin (grains plus petits que 1 mm) et multicristallin (grains plus petits que 10 cm). Un polycristal et le multi se composent de plusieurs monocristaux, chacun ayant sa propre direction de croissance. On peut les reconnaître, si les grains sont suffisamment épais, car elles forment une mosaïque de macles

-la méthode de Czochralski : largement utilisée pour fabriquer du silicium monocristallin. Un monocristal est caractérisé par une unique direction de croissance. Une cellule monocristalline a un aspect uniforme, de couleur gris bleuté, ou noir

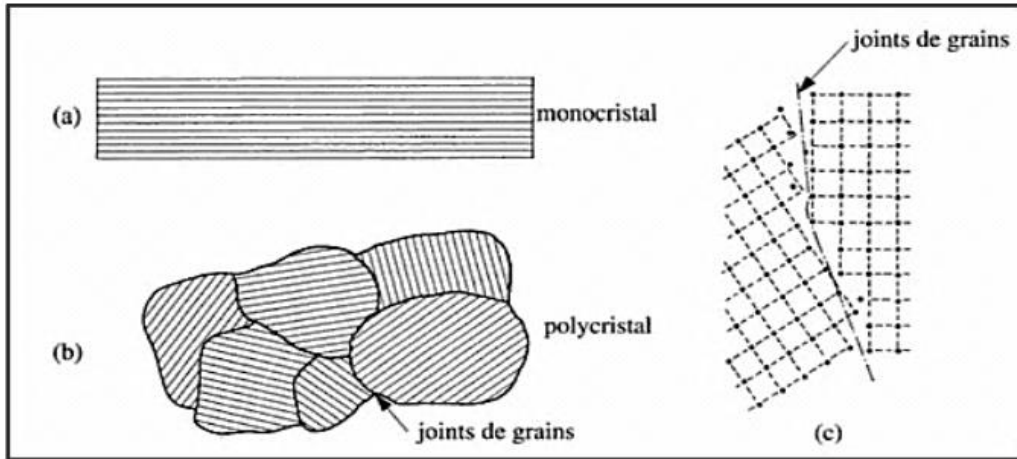


Figure 1.3: (a) Un monocristal à deux dimensions, (b) Une coupe d'un polycristal suivant plan, (c) Cristaux d'un polycristal séparés par les joints de grains

Tableau 1. 1: Points forts et faibles des Silicium monocristallin et poly cristallin

Points forts	Points faibles
<ul style="list-style-type: none"> -Abondance de silice, non-toxicité et stabilité -Puissances de sortie des panneaux PV plus élevées -Technologie mature (avantage du savoir-faire historique dans la microélectronique à base silicium) -Bonnes marges pour davantage réduire l'écart de Performance des cellules entre laboratoires (26,7% - 21,2%) et industrie (22% - 18%) 	<ul style="list-style-type: none"> -Structure gap Indirect (faible absorbeur) -Exige des substrats épais (~200 μm) ; Fragilité -Coûts élevés : Traitements thermiques avec hautes énergies : <ul style="list-style-type: none"> -Purification (2000 ° C) matériau SOG -Cristallisation DSS (1560 ° C) Lingot -Diffusion Thermique de dopants (850 ° C) Emetteur -Frittage contacts métalliques (780 ° C) Cellule -Diverses opérations et recuits (200 - 300° C) Equipements lourds & Procédés Complexes

Deuxième génération :

Cellules à couches minces (hétéro jonction): SC à base de Cuivre Indium Gallium Sélénium – CIGS : 24% industrialisé, Tellure de Cadmium – CdTe : Record Laboratoire : 22.1%, silicium amorphe hydrogéné

Avantages : -Le processus de fabrication peut transformer une feuille de verre en un module PV en moins de 2,5 heures.

- Coût moindre par Wc et facilité de fabrication
- peuvent être flexibles
- Les couches très minces utilisent une quantité réduite de matière
- Le bilan thermique n'est pas très élevé

-la possibilité d'obtenir des cellules semi-transparentes

Inconvénients : - CdTe : Cadmium (très toxique) et Le Tellure est un métal très rare

- indium et gallium onéreux (indisponible) Ils ont tenté de le substituer par du zinc et de l'étain, mais cela a réduit le rendement à 11 %.

Troisième génération :

DSSC 11.9%, Organics pv 18,2%, Quantum dot pv 18,1%, Perovskite : 23.7% Record Laboratoire : 28 %.

Perovskites : minéral avec une structure cristalline ABX_3 . A et B deux cations X anion

Inconvénients : instable La durabilité (la longévité) des cellules à base de pérovskite reste une préoccupation majeure

- Si elles parviennent à être commercialisées, les cellules solaires à base de pérovskite, qui sont à la fois économiques et simples à fabriquer, pourraient prendre une position importante sur le marché

1.2.4. Caractéristiques électriques d'un générateur photovoltaïque :

Un panneau photovoltaïque se caractérise par les paramètres suivants :

a. La tension en circuit ouvert (V_{co}) :

- V_{co} représente la tension mesurée aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge.

b. Le courant de court-circuit (I_{cc}) :

- I_{cc} correspond à la valeur du courant lorsque la cellule est en condition de court-circuit.

c. La puissance maximale (P_{max}) :

- La puissance maximale P_{max} délivrée par une cellule photovoltaïque correspond au produit maximal de la tension et du courant délivrés par la cellule. Cette puissance maximale est déterminée dans des conditions standards, avec un ensoleillement de 1000 W/m^2 et une température de 25°C .

d. Le rendement :

- Le rendement énergétique (η) est donné par l'expression suivante :

$$\eta = \frac{P_{max}}{E \times S} \quad (1.2)$$

Où :

- E est l'éclairement (W/m^2),
- S est la surface active de la cellule (m^2),

- Pmax est la puissance maximale.

e. Le facteur de forme :

- Le facteur de forme (FF) est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \times V_{co}} \tag{1.3}$$

Où :

- Icc est le courant de court-circuit,
- Vco la tension en circuit ouvert,
- Pmax est la puissance maximale.

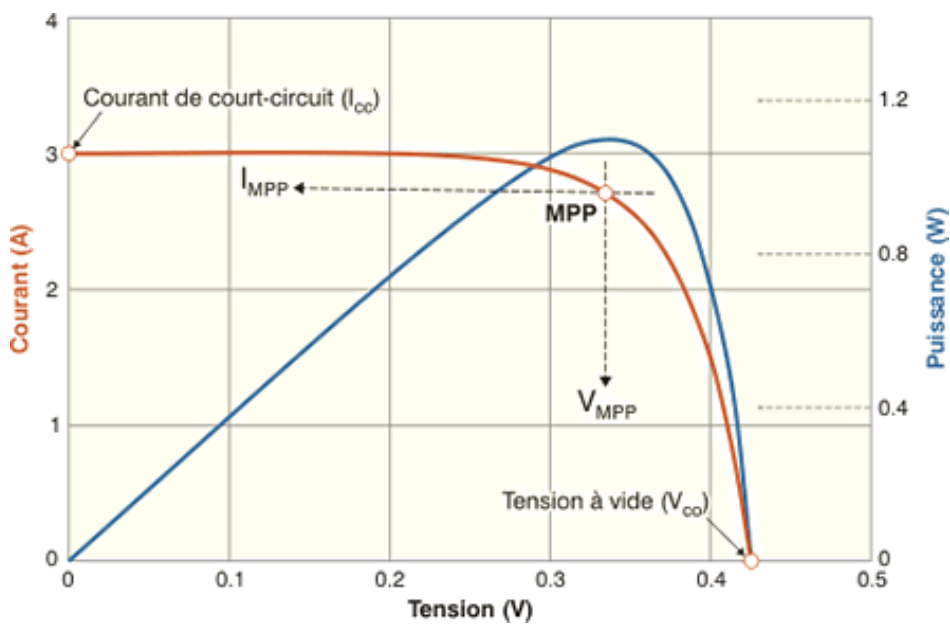


Figure1. 4: Caractéristiques électriques d'un module photovoltaïque

1.3. Le convertisseur continu-continu (hacheur) :

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques continu-continu permettant de générer une source de tension continue variable à partir d'une source de tension continue fixe. Ils se composent de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance dans le cas idéal, c'est pour cette raison que les hacheurs ont de bons rendements [1].

1.3.1 Principe du MLI (PWM) [2]:

Dans les convertisseurs DC-DC, il est essentiel de maintenir la tension de sortie constante, même lorsque la tension d'alimentation (V) et les caractéristiques de la charge varient. Une méthode courante pour réguler cette tension consiste à ajuster en permanence le rapport cyclique de commande de l'interrupteur (α). Ce rapport cyclique est comparé à une tension en dents de scie pour générer le signal de commande de l'interrupteur S :

- Lorsque le rapport cyclique (α) est supérieur à la tension de comparaison (V_{cc}) : $S = 1$, ce qui commande la fermeture de l'interrupteur S (état ON).
- Lorsque le rapport cyclique (α) est inférieur à la tension de comparaison (V_{cc}) : $S = 0$, ce qui commande l'ouverture de l'interrupteur S (état OFF).

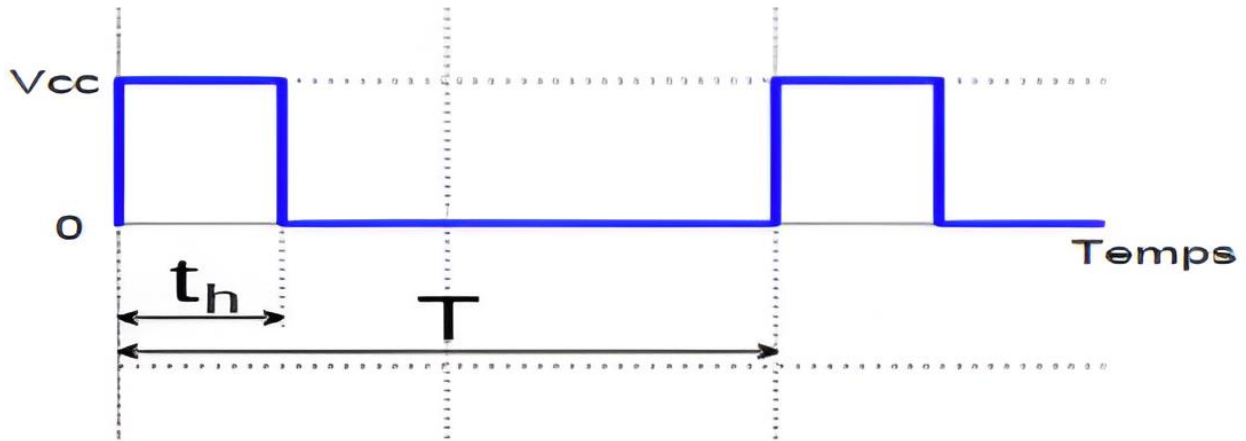


Figure 1.5: Signal PWM.

1.3.2 Les types des convertisseurs DC-DC :

Il existe plusieurs types de topologies de convertisseurs DC-DC, qui sont classées en deux catégories principales : isolées et non isolées. Les topologies isolées utilisent généralement un transformateur fonctionnant à haute fréquence et sont largement utilisées dans les alimentations à découpage. Parmi les topologies isolées les plus couramment utilisées dans de nombreuses applications, on trouve le flyback, le demi-pont et le pont complet. Dans les applications photovoltaïques, notamment celles qui impliquent le couplage avec le réseau électrique, ces types de topologies sont souvent privilégiés lorsque l'isolation électrique est nécessaire pour des raisons de sécurité [1].

Les topologies non isolées, qui ne comportent pas de transformateurs d'isolement, sont généralement utilisées dans l'entraînement des moteurs à courant continu et comprennent les abaisseurs (Buck), les élévateurs (Boost) et les élévateurs-abaisseurs (Buck-Boost).

La topologie Buck est couramment utilisée pour les tensions faibles. Dans le domaine des applications photovoltaïques, le convertisseur Buck est souvent utilisé comme chargeur de batteries et dans les systèmes de pompage d'eau.

La topologie Boost est employée pour augmenter la tension. Dans les systèmes de production d'énergie, un convertisseur Boost est utilisé pour augmenter la tension de sortie au niveau requis, notamment à l'étage de l'onduleur.

Ensuite, il existe des topologies capables d'augmenter et de diminuer la tension, telles que le Buck-Boost, le Cuk et le Sepic.

1.3.3 Convertisseur Buck :

Le convertisseur Buck, aussi appelé convertisseur abaisseur de tension, joue un rôle crucial en réduisant une tension d'entrée plus élevée en une tension de sortie plus basse. Son importance s'étend à une multitude d'applications, des dispositifs portables aux systèmes automobiles, là où des composants ou sous-systèmes requièrent une tension inférieure pour leur fonctionnement [3].

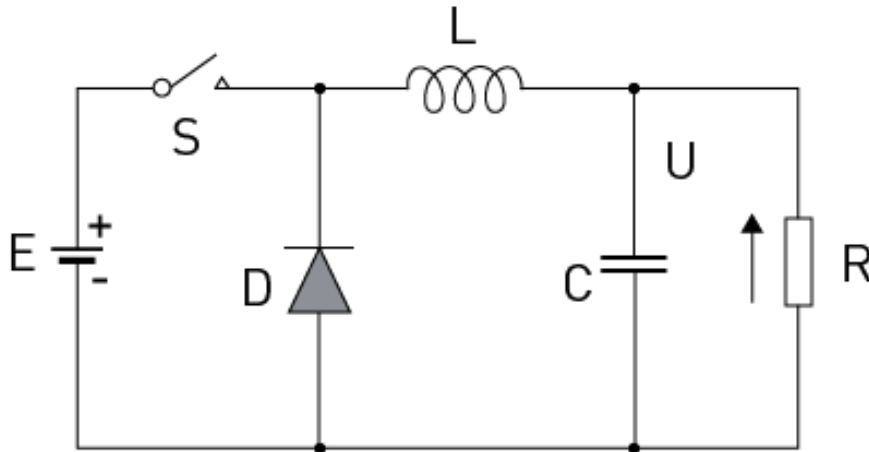


Figure 1.6 : Schéma du convertisseur Buck

Dans ce schéma, la tension d'entrée est reliée à un dispositif à semi-conducteurs contrôlable, agissant comme un interrupteur. Ce dispositif est représenté par un MOSFET de puissance. Une autre composante utilisée dans le circuit est une diode de roue libre (F). Ces éléments, l'interrupteur et la diode F, sont connectés à un filtre passe-bas LC. Cette configuration vise à atténuer les fluctuations de courant et de tension, assurant ainsi la production d'une sortie c.c. régulée.

L'interrupteur contrôlé est manipulé grâce à une modulation de largeur d'impulsion (PWM), qui permet de l'activer et de le désactiver. Cette modulation peut être basée soit sur le temps, soit sur la fréquence. La modulation basée sur le temps est privilégiée pour les convertisseurs buck en raison de sa simplicité de mise en œuvre et d'utilisation. Dans ce type de modulation PWM, la fréquence reste constante [4].

Principe de fonctionnement :

- **Mode I: Switch S1 is ON and Diode FD is OFF:**

Dans ce mode de fonctionnement, l'interrupteur $S1$ est en position fermée (ON), tandis que la diode FD est en position ouverte (OFF), ce qui signifie qu'elle ne conduit pas. Ainsi, le courant circule à travers l'interrupteur $S1$.

Lorsqu'une tension continue constante est appliquée à l'entrée du circuit, le courant circule à travers l'interrupteur fermé $S1$, tandis que la diode FD est en polarisation inverse, bloquant le courant. Ce flux de courant dans le circuit entraîne le stockage d'énergie dans l'inducteur L sous forme de champ magnétique.

Le condensateur, connecté selon le schéma du circuit, est également traversé par ce courant, ce qui lui permet de stocker la charge. La tension aux bornes du condensateur, qui est égale à la tension de sortie V_o , apparaît alors aux bornes de la charge.

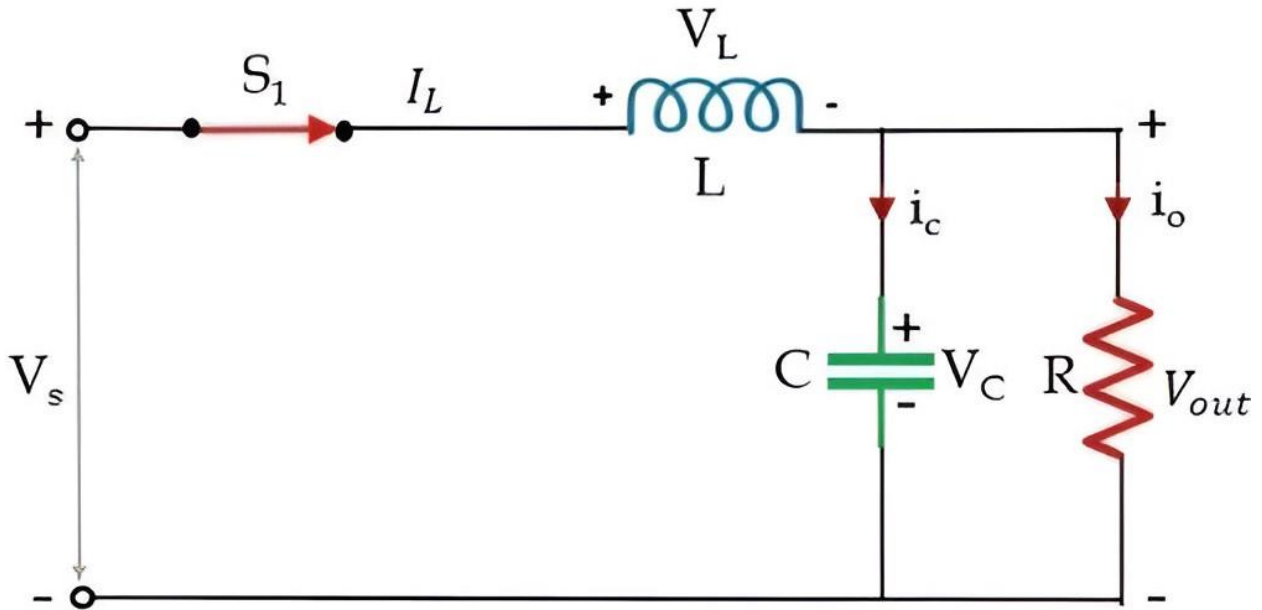


Figure 1.7: circuit de convertisseur buck lorsque s_1 est fermé

Supposons que l'interrupteur S_1 soit activé pendant une période T_{on} et désactivé pendant une période T_{off} . La durée totale T est ainsi définie comme la somme de T_{on} et de T_{off} .

$$T = T_{on} + T_{off} \quad (1.4)$$

La fréquence de commutation est alors donnée par :

$$f_{commutation} = \frac{1}{T} \quad (1.5)$$

Et le rapport cyclique est donné par :

$$D = \frac{T_{on}}{T} \quad (1.6)$$

En appliquant le KVL dans le circuit ci-dessus, nous obtenons :

$$V_s = V_L + V_{out} \quad (1.7)$$

$$V_L = V_s - V_{out} \quad (1.8)$$

Nous avons également :

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (1.9)$$

$$Vl = L \frac{Dil}{dt} = Vs - Vout \quad (1.10)$$

$$\frac{Dil}{dt} = \frac{Vs - Vout}{L} \quad (1.11)$$

Puisque l'interrupteur S1 est en position fermée pour un temps :

$$\frac{\Delta il}{\Delta t} = \frac{Vs - Vout}{L} \quad (1.12)$$

$$\frac{\Delta iL}{TT} = \frac{Vs - Vout}{L} \quad (1.13)$$

$$\Delta il = \left(\frac{Vs - Vout}{L} \right) DT \quad (1.14)$$

Ensuit :

$$\frac{\Delta il}{\Delta t} = \frac{Vs - Vout}{L} \quad (1.15)$$

$$\frac{\Delta iL}{DT} = \frac{Vs - Vout}{L} \quad (1.16)$$

$$\Delta il = \left(\frac{Vs - Vout}{L} \right) DT \quad (1.17)$$

Cette équation décrit la fluctuation du courant dans le circuit lorsque l'interrupteur S1 est en position fermée.

- **Mode II: Switch S1 is OFF and Diode FD is ON:**

Dans ce mode de fonctionnement, l'interrupteur S1 est ouvert (OFF), tandis que la diode FD est fermée (ON), permettant ainsi au courant de circuler. L'inducteur stocke l'énergie sous forme de champ magnétique.

Lorsque S1 est ouvert, l'inducteur agit comme une source et libère l'énergie stockée précédemment lorsque S1 était fermé. La diode FD devient alors fermée pour permettre au courant de circuler dans le circuit à travers elle.

Ce flux de courant continue jusqu'à ce que toute l'énergie stockée dans l'inducteur soit dissipée. Lorsque l'inducteur est complètement déchargé, la polarité s'inverse et la diode FD se polarise en sens inverse, laissant ainsi le courant cesse de circuler.

À ce moment, l'interrupteur S1 se referme instantanément, amorçant un nouveau cycle.

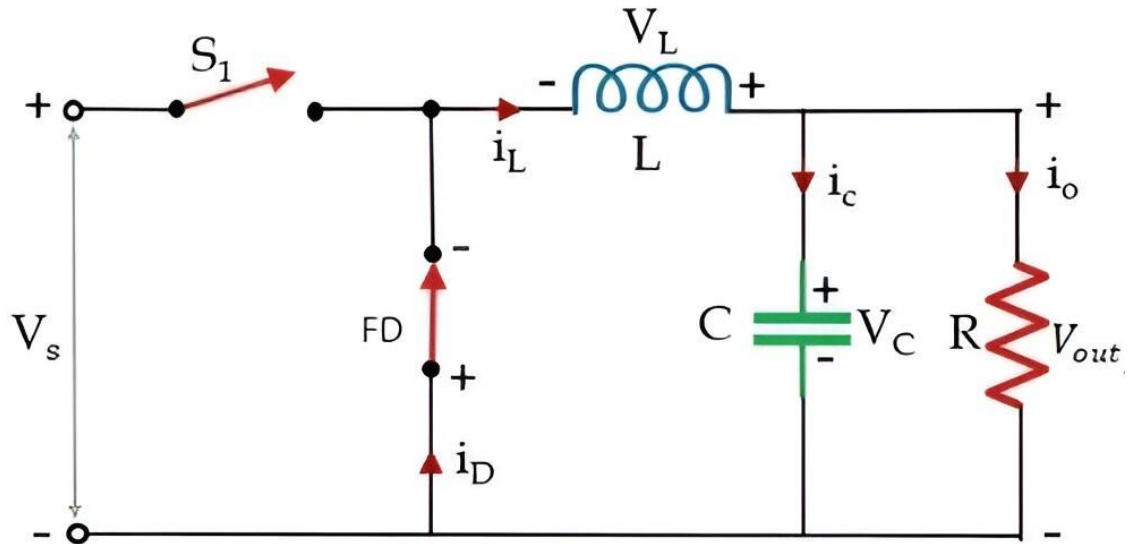


Figure 1.8: circuit du convertisseur Buck lorsque s1 est ouvert et FD est fermé

En appliquant la loi des mailles de Kirchhoff au circuit présenté, en conservant la convention de signe original pour analyser le circuit, nous obtenons :

$$Vl + Vout = 0 \quad (1.20)$$

$$Vl = -Vout \quad (1.21)$$

Nous avons également :

$$Vl = L \frac{Dil}{DY} \quad (1.22)$$

$$Vl = L \frac{Dil}{dt} = -Vout \quad (1.23)$$

D'après ce qui précède, on sait que : $T = Ton + Toff$:

$$T = DT + Toff \quad (1.24)$$

$$T - DT = Toff \quad (1.25)$$

$$(1 - D)T = Toff \quad (1.26)$$

$$Toff = (1 - D)T \quad (1.27)$$

$$Toff = \Delta t = (1 - D)T \quad (1.28)$$

Maintenant, à partir de l'équation ci-dessus :

$$Vl = L \frac{Dil}{dt} = -Vout \quad (1.29)$$

$$L \frac{\Delta il}{(1-D)T} = -Vout \quad (1.30)$$

$$\Delta i_l = -\frac{V_{out}}{L}(1 - D)T \quad (1.31)$$

Cette équation donne le taux de variation du courant à travers l'inducteur lorsque l'interrupteur S1 est à l'état OFF, c'est-à-dire en mode II.

Puisque la variation nette du courant à travers l'inducteur au cours d'un cycle complet est nulle, c'est-à-dire que la somme des taux de variation du courant en mode I et en mode II devient nulle.

$$\Delta i_l(mode1) + \Delta i_l(mode2) = 0 \quad (1.32)$$

$$\left[\Delta i_l = \left(\frac{V_s - V_{out}}{L} \right) DT \right] + \left[\Delta i_l = -\frac{V_{out}}{L}(1 - D)T \right] = 0 \quad (1.33)$$

En simplifiant, on obtient :

$$\frac{V_{out}}{V_s} = D \quad (1.34)$$

Pour des valeurs de rapport cyclique D comprises entre 0 et 1, la tension de sortie est toujours inférieure à la tension d'entrée dans le convertisseur buck. Cela signifie que le convertisseur buck abaisse effectivement la tension d'entrée.

1.3.4 Convertisseur Boost :

Les convertisseurs Boost sont des dispositifs de conversion DC-DC à commutation conçus pour augmenter efficacement la tension d'entrée vers une tension de sortie supérieure.

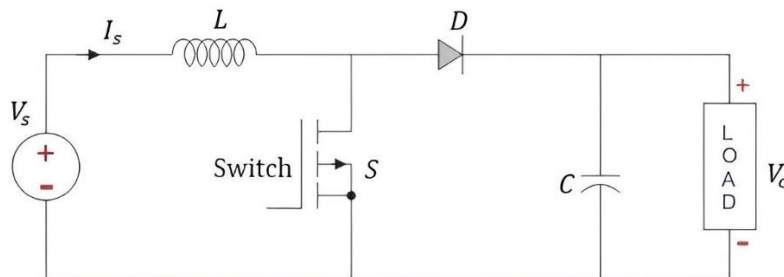


Figure 1.9: Schéma du convertisseur Boost

Ce circuit comprend un dispositif à semi-conducteurs tel qu'un MOSFET de puissance, fonctionnant comme un interrupteur et connecté à la source. Une diode agit comme un second interrupteur, connectée au condensateur et à la charge. Le condensateur et la charge sont en parallèle. L'inducteur est en série avec la source de tension d'alimentation, assurant un courant d'entrée constant. Ainsi, le convertisseur Boost fonctionne comme une source de courant d'entrée constante tandis que les charges agissent comme une source de tension constante [5].

Principe de fonctionnement :

- **Mode I: Switch S is ON and Diode D is OFF:**

Dans ce mode de fonctionnement, l'interrupteur S est en position fermée (ON), tandis que la diode D est en position ouverte (OFF), empêchant ainsi le passage du courant. Tout le courant circule à travers le chemin fermé constitué de l'inducteur L, de l'interrupteur S et retourne à la source d'entrée en courant continu.

La polarité de l'inducteur dépend de la direction du courant. En conséquence, la diode D est polarisée en inverse, bloquant le courant de circuler à travers elle vers le circuit. Dans cette configuration, la tension présente aux bornes de l'interrupteur S apparaît également aux bornes de la résistance de charge, ce qui correspond à la tension de sortie.

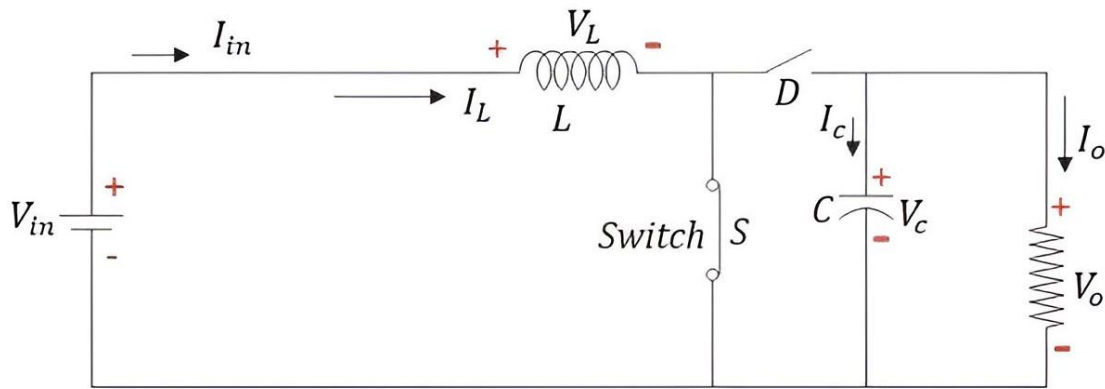


Figure 1.10: circuit de convertisseur boost lorsque s1 est fermé

Imaginons que l'interrupteur S soit activé pour une durée T_{on} et qu'il soit désactivé pendant une durée T_{off} . La période totale T est donc une association du temps T_{on} et du temps T_{off} .

$$T = T_{on} + T_{off} \tag{1.35}$$

Alors la fréquence de commutation est indiquée par :

$$f_{commutation} = \frac{1}{T} \tag{1.36}$$

Le rapport cyclique est indiqué par la formule suivante :

$$D = \frac{T_{on}}{T} \tag{1.37}$$

En appliquant la Loi de tension de Kirchhoff au circuit donné, on obtient :

$$V_{in} = V_L \tag{1.38}$$

Nous avons :

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} \tag{1.39}$$

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_{in} \tag{1.40}$$

$$\frac{di_l}{dt} = \frac{v_{in}}{L} \quad (1.41)$$

Donc :

$$\frac{di_l}{dt} = \frac{\Delta i_l}{\Delta t} = \frac{\Delta i_l}{DT} = \frac{v_{in}}{L} \quad (1.42)$$

Puisque l'interrupteur S est en position fermée pendant un temps $T_{on} = DT$, alors $\Delta t = DT$.

Dans ce cas,

$$\Delta i_l = \left(\frac{v_{in}}{L}\right) DT \quad (1.43)$$

La formule suivante donne la variation du courant dans le circuit lorsque l'interrupteur S est fermé.

- **Mode II: Switch S is OFF and Diode D is ON:**

Dans ce circuit, l'inducteur stocke l'énergie sous forme de champ magnétique et agit comme une source lorsque l'interrupteur S est ouvert, tandis que la diode D est fermée. Lorsque l'interrupteur S est ouvert, l'énergie stockée dans l'inducteur lors de la phase précédente est libérée. Cette libération d'énergie inverse la polarité de l'inducteur, permettant au courant de circuler à travers la diode D.

L'énergie libérée est ensuite dissipée dans la résistance de la charge, maintenant ainsi le flux de courant dans la même direction à travers la charge et augmentant la tension de sortie. Le courant dans l'inducteur diminue progressivement et finit par s'éteindre après un certain temps.

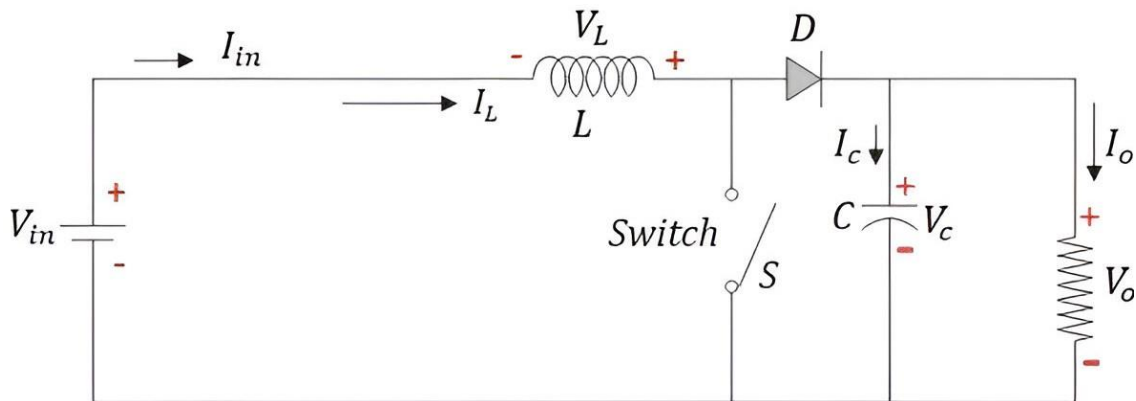


Figure 1.11: circuit de convertisseur boost lorsque s1 est ouvert

En appliquant la loi des mailles de Kirchhoff à ce circuit, en conservant la convention originale pour analyser le circuit, nous obtenons :

$$V_{in} - V_l - V_o = 0 \quad (1.44)$$

$$V_l = V_{in} - V_o \quad (1.45)$$

$$V_l = L \frac{di_l}{dt} \quad (1.46)$$

$$V_l = L \frac{di_l}{dt} = V_{in} - V_o \quad (1.47)$$

$$\frac{di_l}{dt} = \frac{V_{in}-V_0}{L} \quad (1.48)$$

On sait que, à partir de ce qui est indiqué précédemment, $T = T_{on} + T_{off}$ (1.49)

$$T = DT + T_{off} \quad (1.50)$$

$$T - DT = T_{off} \quad (1.51)$$

$$(1 - D)T = T_{off} \quad (1.52)$$

$$T_{off} = (1 - D)T \quad (1.53)$$

$$T_{off} = \Delta t = (1 - D)T \quad (1.54)$$

$$\frac{di_l}{dt} = \frac{\Delta i_l}{\Delta t} = \frac{\Delta i_l}{(1-D)t} = \frac{V_{in}-V_0}{L} \quad (1.55)$$

Puisque l'interrupteur S est en position ouvert, Dans ce cas on a :

$$\Delta i_l = \left(\frac{V_{in}-V_0}{L} \right) (1 - D)T \quad (1.56)$$

La variation du courant dans l'inducteur au cours d'un cycle complet étant nulle, la somme des taux de variation du courant en mode I et en mode II devient nulle.

$$\Delta i_l(mode1) + \Delta i_l(mode2) = 0 \quad (1.57)$$

$$\left(\frac{V_{in}}{L} \right) DT + \left(\frac{V_{in}-V_0}{L} \right) (1 - D)T \quad (1.58)$$

En simplifiant, on obtient :

$$\frac{V_0}{V_{in}} = \frac{1}{1-D} \quad (1.59)$$

Dans un convertisseur élévateur, le rapport cyclique D varie généralement entre 0 et 1. Dans cette plage de valeurs, la tension de sortie est toujours supérieure à la tension d'entrée.

1.3. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons exploré les processus impliqués dans la conversion photovoltaïque, en détaillant les technologies des cellules photovoltaïques (PV), leur fonctionnement, le phénomène photoélectrique et la modélisation des cellules. Nous avons également mis en lumière les principales propriétés d'un générateur photovoltaïque et les caractéristiques électriques associées. Ensuite, nous avons abordé les convertisseurs DC-DC, essentiels pour adapter l'énergie solaire aux exigences de charge. En parallèle, mettant en évidence son rôle crucial dans l'optimisation en temps réel du point de fonctionnement des panneaux solaires pour maximiser la puissance disponible. Ainsi, ce chapitre a offert une présentation approfondie des concepts de base des systèmes photovoltaïques, préparant le terrain pour les chapitres suivants qui se concentreront sur les aspects techniques et pratiques de l'optimisation de ces systèmes, notamment à travers l'application de techniques avancées de suivi du point de puissance maximale (MPPT).

CHAPITRE 2

2. Commandes MPPT par Perturbation et Observation et Logique Floue avec Simulation

2.1. Introduction :

La puissance fournie par un générateur photovoltaïque dépend fortement du niveau d'ensoleillement et de la température des cellules. Cette dépendance rend la puissance produite très imprévisible. La courbe caractéristique de puissance d'un GPV présente un point de puissance maximale (Maximum Power Point, MPP), qui correspond à un certain point de fonctionnement avec des coordonnées VMPP pour la tension et IMPP pour le courant. La position de ce MPP varie dans le temps en fonction du niveau d'ensoleillement et de la température des cellules.

Pour suivre ce point de puissance maximale, on utilise un suiveur de point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracker, MPPT). Ce dispositif permet au GPV de fonctionner à son MPP et ainsi de fournir en permanence la puissance maximale à la charge. Les premières utilisations des MPPT remontent à 1968, dans le cadre d'applications spatiales utilisant des panneaux photovoltaïques comme générateurs électriques. Le développement des MPPT a suscité un intérêt technique important, conduisant à l'élaboration de nombreuses procédures et techniques [6].

2.2. Principe De La Commandes MPPT :

Une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet à un générateur photovoltaïque (GPV) de fonctionner en produisant en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quelle que soit la condition météorologique (température et irradiation), la commande du convertisseur ajuste le système pour qu'il atteigne le point de fonctionnement optimal (VPPM et IPPM). Cela peut être illustré par le schéma de la Figure 2.1.

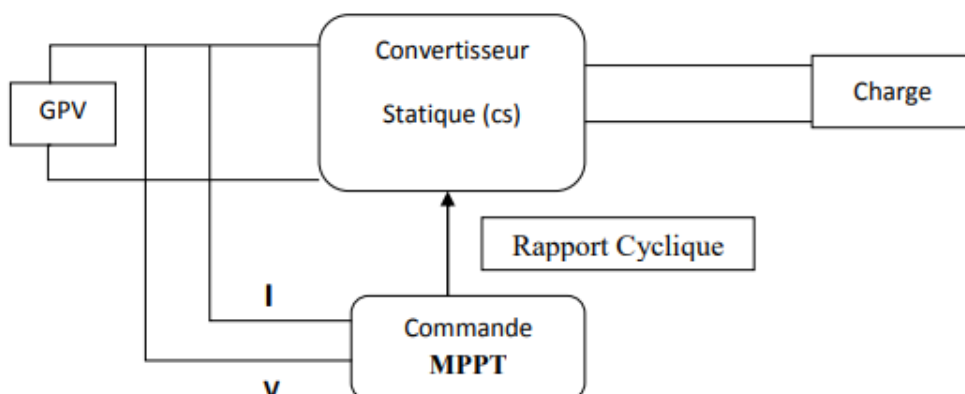


Figure 2.1: Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge

2.3. Les techniques MPPT :

Le point de puissance maximale (MPP) est le point sur une courbe tension-courant (I-V) où un dispositif solaire photovoltaïque génère la sortie la plus élevée, c'est-à-dire lorsque le produit de l'intensité de courant (I) et de la tension (V) est maximisé. Ce point peut varier en raison de facteurs externes tels que la température, les conditions d'éclairage et la qualité de fabrication. Pour garantir une puissance maximale (P_{max}) d'un système solaire PV en tenant compte de ces facteurs externes, des dispositifs de suivi du point de puissance maximale (MPPT) peuvent être utilisés pour ajuster la résistance du système.

Dans les ouvrages académiques et techniques, on trouve différents types d'algorithmes pour trouver le point de puissance maximale (PPM). Dans notre recherche, nous avons opté pour deux algorithmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) : l'algorithme Perturbation et Observation (P&O), largement utilisé pour sa facilité de mise en œuvre, et un algorithme basé sur la logique floue.

2.3.1. L'algorithme MPPT P&O (Perturb & Observe) :

L'algorithme implique de provoquer une perturbation de faible amplitude autour de la tension V_{pv} initiale, puis d'examiner comment cette variation affecte la puissance P_{pv} du panneau [7].

Comme illustré dans la figure 1, lorsque l'augmentation de la tension V_{pv} entraîne une augmentation de la puissance P_{pv} , le point de fonctionnement se situe à gauche du PPM. En revanche, si la puissance diminue, le point de fonctionnement se trouve à droite du PPM. Le même raisonnement s'applique lorsque la tension diminue. Ces analyses permettent de positionner facilement le point de fonctionnement par rapport au PPM en observant les variations de la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$, et ainsi de le faire converger vers le maximum de puissance en ajustant le courant de sortie du module PV [8].

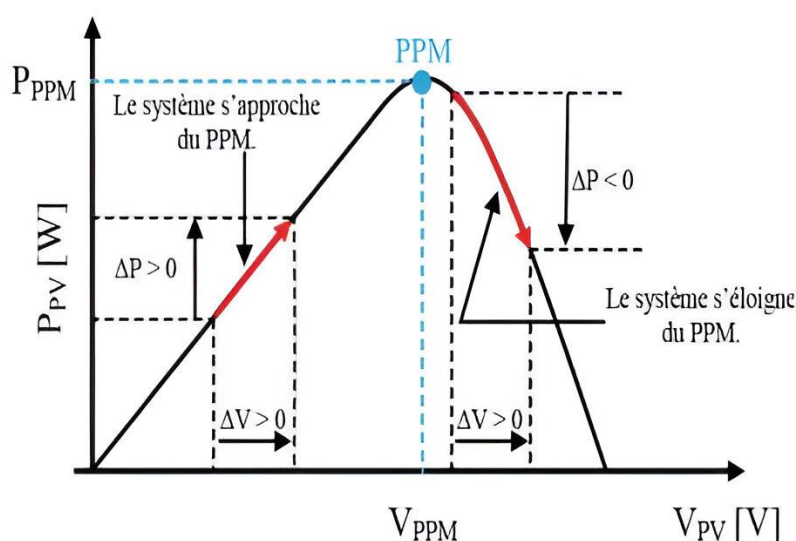


Figure 2. 2: Schéma de principe de la méthode P&O

Pour appréhender le fonctionnement de cette méthode, on commence par utiliser une commande avec un faible rapport cyclique. À chaque cycle, le paramètre α est ajusté de manière régulière et les valeurs de V_{pv} et I_{pv} sont mesurées pour calculer la puissance $P(K)$. Cette valeur est ensuite comparée à $P(K-1)$ calculée lors du cycle précédent. En fonction de cette comparaison, V_{pv} est ajustée dans la même direction que lors du cycle précédent ou dans la direction opposée. Ce processus permet à la puissance de passer par un maximum, puis de diminuer. Dès qu'une diminution de la puissance est détectée, le sens de la commande est à nouveau inversé. Ainsi, le système oscille autour du maximum de puissance.[9]

Cette oscillation permet au système de contrôle de s'assurer que le point de puissance maximale reste constant, et le cas échéant, de le suivre. Cependant, elle entraîne une perte de rendement qui augmente avec l'ampleur de la perturbation utilisée pour les ajustements, car le point de fonctionnement moyen se situe en dessous du maximum. Un pas d'incrémentation large permet à l'algorithme MPPT de réagir rapidement aux changements brusques des conditions de fonctionnement. Le rendement dynamique de cette technique est d'environ 85%.[9]

Dans la Figure 2.2 l'algorithme de la méthode P&O (Perturbation and Observation) est représenté. Cette figure illustre les étapes et les décisions prises par cet algorithme pour suivre et trouver le point de puissance maximale (PPM) d'un système photovoltaïque.

Habituellement, cette illustration comporte des blocs qui décrivent différentes étapes de l'algorithme. Cela inclut des actions telles que perturber la tension du panneau solaire, surveiller le changement de puissance de sortie, évaluer la puissance actuelle par rapport à la puissance précédente et effectuer des ajustements. L'illustration peut également comporter des flèches ou des lignes pour montrer l'ordre de déroulement de ces opérations.

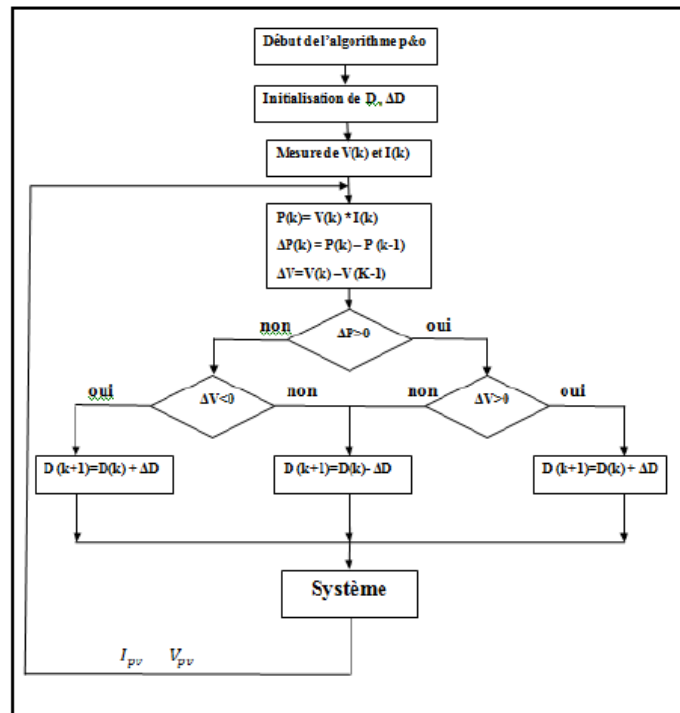


Figure 2. 3: Organigramme de la méthode P&O.

L'un des défauts majeurs de cette approche réside dans sa sensibilité aux changements rapides des conditions atmosphériques, tels que les passages nuageux suivis d'éclaircies. Dans de telles situations, le point de fonctionnement peut être incorrectement déplacé, entraînant des pertes de puissance potentiellement significatives. Ce mauvais ajustement persiste jusqu'à ce que les conditions environnementales se stabilisent, ce qui peut prendre un certain temps. De plus, pour que de nouvelles perturbations soient efficaces, il est nécessaire que le convertisseur statique fonctionne déjà de manière stable. Pour ces raisons, cette méthode est souvent considérée comme trop lente pour retrouver rapidement le nouveau point de fonctionnement optimal.

2.3.2. L'algorithme Logique floue (FLC) :

Cette commande est largement utilisée en raison des avancées dans les microcontrôleurs. Son principal avantage réside dans sa capacité à fonctionner même avec des valeurs d'entrée imprécises. La méthode de commande floue découle de la décomposition d'une plage de variation d'une variable réelle en variables linguistiques, avec l'assignation de fonctions d'appartenance à chaque variable. Cette approche s'avère efficace pour résoudre des problèmes d'optimisation, notamment pour atteindre le Point de Puissance Maximale (MPP). Elle repose sur l'observation en temps réel de deux critères d'entrée : tout d'abord, l'écart E par rapport à la valeur recherchée, où E peut être exprimé comme étant égal à zéro ; ensuite, la variation de l'erreur CE , qui indique le sens et la vitesse de convergence. Enfin, elle génère une variation de sortie D , qui contrôle le convertisseur statique pour atteindre le MPP [10].

Les deux variables d'entrée du contrôleur sont exprimées par les équations suivantes :

$$E(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)} \quad (2.1)$$

$$CE(k) = E(k) - E(k-1) \quad (2.2)$$

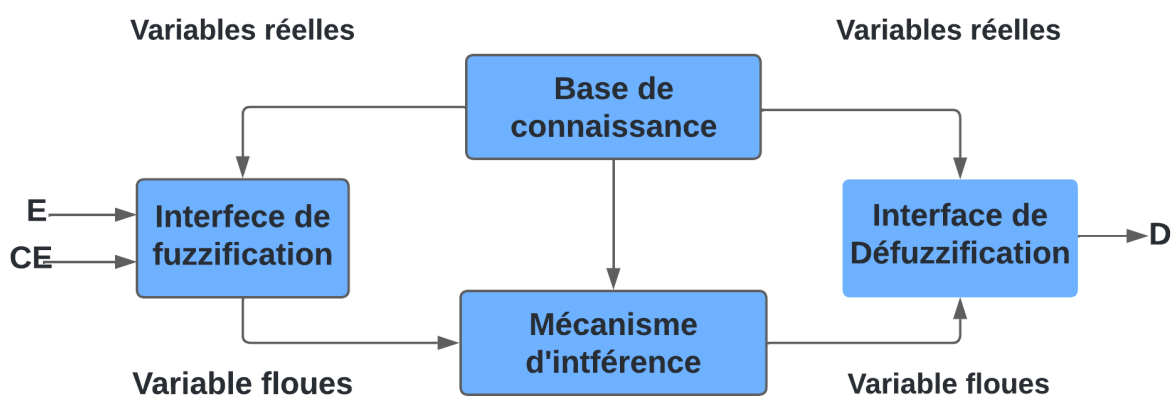


Figure 2. 4: Schéma bloc de l'algorithme à base de la logique floue.

-Structure d'une commande à logique floue :

La commande floue est largement adoptée dans l'application de la logique floue. Le contrôleur flou est principalement composé de quatre éléments : une étape de fuzzification, une base de règles, un processus d'inférence et une étape de défuzzification [11].

- La fuzzification :

La fuzzification implique de transformer des données numériques en variables linguistiques en utilisant des fonctions d'appartenance. Cela permet de traiter les informations de façon floue au sein d'un système flou.

Pour réaliser la fuzzification, il est nécessaire de spécifier :

- L'univers du discours.
- Une partition en classes floues de cet univers.
- Les fonctions d'appartenance associées à chacune de ces classes.

Exemple sur les fonctions d'appartenance :

Dans l'entrée E ont à :

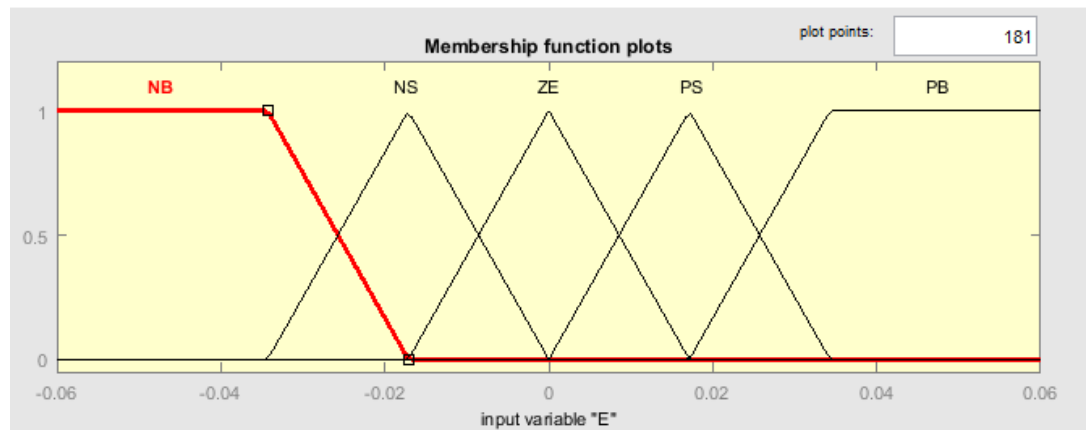


Figure 2. 5 : Variable d'entrée E

Ensuite l'entrée CE ont à :

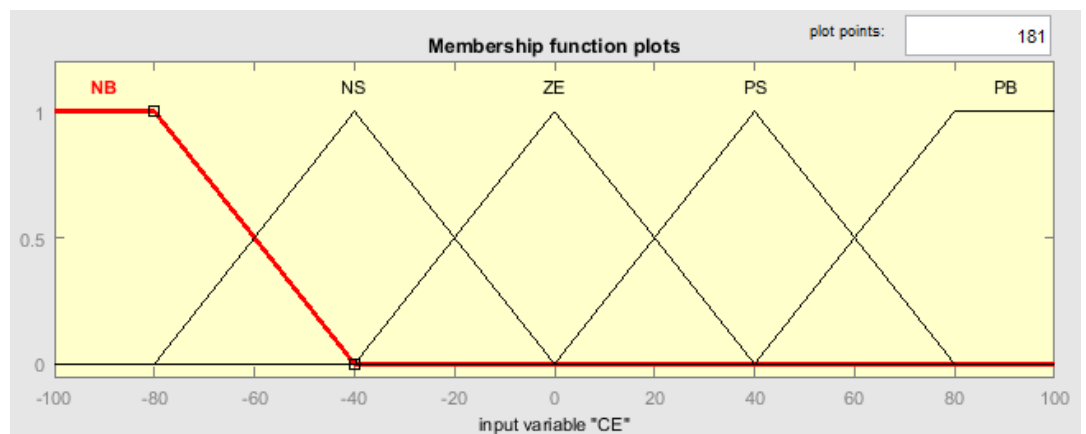


Figure 2. 6 : Variable d'entrée CE

La sortie D :

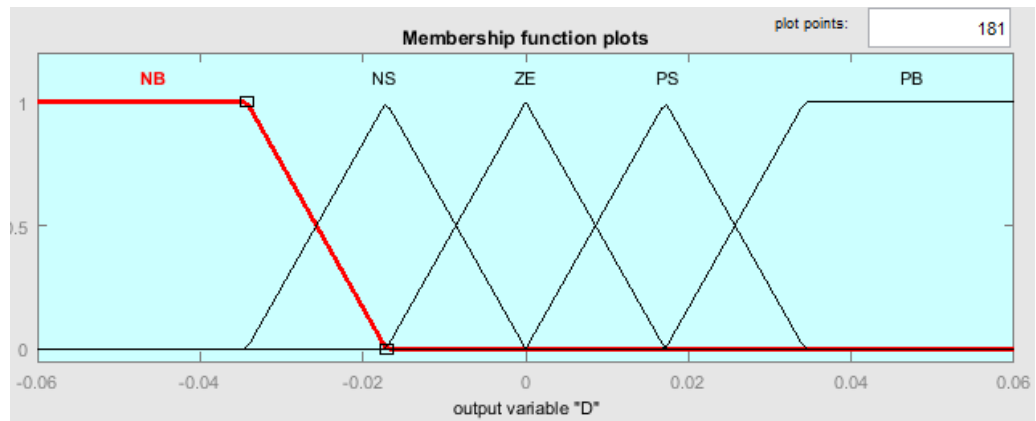


Figure 2. 7 : Variable de sortie D

- **Base de règles [10] :**

Une règle floue représente un ensemble d'implications décrivant la relation entre les variables linguistiques d'entrée et de sortie. La structure courante d'une règle floue est la suivante : **Si**<Conditions liées par des opérateurs flous>**Alors**<Action>

La première partie de la règle (les conditions) évalue si certaines conditions sont satisfaites, tandis que la deuxième partie (la conclusion) exprime la réaction désirée en fonction de la satisfaction des conditions de la première partie.

Les règles d'inférence peuvent être représentées sous forme d'une matrice appelée Matrice d'inférence. La matrice d'inférence peut être représentée selon le tableau (2.1) suivant :

Tableau 2. 1: Matrice d'inférence

$(e)/(\Delta e)$	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	ZE	ZE	PB	PB	PB
NS	ZE	ZE	NS	NS	NS
ZE	PS	ZE	ZE	ZE	PS
PS	NS	NS	PS	ZE	ZE
PB	NB	NB	ZE	ZE	ZE

La règle associée à la cellule du tableau est interprétée de la manière suivante :

Si E est NB ET ΔE est NB Alors D est ZE

- **Inférence floue :**

L'inférence constitue une étape où les signaux de sortie sont liés aux signaux d'entrée par le biais de conditions linguistiques. Généralement, on utilise l'une des trois méthodes suivantes :

- Méthode d'inférence Max-Min (Méthode de Mamdani)
- Méthode d'inférence Max-Produit (Méthode de Larsen)
- Méthode d'inférence Somme-Produit (Sugeno)

- **Défuzzification :**

Les ensembles flous de sortie sont combinés et transformés en une valeur numérique précise afin d'obtenir une réponse déterminée. Diverses méthodes de défuzzification peuvent être employées, telles que la moyenne pondérée, le centre de gravité ou la méthode du maximum. La (figure 2.8) offre un aperçu du fonctionnement de la technique MPPT utilisant un contrôleur flou [11].

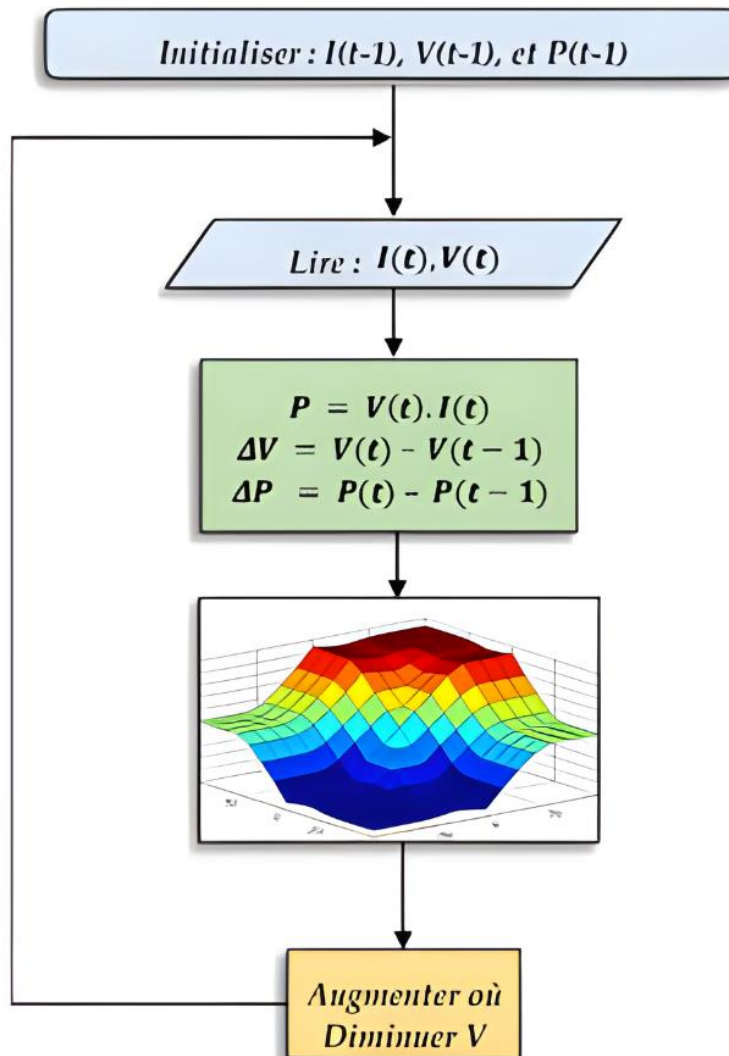


Figure 2. 8: la technique MPPT basée sur le contrôleur flou

2.4. Simulation méthode P&O et logique flou :

Dans cette partie, nous allons présenter le système avant de procéder à la simulation proprement dite.

2.4.1. Caractéristique des panneaux solaire :

Pour commencer, nous devons détailler les caractéristiques du panneau solaire Sun Power SPR-315E-WHT-D utilisés dans notre système. Ces caractéristiques incluent dans le tableau 2.1.

Tableau 2. 2: Caractéristiques du panneau

Paramètres	Sun Power SPR-315E-WHT-D
Puissance nominale (Pmax)	315.072 (W)
Tension à la puissance maximale (Vmp)	54.7 (V)
Courant à la puissance maximale (Imp)	5.76 (A)
Tension en circuit ouvert (Voc)	64.6 (V)
Courant de court-circuit (Isc)	6.14 (A)

2.4.2. Simulation des caractéristiques courant-tension et puissance-tension :

La simulation ci-dessous illustre comment la puissance (en watts) varie en fonction de la tension (en volts) pour différents niveaux d'irradiance solaire, allant de 200 W/m² à 1000 W/m².

Cette simulation montre comment la puissance maximale change avec la tension et différents niveaux d'irradiance, ce qui est crucial pour la conception et l'optimisation des systèmes photovoltaïques.

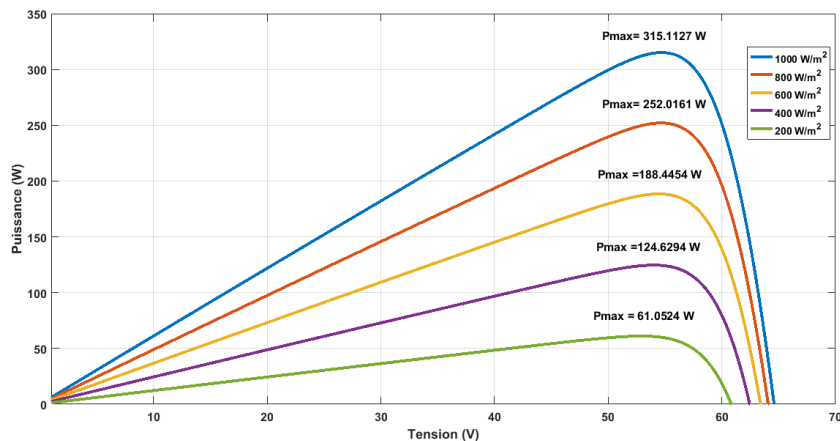


Figure 2. 9: Influence de l'irradiation sur la courbe caractéristique P=f(V).

La simulation ci-dessous illustre comment le courant (en ampère) et la puissance (en watts) varient en fonction de la tension (en volts) pour différents niveaux d'irradiance solaire, allant de 200 W/m² à 1000 W/m².

Cette simulation montre comment le courant et la puissance maximale changent avec la tension et différents niveaux d'irradiance, ce qui est crucial pour la conception et l'optimisation des systèmes photovoltaïques.

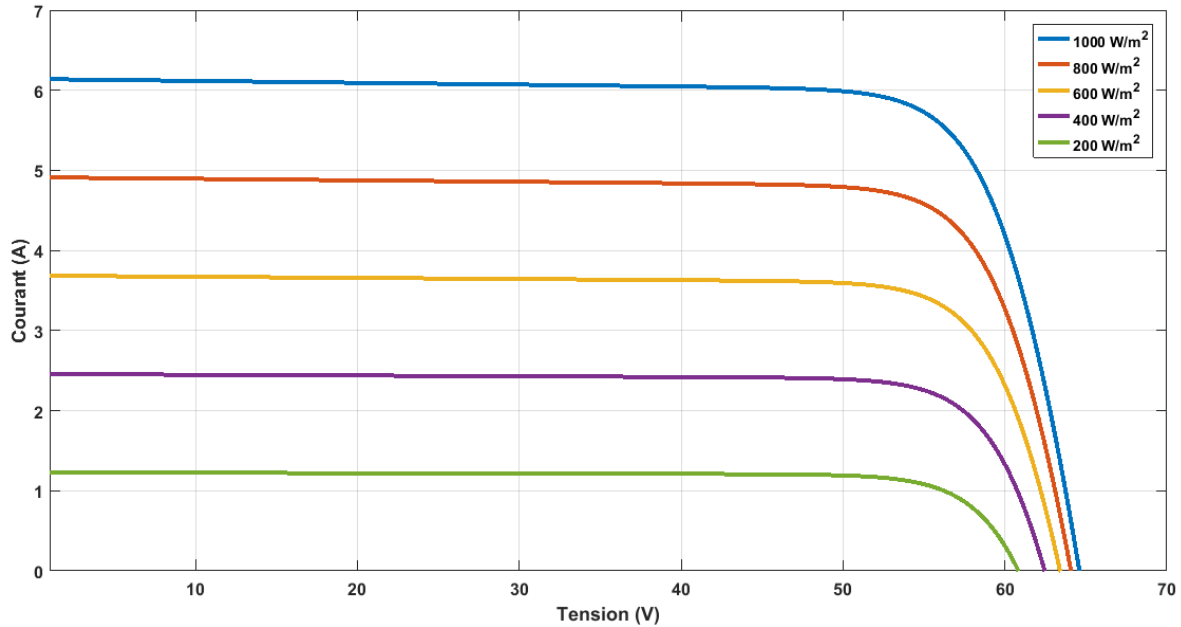


Figure 2. 10: Influence de l'irradiation sur la courbe caractéristiques $I=f(V)$

2.4.3. Signaux de référence :

L'éclairement du panneau se compose de trois parties distinctes, La première partie de l'éclairement varie linéairement de 800 W/m² à 1000 W/m². La deuxième partie est maintenue constante à 1000 W/m², tandis que la troisième partie reste stable à 600 W/m².

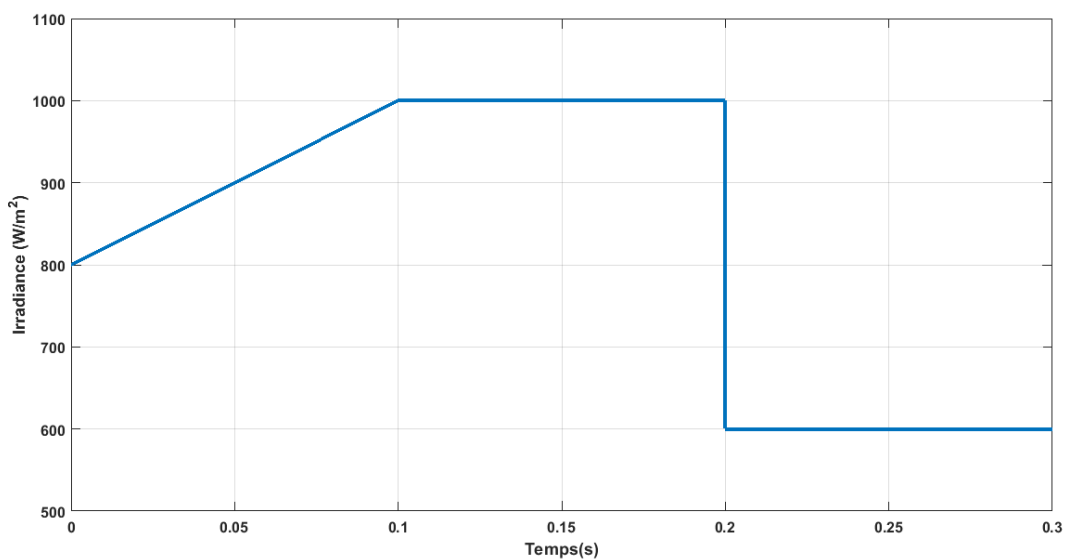


Figure 2. 11: L'éclairement appliqué au panneau

Nous fournissons la puissance maximale des panneaux Sun Power en fonction des variations de l'éclairage, considérée comme puissance idéale, illustrée dans la figure 2.6.

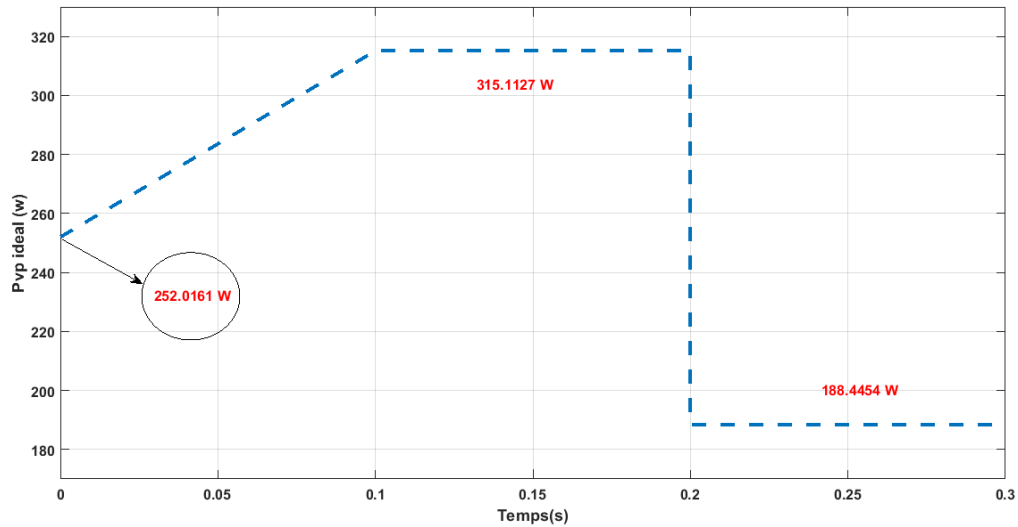


Figure 2.12 : Puissance maximale

2.4.4. Les valeurs de composant d'hacheur :

- Capacitance (C1) : 3.090e-5 (F)
- Inductance (L) : 2.519e-5 (H)
- Capacitance (C2) : 4.905e-5 (F)
- Output résistance (R) : 30.46 ohms

Pour calculer la valeur minimale de Rout on doit calculer :

$$R0 = \frac{Vmp}{Imp} = \frac{54.7}{5.76} = 9.49\text{ohm} \quad (2.3)$$

- Quand on travaille avec un convertisseur boost il faut $R0 \geq Rout$
- Quand on travaille avec un convertisseur Buck il faut $R0 \leq Rout$

2.4.5. Simulation méthode P&O :

Pour tester les performances de l'algorithme P&O (Perturb and Observe), nous travaillons sur MATLAB Simulink. Le schéma du circuit utilisé lors de cette simulation est conçu pour évaluer l'efficacité de l'algorithme sous différentes conditions d'éclairage.

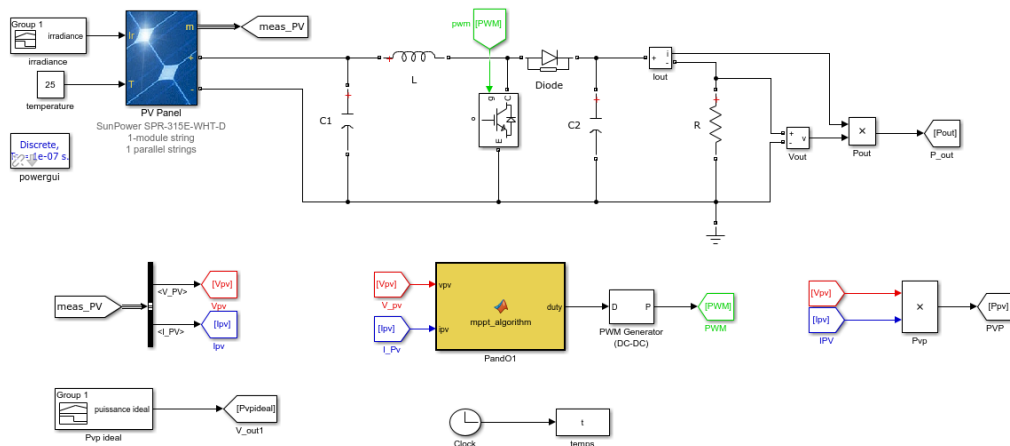


Figure 2.13: Circuit de P&O dans Simulink Matlab

D'abord, nous travaillons sur le MPPT (Maximum Power Point Tracking) en créant une figure qui représente la puissance fournie par le panneau solaire par rapport à la puissance idéale.

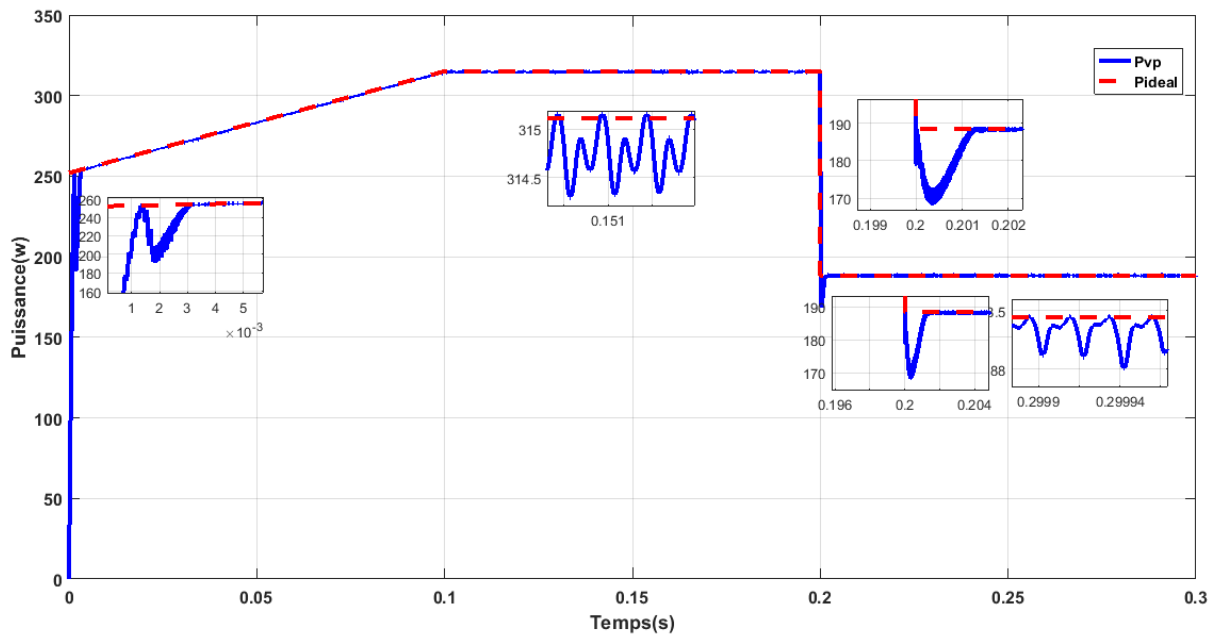


Figure 2. 14: Superposition de la puissance idéale avec la puissance de la sortie du panneau

Ensuite, on représente la puissance de sortie du hacheur en comparaison avec la puissance idéale :

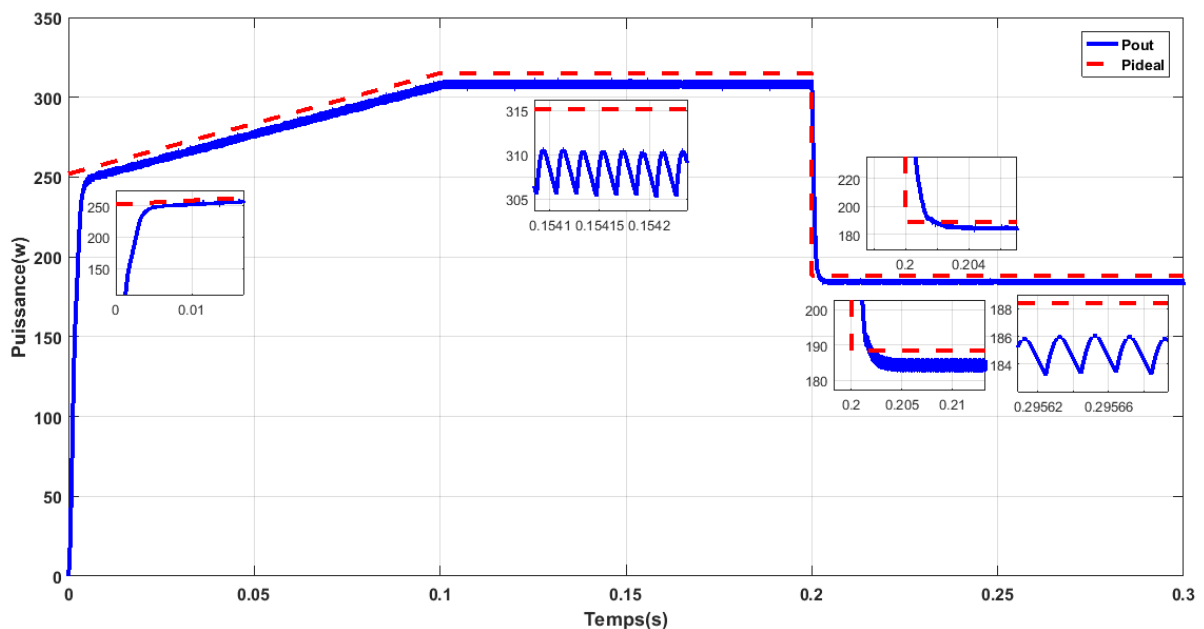


Figure 2. 15: Superposition de la puissance idéale avec la puissance de la sortie du hacheur

2.4.6. Simulation méthode logique floue :

Pour tester les performances de l'algorithme logique floue nous travaillons sur MATLAB Simulink. Le schéma du circuit utilisé lors de cette simulation est conçu pour évaluer l'efficacité de l'algorithme sous différentes conditions d'éclairément.

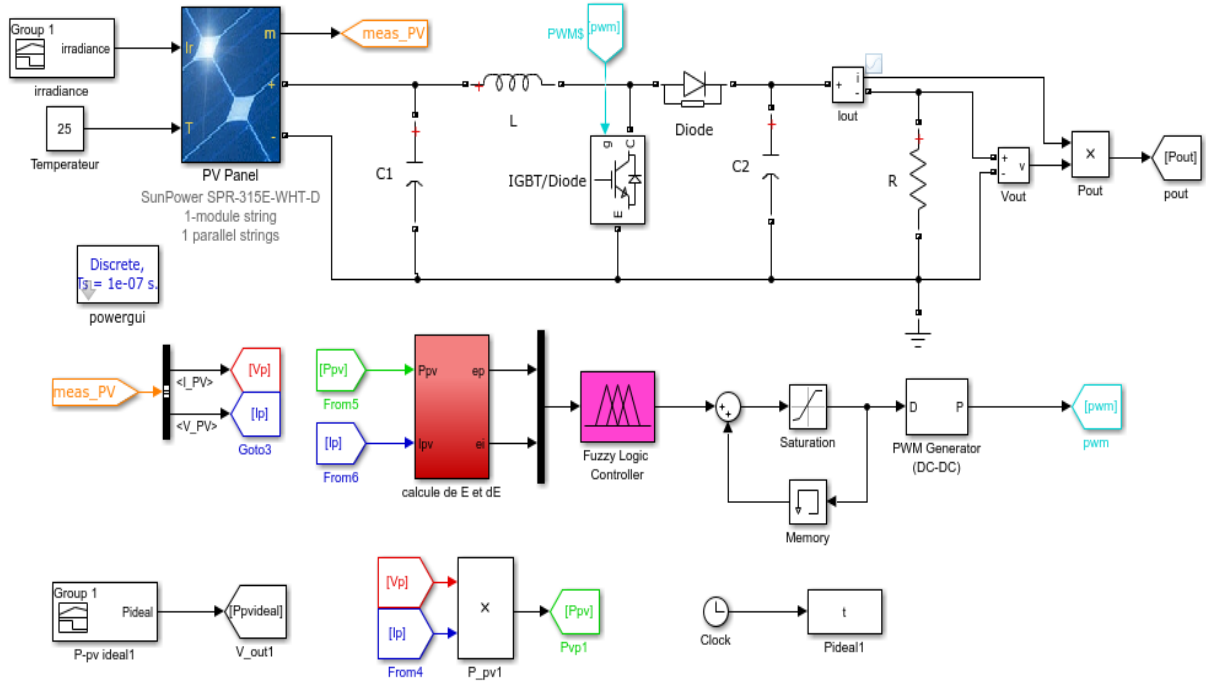


Figure 2. 16: Circuit de logique flou dans Simulink Matlab

D'abord, nous travaillons sur le MPPT (Maximum Power Point Tracking) en créant une figure qui représentant la puissance fournie par le panneau solaire par rapport à la puissance idéale :

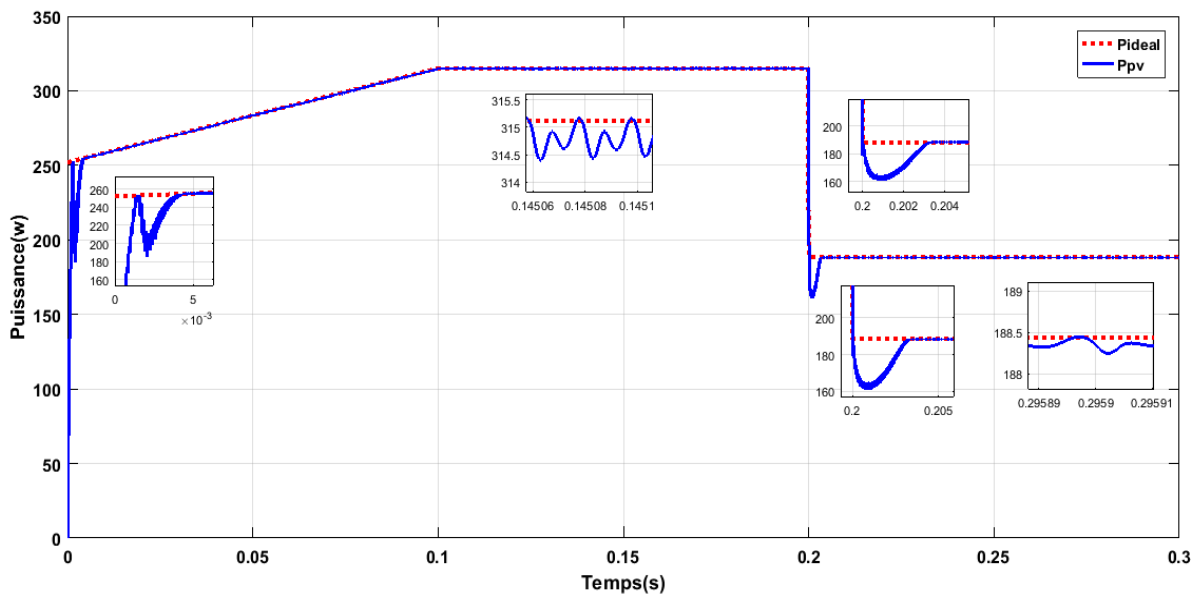


Figure 2. 17: Superposition de la puissance idéale avec la puissance de la sortie du panneau

Ensuite, nous représentons la puissance de sortie du hacheur en comparaison avec la puissance idéale :

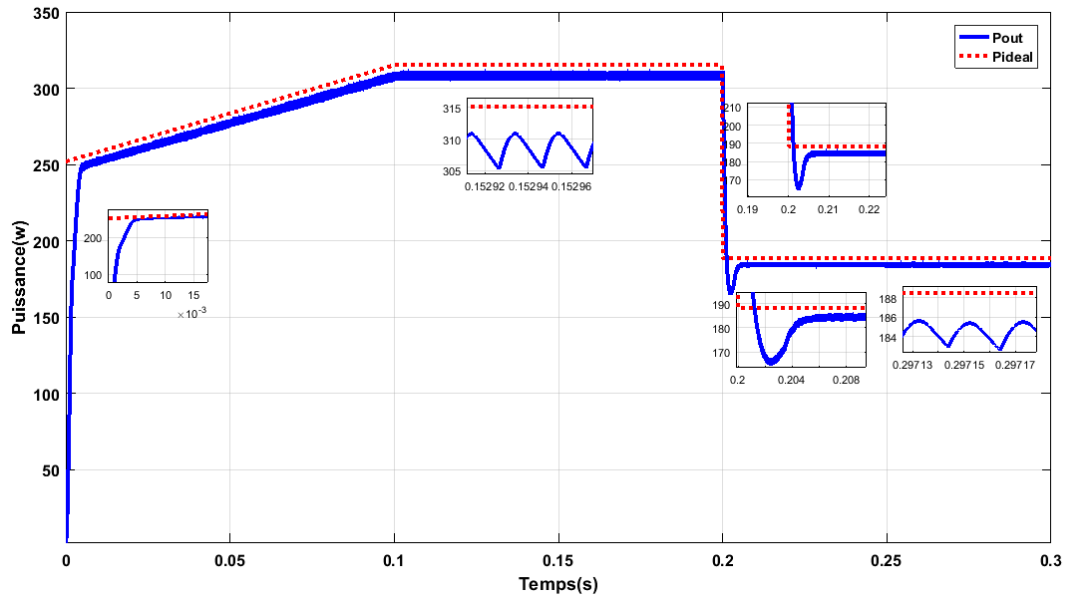


Figure 2. 18: Superposition de la puissance idéale avec la puissance de la sortie du hacheur

2.4.7. Comparaison des deux algorithmes :

Dans cette section, nous comparons les deux algorithmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) utilisés pour optimiser la puissance des panneaux solaires : le Perturb and Observe (P&O) et la Logique Floue (FL). Les figures ci-dessous illustrent les résultats des simulations pour chaque algorithme, montrant la puissance de sortie du panneau solaire (P_{vp}) et la puissance de sortie du hacheur (P_{out}) et le rapport cyclique (duty cycle)

La puissance de sortie du panneau solaire (P_{vp})

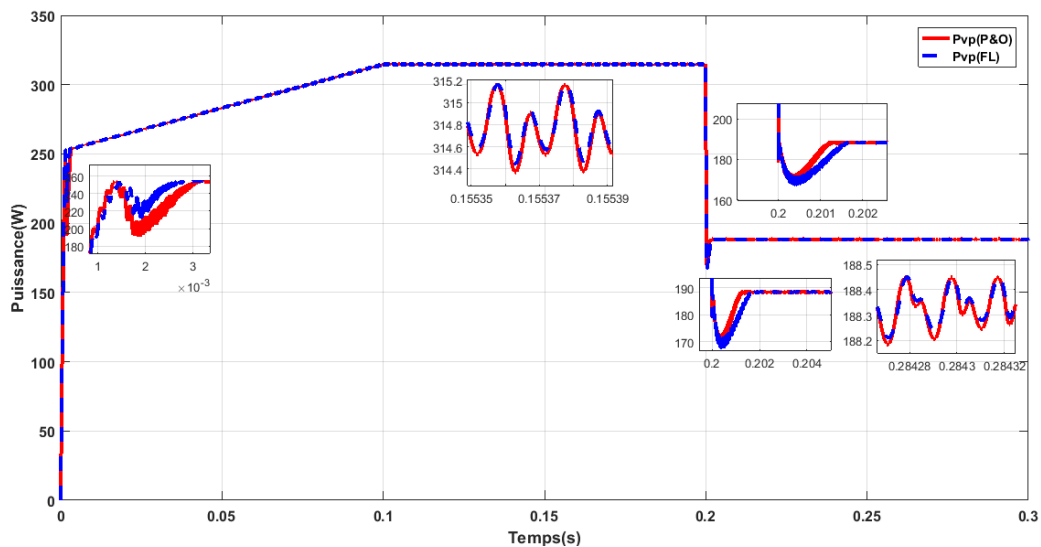


Figure 2. 19: Superposition de la puissance de sortie du Panneau algorithme P&O avec la puissance de la sortie du Panneau algorithme logique floue

- Oscillations** : Les oscillations pour les deux algorithmes sont comparables en magnitude après la partie transitoire initiale. Les incrustations montrent des détails où les oscillations sont présentes, mais elles sont similaires.
- Réactivité** : L'algorithme logique flou réagit légèrement plus rapidement que P&O lors de la montée initiale de la puissance. Logique floue atteint le point de puissance maximale plus rapidement que P&O.
- Précision** : Les deux algorithmes atteignent la même valeur de puissance d'état stationnaire. Logique floue montre une meilleure précision avec moins de petites fluctuations par rapport à P&O.

La puissance de sortie de l'hacheur (Pout) :

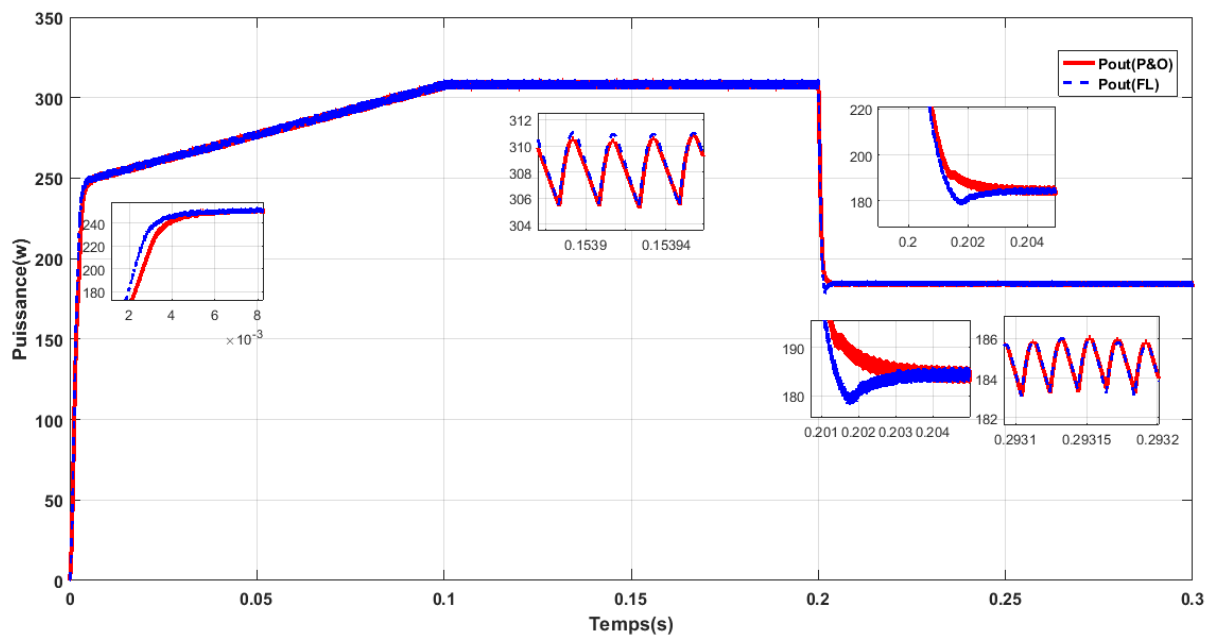


Figure 2. 20: Superposition de la puissance de sortie de l'hacheur algorithmes P&O avec la puissance du hacheur algorithme logique floue

- Oscillations** : Les oscillations dans l'algorithme P&O sont plus prononcées que dans l'algorithme logique flou, comme le montrent les incrustations. FL a une réponse plus lisse avec moins d'oscillations comparée à P&O.
- Réactivité** : logique floue montre un temps de réponse plus rapide dans la phase transitoire initiale par rapport à P&O mais il a une difficulté à converger avec une variation rapide de l'irradiation. Logique floue atteint la valeur d'état stationnaire plus rapidement que P&O.
- Précision** : logique floue maintient une puissance de sortie plus stable et précise avec moins de déviations par rapport à la puissance désirée. P&O montre plus de variations autour de la valeur d'état stationnaire.

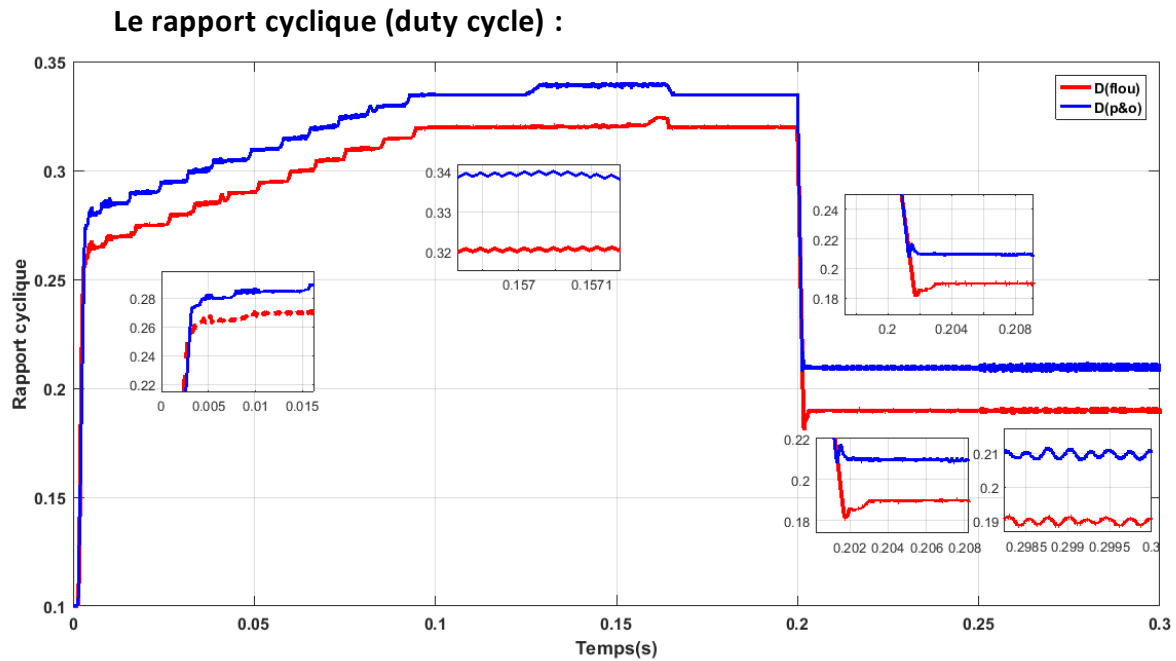


Figure 2.18 : Superposition de rapport cyclique dans 2 algorithmes P&O et logique floue

- **Oscillations** : L'algorithme P&O présente des oscillations significatives autour du point de fonctionnement, tandis que l'algorithme de Logique Floue montre moins d'oscillations, offrant une transition plus douce et stable.
- **Réactivité** : L'algorithme P&O est réactif mais oscille constamment, alors que l'algorithme de Logique Floue atteint rapidement le point de puissance maximale avec moins de fluctuations, assurant une réponse plus stable.
- **Précision** : La précision de l'algorithme P&O est affectée par ces oscillations continues, alors que l'algorithme de Logique Floue maintient le point de puissance maximale avec une meilleure précision et moins de fluctuations.

2.4.8. Critère de performance des contrôleurs MPPT : le rendement

À partir des résultats obtenus, nous constatons les avantages de la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) basée sur la logique floue. Cette méthode est non seulement robuste, mais elle offre également une plus grande rapidité en termes de temps de réponse et une précision accrue par rapport à la commande MPPT utilisant l'algorithme Perturb and Observe (P&O). Pour mieux visualiser les différences entre ces deux méthodes de commande, nous allons calculer le rendement du système sous des conditions standard ainsi qu'en présence de variations de l'irradiation solaire.

Le rendement sous un niveau d'ensoleillement constant est donné par [12] :

$$\eta = \frac{P_{mptt}(t)}{P_{max}(t)} \quad (2.3)$$

Où $P_{mptt}(t)$ est la puissance obtenue par la simulation (mesurée sous le contrôle MPPT), et $P_{max}(t)$ est la puissance maximale du module mesurée sans MPPT sous les mêmes conditions atmosphériques.

En revanche, sous des conditions d'ensoleillement variables, le rendement est donné par [12] :

$$\eta = \frac{\int_0^t P_{mppt}(t) dt}{\int_0^t P_{max}(t) dt} \quad (2.4)$$

Pour les contrôleurs MPPT abordés dans ce chapitre, le tableau (2.2) résume les résultats des calculs relatifs au rendement.

Tableau (2.2) : Critère de performance des contrôleurs MPPT : le rendement

Méthode	P&O	Logique Floue
Condition		
Rendement en fonction de l'ensoleillement	99.49%	99.87%

2.5. Conclusion :

En termes de stabilité et de précision, l'algorithme de logique floue est bien meilleur que l'algorithme P&O bien qu'il soit un peu moins réactif. Cependant, l'algorithme P&O reste un bon choix en raison de sa simplicité et de sa rapidité. Néanmoins, il présente quelques inconvénients majeurs car il oscille constamment autour du point de puissance maximale (MPP), ce qui rend difficile la convergence en cas de variation rapide de « l'irradiation ».

CHAPITRE 3

3. Implémentation et résultats

3.1. Introduction :

Après avoir exploré les concepts théoriques et réalisé des simulations détaillées, nous passons maintenant à une étape importante : la création de notre prototype de système de commande MPPT. Ce chapitre vous fera découvrir la conception et la mise en œuvre d'un contrôleur MPPT utilisant le microcontrôleur ESP32. Deux algorithmes seront utilisés pour trouver le point de puissance maximale (MPP) : Perturb and Observe (P&O) et la Logique Floue.

3.2 Présentations du système MPPT :

Pour concrétiser le contrôleur MPPT, il est indispensable de développer les principaux blocs constituant le circuit électronique (voir figure 3.1). Ces blocs incluent le circuit d'adaptation, le convertisseur DC-DC (hacheur), et les interfaces de communication. Chacun de ces éléments joue un rôle essentiel dans notre système.

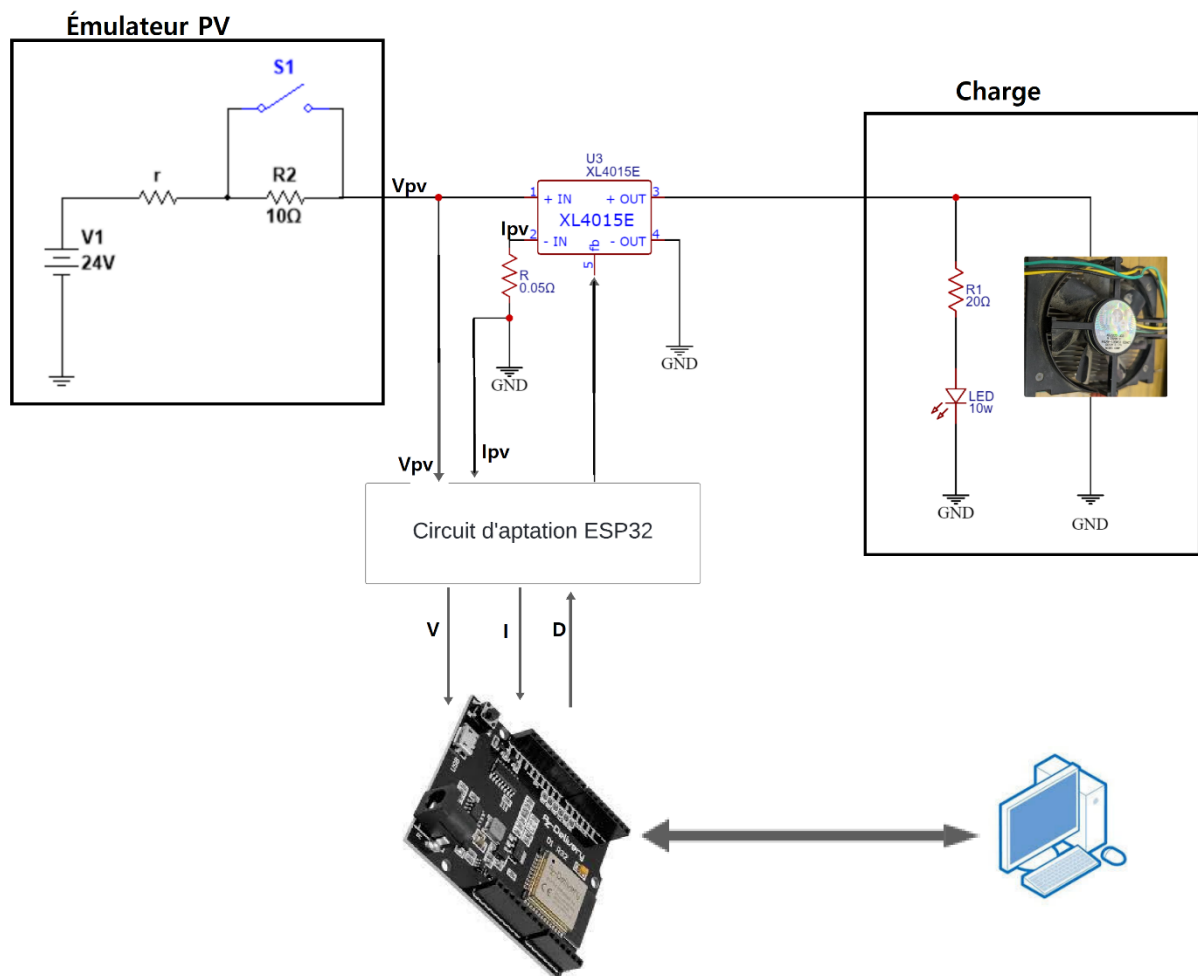


Figure 3. 1: Schéma général du contrôleur de charge solaire MPPT

3.2.1 Emulateur de PV :

L'émulateur PV permet de simuler facilement la réponse d'un panneau solaire sous diverses conditions d'ensoleillement. En manipulant l'interrupteur S1, on peut observer le comportement du circuit avec différents niveaux d'irradiance, ce qui aide à étudier les caractéristiques courant-tension (I-V) du système et à comprendre le comportement des panneaux solaires dans diverses situations.

- **Cas 1 : S1 est ouvert**

Quand S1 est ouvert, la tension de sortie $V(\text{sortie})$ sera influencée par la résistance interne r et la charge connectée à la sortie. Appelons cette charge $R(\text{charge})$.

Le courant dans le circuit sera :

$$I(\text{ouvert}) = \frac{V_1}{r + R(\text{charge})} \quad (3.1)$$

La tension de sortie sera alors :

$$V = I(\text{ouvert}) * (R(\text{charge}) + r) \quad (3.2)$$

Dans ce cas, la tension de sortie est la même que celle aux bornes de $R(\text{charge})$

- **Cas 2 : Quand S1 est fermé**

Quand S1 est fermé, la résistance R_2 est connectée en série avec la résistance interne r . Le courant dans le circuit :

$$I(\text{fermé}) = \frac{V_1}{r + R_2 + R(\text{charge})} \quad (3.3)$$

La tension de sortie sera alors :

$$V = I(\text{fermé}) * (R(\text{charge}) + r + R_2) \quad (3.4)$$

Dans ce cas, le courant dans le circuit diminue en raison de l'augmentation de la résistance totale $r + R_2 + R(\text{charge})$, et la tension de sortie sera également influencée par cette nouvelle répartition des résistances.

3.2.2. Caractéristiques de convertisseur utilisé :

Au cœur du système MPPT réside un composant essentiel : le convertisseur Buck (XL4015E). Ce circuit électronique joue un rôle crucial dans l'optimisation de la puissance extraite des panneaux solaires. Sa fonction principale consiste à abaisser la tension d'entrée continue (DC) élevée provenant des panneaux solaires à une tension de sortie DC plus basse adaptée à la charge connectée.

Le convertisseur Buck que nous utilisons est le XL4015E, reconnu pour sa robustesse et son efficacité dans les systèmes de gestion de l'énergie solaire.

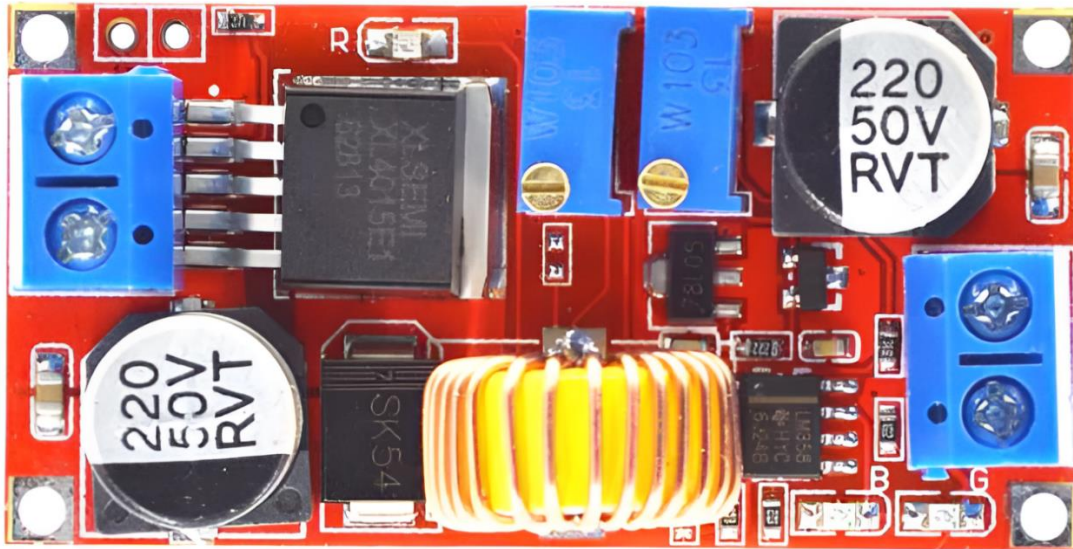


Figure 3. 2: convertisseur Buck XL4015E

Caractéristiques techniques du XL4015E :

- Tension d'entrée : 8 VDC ~ 36 VDC
- Tension de sortie : 1,25 VDC ~ 32 VDC
- Courant de sortie : maximum réglable 5A
- Régulation de tension : $\pm 2,5 \%$
- Régulation de charge : $\pm 0,5 \%$
- Ondulation de sortie : 50 mV (max) avec une bande passante de 20 MHz
- Fréquence de commutation : 300 KHz
- Efficacité de conversion : jusqu'à 95 %
- Rectification : rectification non synchrone
- Propriétés du module : module de courant et de tension constantes non isolés
- Température de fonctionnement : -40° à $+85^{\circ}\text{C}$

Description détaillée :

Le XL4015E est un convertisseur DC/DC de type Buck (abaisseur) à fréquence fixe de 180 KHz, capable de piloter une charge de 5 A avec un rendement élevé, une faible ondulation et une excellente régulation. Nécessitant peu de composants externes, ce régulateur est simple à utiliser et intègre une compensation de fréquence interne ainsi qu'un oscillateur à fréquence fixe.

Le circuit de contrôle PWM peut ajuster le rapport cyclique de 0 à 100 %. Une protection contre les surintensités est intégrée. En cas de surcharge, la fréquence de fonctionnement est réduite de 180 KHz à 48 KHz, et un bloc de compensation interne minimise le nombre de composants externes nécessaires.

3.2.3. Caractéristiques de ESP32 :

Pour conclure la présentation de ce système, nous incluons une section de commande intégrant l'algorithme MPPT. Afin de faciliter la communication, nous avons opté pour un microcontrôleur ESP32.

La Wemos D1 R32 est une carte de développement basée sur l'ESP32, successeur de l'ESP8266. Elle peut fonctionner à une fréquence d'horloge allant jusqu'à 240 MHz et dispose de deux cœurs : l'un dédié aux fonctions sans fil et l'autre principalement réservé aux fonctions utilisateur. Les cartes basées sur l'ESP32 bénéficient d'un soutien croissant d'une vaste communauté qui apprécie leurs performances.



Figure 3. 3: carte développement D1 R32(esp32)

CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES :

- Tension DC en entrée : 5V - 12V DC
- WIFI: 802.11 b/g/n/e/i (802.11n up jusqu'a 150 Mbps)
- Bluetooth: v4.2 BR/EDR et BLE
- RAM : 520KB
- Mémoire Flash : 4Mb
- Consommation électrique : Courant Max : 250mA, Courant Veille : 0,15mA - En fonction sans wifi : 20mA
- Température de fonctionnement : -40°C à 85°C
- SMD Module : ESP32-WROOM-32

Pin out ESP32 :

Avant de travailler avec la Wemos D1 R32, il est essentiel de connaître les pins de cette carte. Il est donc nécessaire d'explorer la disposition des pins.

Ce microcontrôleur dispose de 25 GPIO, dont plusieurs sont accessibles via les broches de la carte. Parmi ces broches nous pouvons les configurer comme :

- 15 entrées analogiques
- 22 sorties PWM
- 10 capteurs capacitifs
- Plus les broches dédiées

3.3. Adaptation DC/DC :

Avant de discuter du contrôle d'un convertisseur XL4015E, il est crucial de bien comprendre son fonctionnement et ses caractéristiques spécifiques.

3.3.1 Fonctionnement de base du convertisseur Buck

Un convertisseur Buck est un type de convertisseur de puissance qui abaisse une tension d'entrée à une tension de sortie inférieure tout en augmentant le courant. Le principe de fonctionnement repose sur la commutation rapide d'un interrupteur (généralement un transistor MOSFET) et l'utilisation d'un composant de stockage d'énergie, comme une inductance, pour transformer la tension d'entrée en une tension de sortie plus basse.

Les principales étapes du fonctionnement sont :

- **Phase de conduction** : Lorsque le transistor est fermé, le courant traverse l'inductance, stockant de l'énergie sous forme de champ magnétique.
- **Phase de repos** : Lorsque le transistor est ouvert, l'énergie stockée dans l'inductance est libérée, fournissant du courant à la charge via une diode de roue libre.
- **Répétition des cycles** : Ce cycle est répété à une fréquence élevée, régulant ainsi la tension de sortie.

3.3.2. Schéma typique du XL4015E :

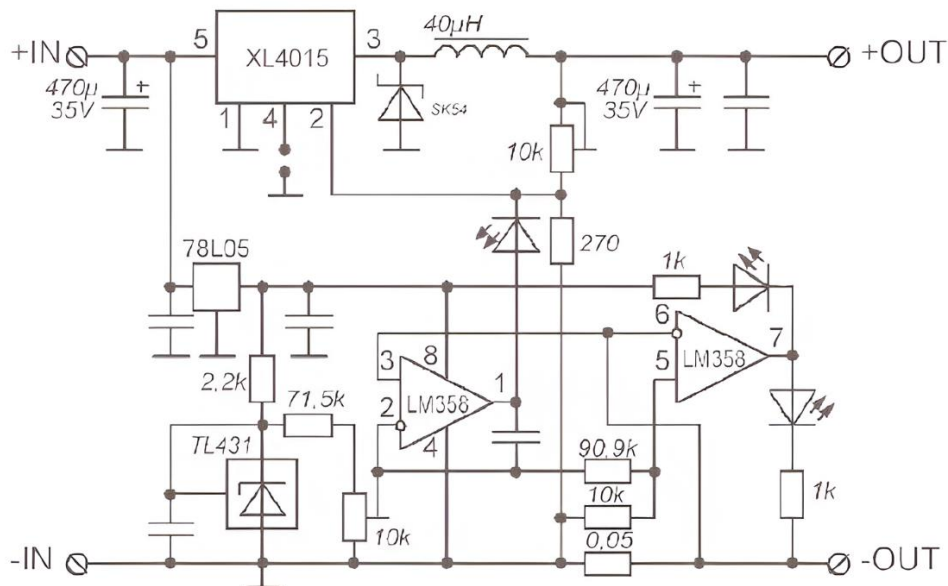


Figure 3. 5: Circuit d'application typique XL4015E

Fonctionnement de circuit :

1. Filtrage de l'Entrée Cin et C1 filtrent la tension d'entrée Vin, éliminant les fluctuations et les bruits hautes fréquences.

2. Régulation de la Tension : Le XL4015E, un convertisseur Buck, utilise l'énergie fournie par V_{in} pour générer une tension de sortie V_{out} inférieure. Il fonctionne en alternant rapidement entre les états on et off du MOSFET interne, régulant ainsi la tension et le courant à la sortie.
3. Stockage et Transfert d'Énergie : L'inductance $L1$ stocke l'énergie lorsque le transistor interne est fermé et la libère à travers la diode $D1$ lorsque le transistor est ouvert.
4. Stabilisation de la Tension de Sortie : $Cout$ et $C2$ filtrent la sortie, fournissant une tension stable et réduisant les ondulations à la charge connectée.
5. Ajustement de la Tension de Sortie : La tension de sortie V_{out} est déterminée par les résistances $R1$ et $R2$ via la relation suivante :

$$V_{OUT} = 1.25 \times \left(1 + \frac{R1}{R2}\right) \quad (3.5)$$

Avant d'aller sur le calcul de V_{out} nous utilisons le circuit de figure 3.6 .

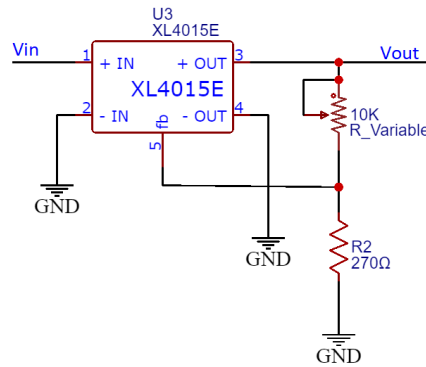


Figure 3. 6 : Convertisseur dc-dc (XL4015) fixe

Pour les données :

$$R1 = 10K\Omega$$

$$R2 = 270\Omega$$

Calcul de la Tension de Sortie

Tension Minimale (1,25 V) :

- **Configuration** : $R2$ est réglé à 0Ω .
- **Calcul** :

$$V_{OUT} = 1.25 \times \left(1 + \frac{0}{270\Omega}\right) \quad (3.6)$$

$$V_{out} = 1.25V \quad (3.7)$$

Tension Max (32 V) :

- **Configuration** : $R2$ est réglé à $6.64k\Omega$.
- **Calcul** :

$$V_{OUT} = 1.25 \times \left(1 + \frac{6.64}{270\Omega}\right) \quad (3.8)$$

$$V_{out} = 32V \quad (3.9)$$

3.3.3. Contrôle d'un convertisseur XL4015 (transformer dc-dc fixe vers variable) :

Tout d'abord, nous avons modifié la valeur de la résistance R1, en passant de 10k ohms à 3.85k ohms. Ensuite, nous avons ajouté une résistance R3 de 1k ohm. Après ces ajustements, nous avons généré un signal PWM avec l'ESP32, qui a été injecté dans un circuit spécifique (circuit PWM). Ensuite, nous avons connecté directement la sortie au pin de rétroaction pour le contrôle.

La modification illustrée dans la figure suivante :

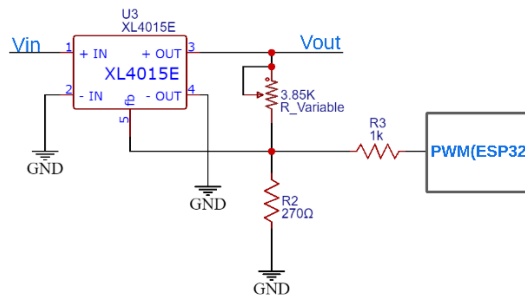


Figure 3. 7 : convertisseur (XL4015E) variable

Afin de faire cette modification on plote la tension de sortie de dc-dc par rapport tension de feedback :

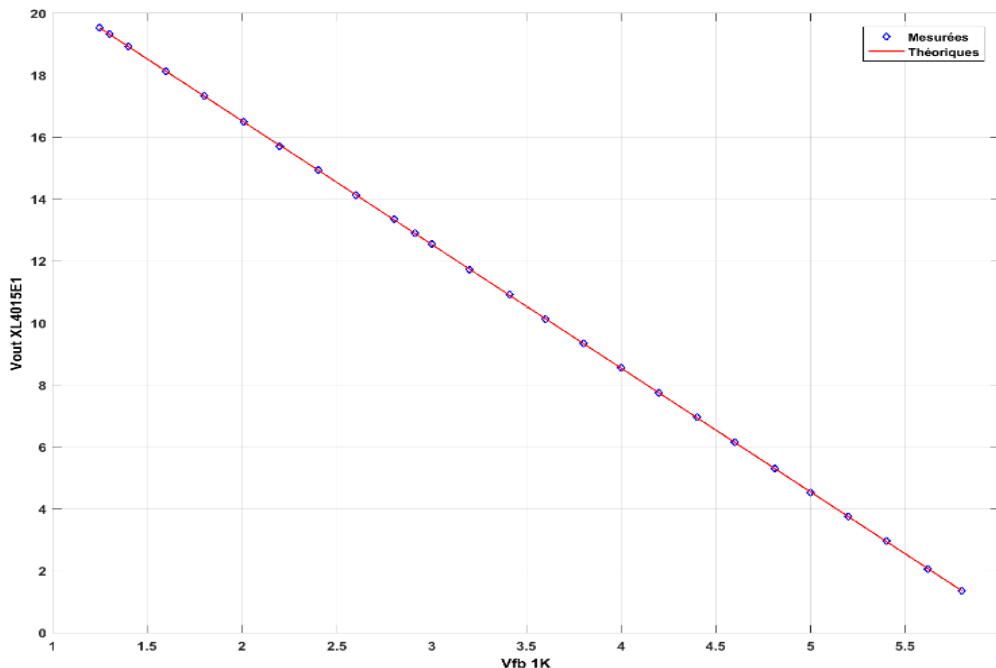


Figure 3. 8: Relation entre la tension de sortie et la tension de feedback du XL4015 E

3.3.4. Conception de circuit adaptation :

Le LM324 est un amplificateur opérationnel quadruple à faible coût qui fonctionne avec des tensions d'alimentation uniques. IL est idéal pour des applications nécessitant des tensions d'alimentation basses ou élevées (de 3 V à 32 V). Chaque AOP peut être utilisé pour différentes fonctions comme la mesure de tension, de courant, et le contrôle de la PWM.

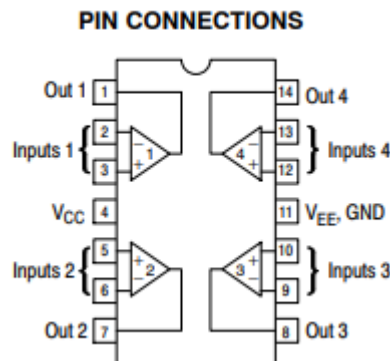


Figure 3. 9 : Pin configuration d'un LM324

Circuit de contrôle la PWM :

Le circuit de contrôle PWM est composé de plusieurs éléments (figure 3.10). Il comprend :

1. Alimentation :

- L'amplificateur opérationnel (LM324ADE4) est alimenté par une source de 6,5V connectée à sa broche Vcc (broche 4).

2. Entrée et Sortie :

- Le signal d'entrée entre via la résistance R8 (1kΩ).
- Le signal de sortie est pris à partir de la broche de sortie de l'amplificateur opérationnel (broche 1), passant par les résistances R3 (2,2kΩ) et R2 (1kΩ).

3. Réseau de Rétroaction :

- Le réseau de rétroaction (feedback) implique les résistances et les condensateurs connectés autour de l'amplificateur opérationnel pour contrôler le comportement du signal de sortie.
- R_Variable (potentiomètre de 10kΩ) et C2 (condensateur de 2,2μF) font partie de la boucle de rétroaction (fb) connectée entre la sortie et l'entrée inverseuse (broche 2) de l'amplificateur opérationnel.
- C1 (condensateur de 1,7μF) est connecté à l'entrée non-inverseuse (broche 3) et à la masse (GND), probablement pour stabiliser le signal d'entrée.

4. Connexions de Masse :

- Plusieurs connexions de masse (GND) assurent une référence et une stabilité appropriées pour le circuit.

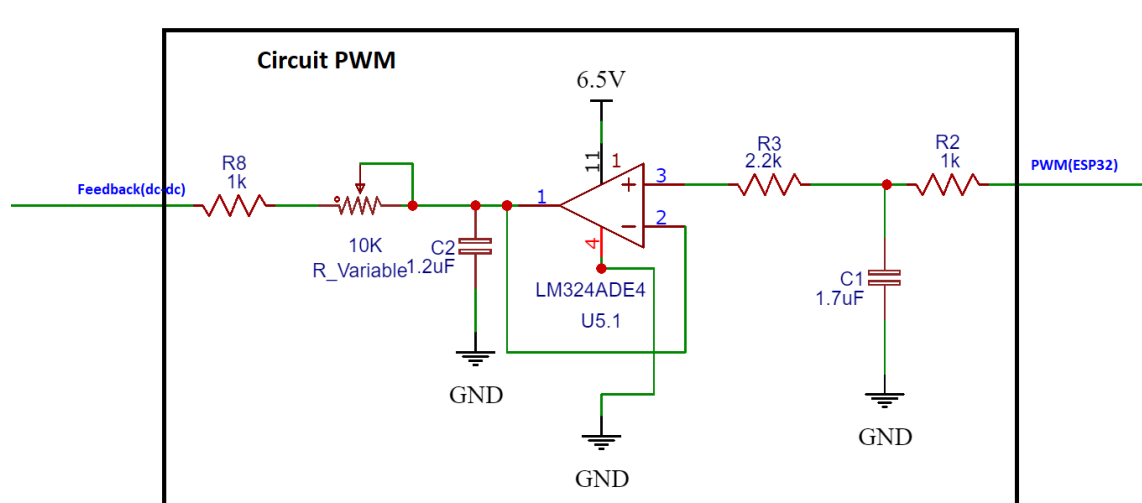


Figure 3. 10 : Circuit de PWM

Principe de fonctionnement de ce circuit :

Le module de contrôle PWM décrit utilise un amplificateur opérationnel pour générer un signal PWM (Pulse Width Modulation) avec un rapport cyclique variable. Ce signal PWM est contrôlé par un signal d'entrée provenant d'un microcontrôleur ESP32 ajusté via un réseau de rétroaction. Voici une explication détaillée :

1. Traitement du Signal d'Entrée

Signal d'Entrée :

- Le signal d'entrée provenant de l'ESP32 est d'abord conditionné par une résistance, R8.
- Ensuite, ce signal est envoyé à l'entrée non-inverseuse de l'amplificateur opérationnel à travers une résistance variable (R_Variable) et un condensateur (C2).

Conditionnement Initial :

- R8 aide à adapter l'impédance du signal d'entrée.
- R_Variable permet d'ajuster manuellement la sensibilité du signal d'entrée.
- C2 filtre le signal pour éliminer les bruits (haute fréquence) indésirables.

2. Boucle de Rétroaction

Rétroaction :

- La boucle de rétroaction, qui inclut R_Variable et C2, est cruciale pour le fonctionnement de l'amplificateur opérationnel.
- R_Variable et C2 forment un réseau RC qui détermine le gain et la réponse en fréquence de l'amplificateur opérationnel.

Contrôle du Gain et du Temps de Réponse :

- En ajustant R_Variable, on modifie le rapport de rétroaction, ce qui change le gain de l'amplificateur opérationnel.
- Cela affecte la manière dont l'amplificateur opérationnel traite le signal d'entrée, influençant ainsi les caractéristiques du signal PWM produit.

3. Signal de Sortie

Génération du Signal PWM :

- L'amplificateur opérationnel traite le signal d'entrée en fonction du réseau de rétroaction pour produire un signal PWM en sortie.
- Le rapport cyclique (duty cycle) de ce signal PWM est contrôlé par les ajustements effectués sur le réseau de rétroaction (R_Variable et C2).

La sortie de circuit :

- Injecter directement dans la branche feedback de dc-dc XL4015E
- Le XL4015E utilise ce signal PWM pour ajuster sa tension et influencer le courant de sortie selon sa configuration.

Circuit de capteur de tension :

Le circuit utilisant un amplificateur opérationnel (AOP) LM324 est conçu pour mesurer la tension du panneau photovoltaïque (PV) et produire une sortie proportionnelle à cette tension (figure 3.11). Voici une description détaillée des composants et de leur rôle dans ce circuit :

1. Composants du Circuit

- R_Variable (Potentiomètre de 10 k Ω) : Permet d'ajuster la tension d'entrée qui sera mesurée.
- R1 (1 k Ω) : Résistance fixe qui forme une partie du diviseur de tension avec le potentiomètre.
- R4 (2.2 k Ω) : Résistance qui limite le courant d'entrée vers l'AOP.
- LM324ADE4 : Amplificateur opérationnel quadruple. Dans ce circuit, seule une des quatre unités est utilisée.
- Point de Prélèvement : Connecté à l'entrée non-inverseuse de l'AOP à travers R4 (2.2 k Ω).

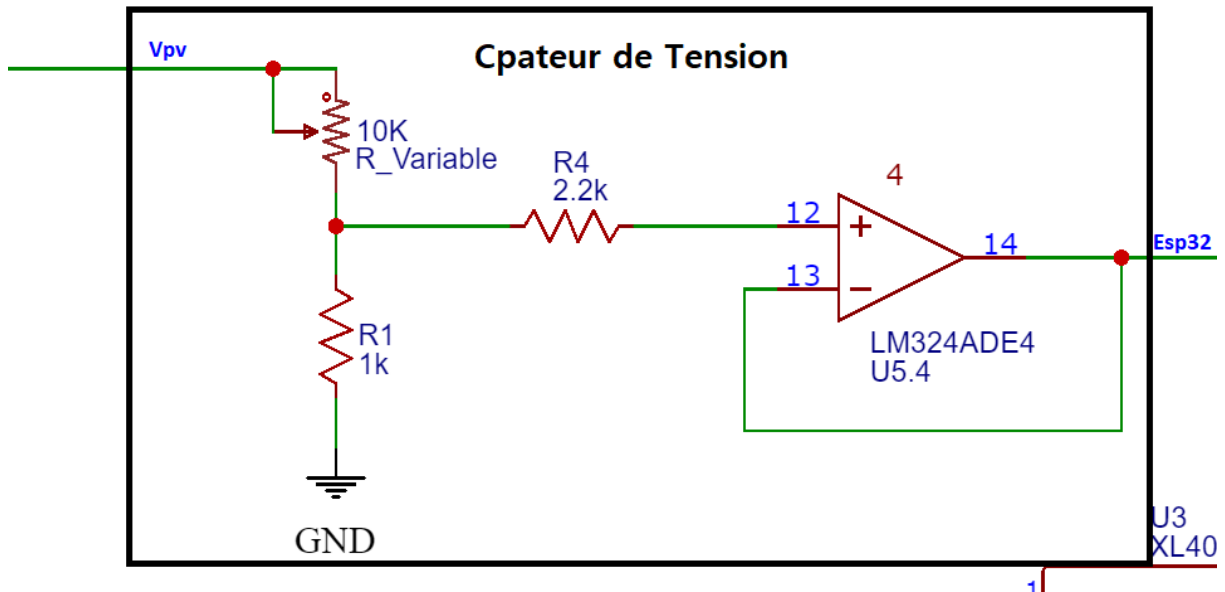


Figure 3. 11: Circuit de capteur de tension (PV).

Principe de fonctionnement :

- Entrée : La tension VPV est divisée et ajustée par R_Variable et R1.
- Traitement : La tension ajustée est appliquée à l'entrée non-inverseuse de l'AOP, avec l'entrée inverseuse connectée à la sortie (configuration buffer), (Suiveur).
- Sortie : La sortie de l'AOP suit la tension d'entrée ajustée, offrant une haute impédance d'entrée et une basse impédance de sortie, prête à être lue par l'ESP32.

Capteur de courant :

Ce circuit utilise des composants spécifiques pour mesurer le courant et produire une tension proportionnelle à ce courant, permettant ainsi un traitement ultérieur (3.12). Voici une description des composants principaux et de leur rôle :

Composants Principaux :

- R6 (0.04Ω) : Sert de résistance shunt pour mesurer le courant.
- R5, R11, R12 : Définissent les conditions de fonctionnement des amplificateurs opérationnels (AOP).
- U5.2 et U5.3 (LM324ADE4) : Amplifient le signal de tension obtenu à travers la résistance shunt (R6).
- R_Variable (100KΩ) : Permet de régler finement le gain du signal amplifié.

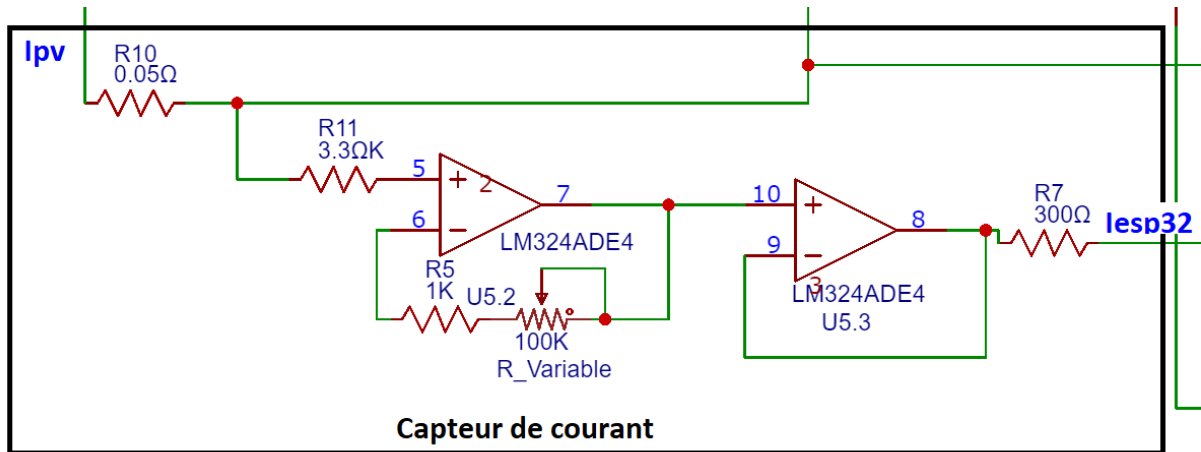


Figure 3. 12: Circuit du capteur de courant (PV).

Fonctionnement du Circuit

Entrée : Le courant traverse la résistance shunt R6, créant une faible chute de tension.

Amplification : Cette chute de tension est amplifiée par les AOP U5.2 et U5.3, avec un gain ajustable via le potentiomètre R_Variable.

Sortie : La tension amplifiée, proportionnelle au courant est disponible en sortie pour lue par un microcontrôleur ESP32.

À la fin de notre examen approfondi du circuit d'adaptation et de son fonctionnement, nous avons inclus un schéma illustrant le circuit d'adaptation complet.

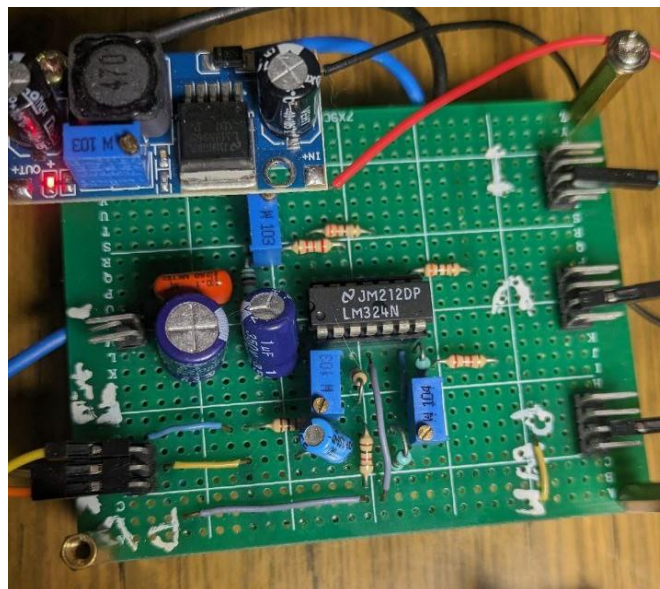


Figure 3. 13 : circuit d'adaptation

3.4. Réalisation du système :

Le schéma global du système réalisé est donné par la figure 3.14. Il est composé de cinq parties. Le générateur, le convertisseur DC-DC XL4015E, la charge, le circuit d'adaptation et le microcontrôleur ESP32.

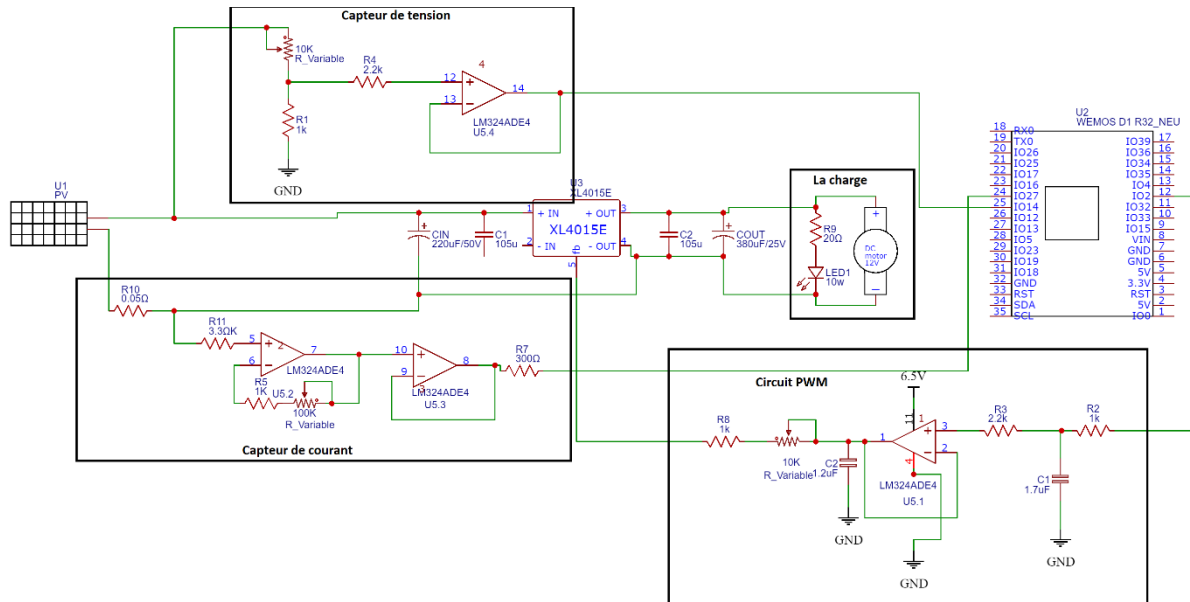


Figure 3. 14 : Schéma électrique du système

La photo de la figure 3.15 donne une vue globale du système et des tests réalisés. La photo de la figure 3.16 présente la charge du système. Elle est composée d'une LED de 10w, d'une résistance de protection et d'un refroidisseur utilisant un ventilateur à courant continu de 12V.

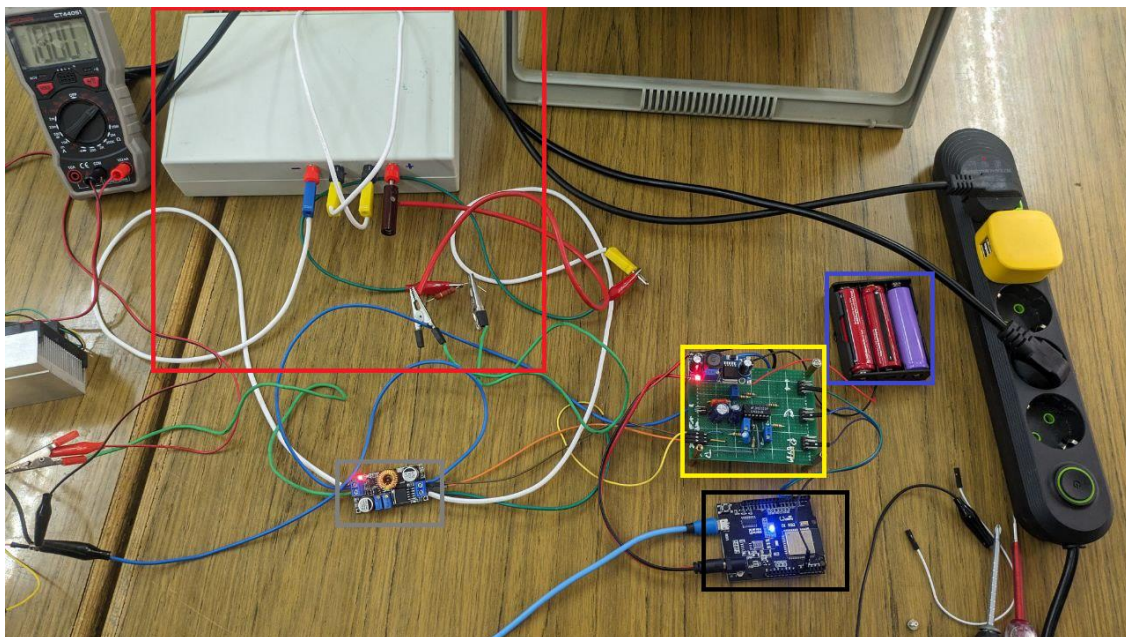


Figure 3. 15: circuit global de système MPPT

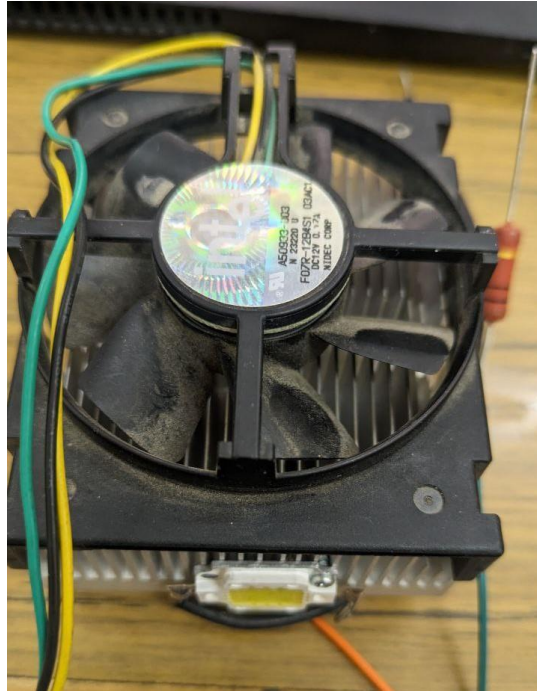


Figure 3. 16: la charge du système

Les différents blocs de la figure 3. 15 sont donnés comme suit :

1. Le bloc rouge représente un émulateur de PV (photovoltaïque)
2. Le bloc gris représente le convertisseur dc-dc (Buck) XL4015E
3. Le bloc jaune représente le circuit d'adaptation avec un Buck spécifique pour réguler la tension d'entrée des pile (le bloc bleu).
4. Le bloc bleu qui représente l'alimentation à piles, est le circuit d'alimentation du circuit d'adaptation et du microcontrôleur ESP32
5. Le bloc noir est le microcontrôleur ESP32 de type Wemos R1 S32.
6. Le dernier bloc représente la charge du système (figure 3.16).

3.5. Résultat du système avec les deux algorithmes :

Les figures 3.17 à 3.20 donnent les résultats pratiques des tests réalisés avec l'implémentation de l'algorithme P&O sur l'ESP32. Le test a émulé deux niveaux d'irradiations.

Tension de PV :

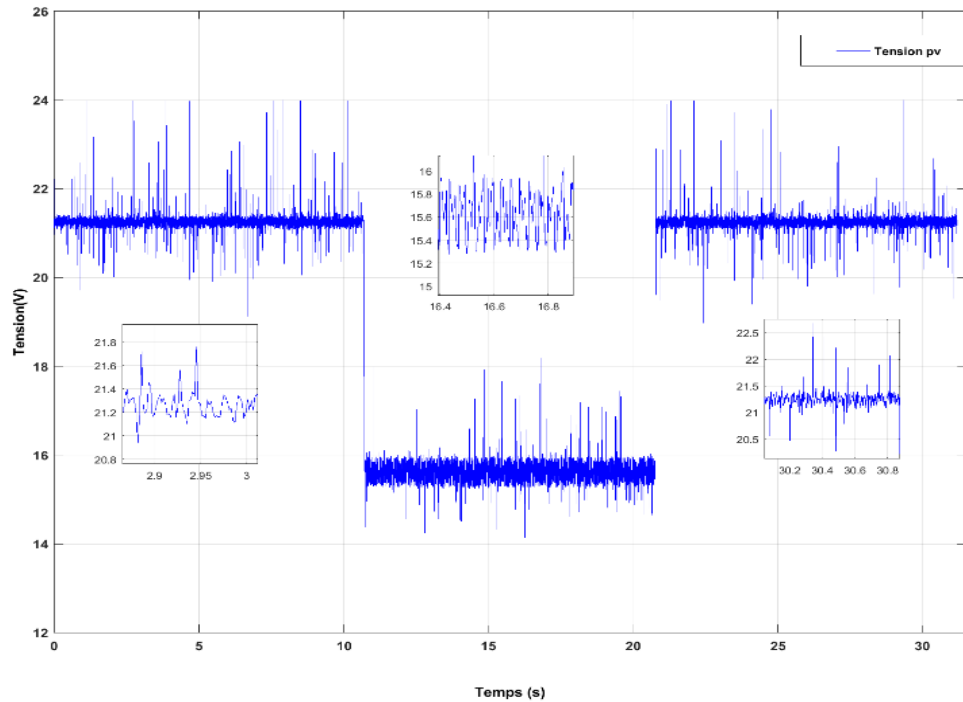


Figure 3. 17 : Tension du panneau solaire en fonction du temps (P&O)

Courant Ipv :

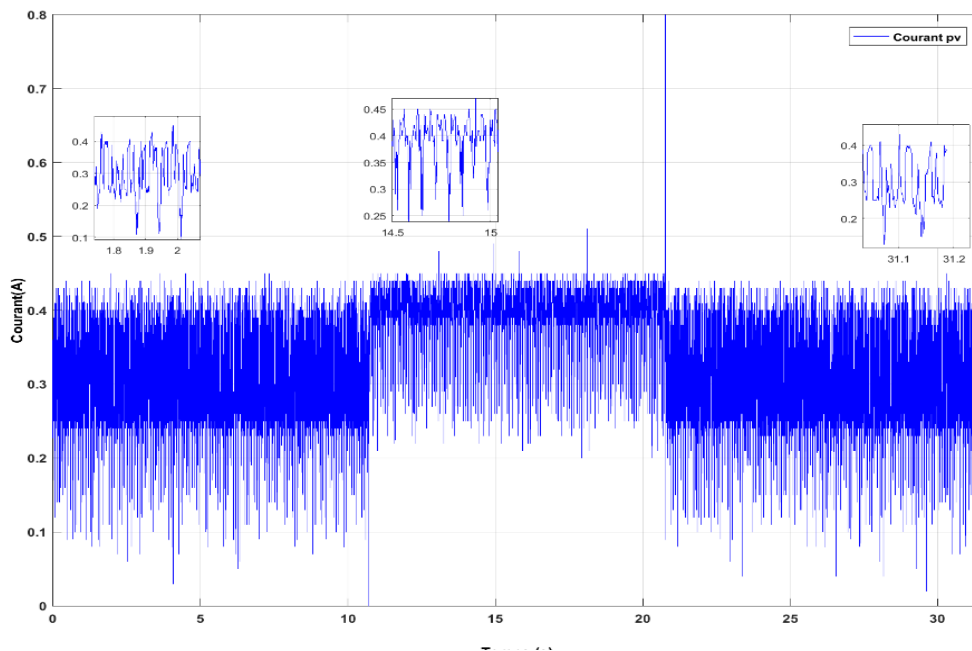


Figure 3. 18 : Courant du panneau solaire en fonction du temps (P&O)

La puissance du PV :

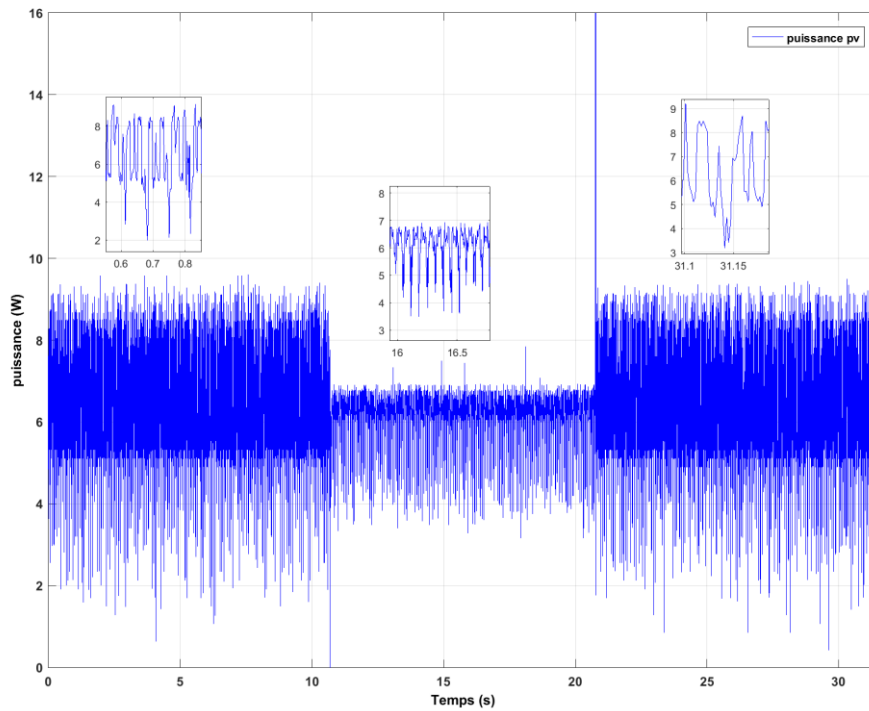


Figure 3. 19 : puissance du panneau solaire on fonction du temps (P&O)

Rapport cyclique (d) :

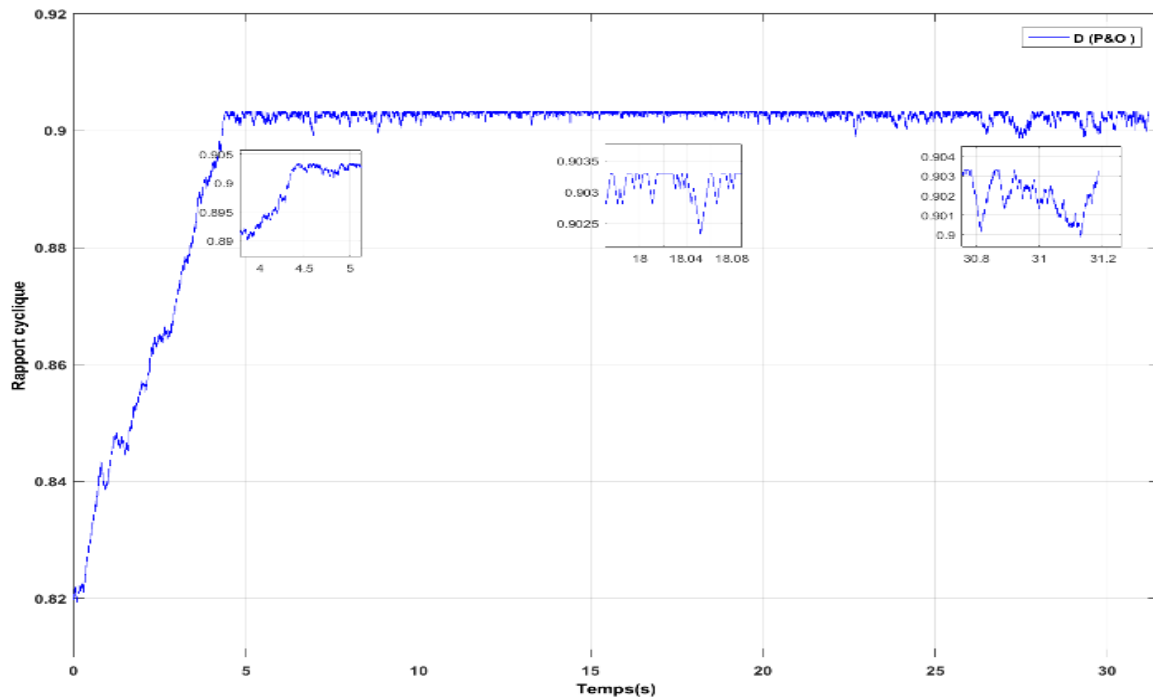


Figure 3. 20 : rapport cyclique de L'algorithme (P&O)

Les figures 3.21 à 3.24 donnent les résultats des tests réalisés avec l'implémentation de l'algorithme à base de logique floue. Le test a émulé les même deux niveaux d'irradiations.

Tension de PV :

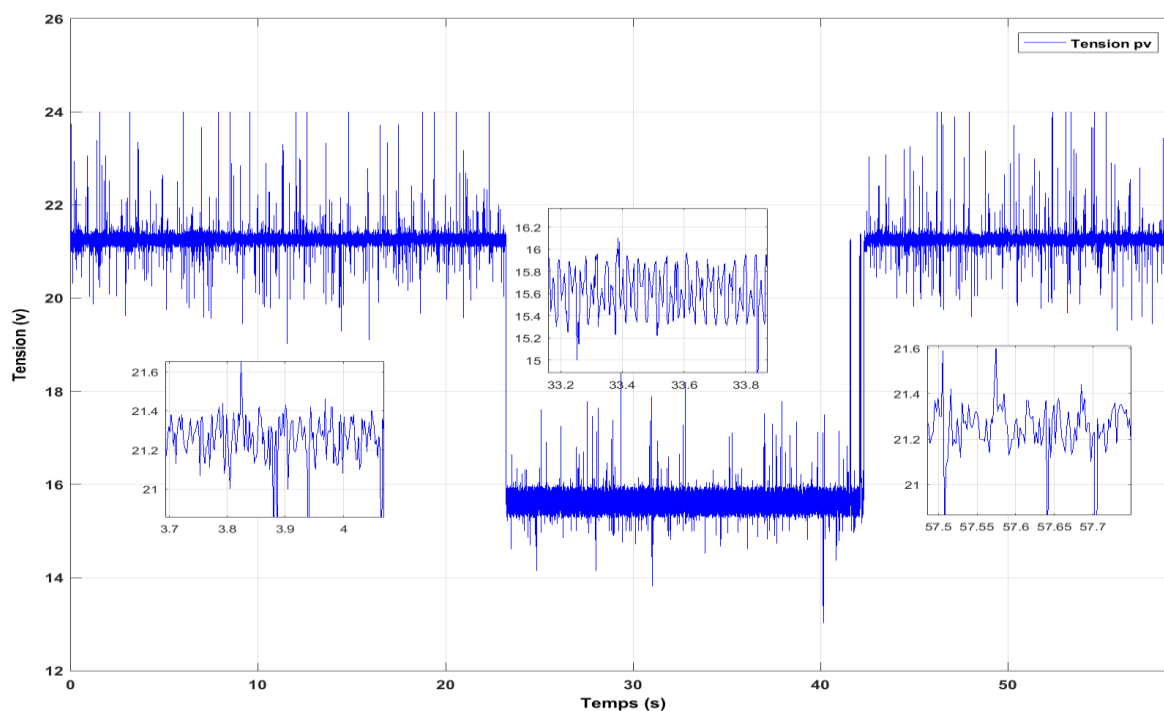


Figure 3. 21 : Tension du panneau solaire en fonction du temps (logique floue)

Courant Ipv :

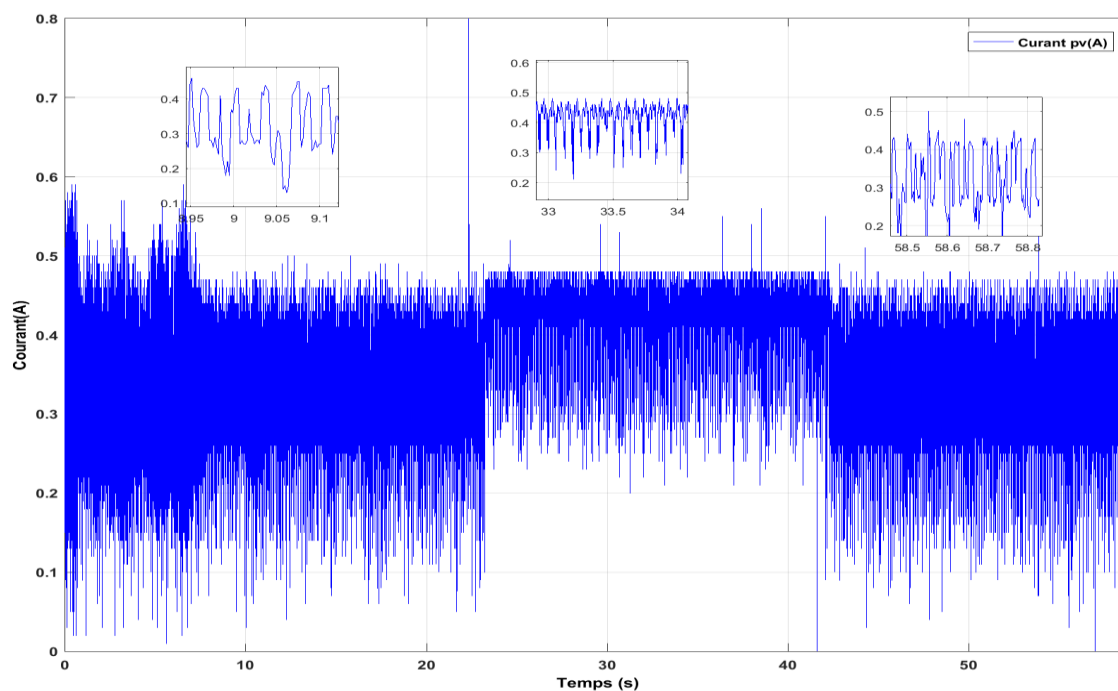


Figure 3. 22 : Courant du panneau solaire en fonction du temps (logique floue)

La puissance de PV :

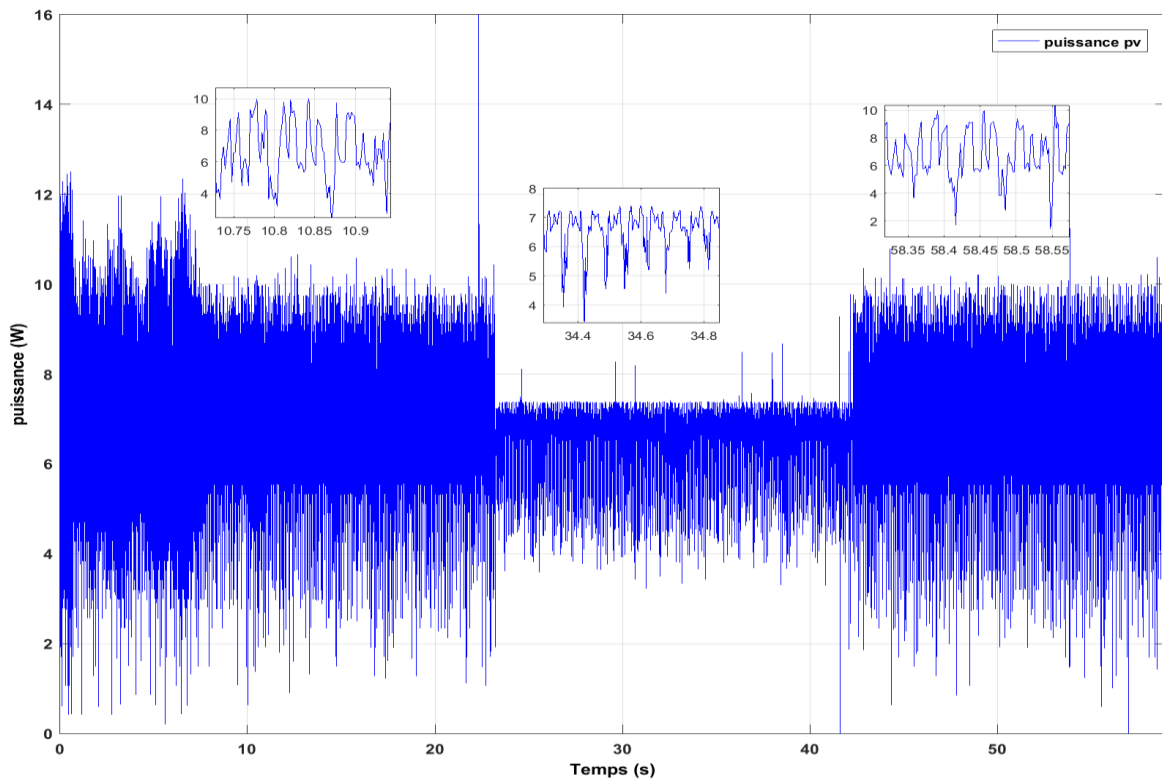


Figure 3. 23 : Puissance du panneau solaire on fonction du temps (logique floue)

Rapport cyclique (d) :

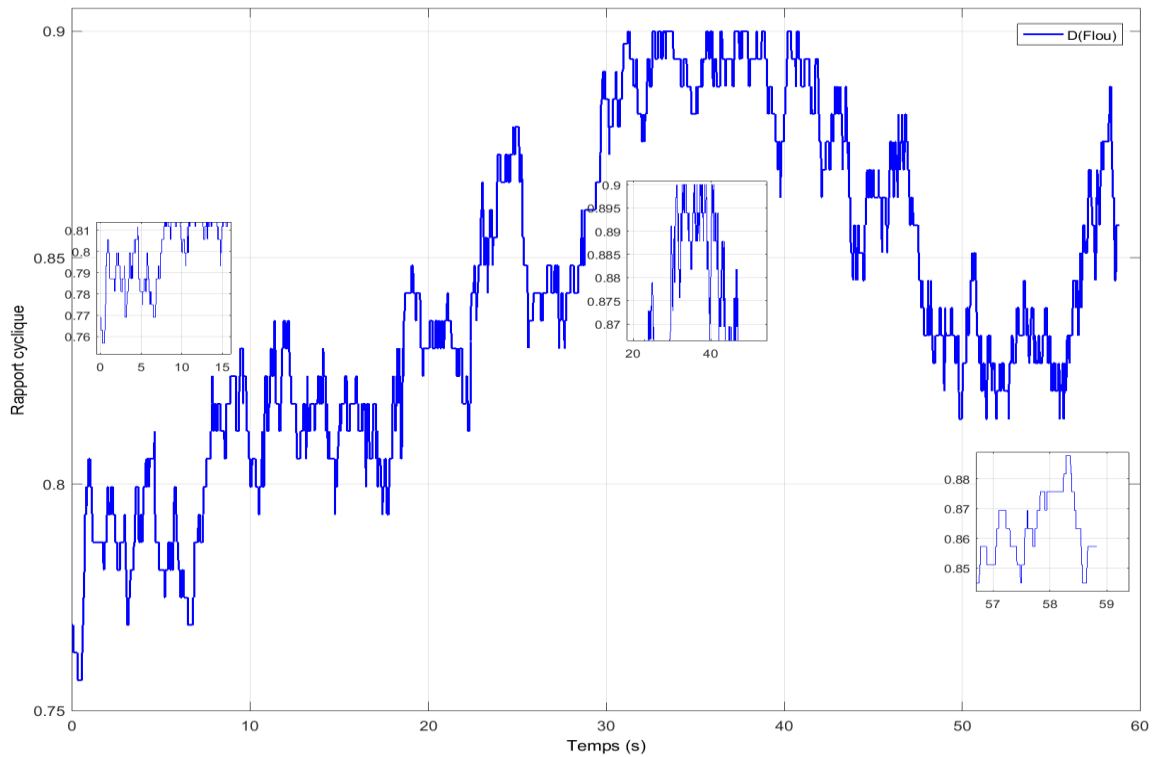


Figure 3. 24 : Rapport cyclique de L'algorithme (logique floue)

3.5.1. Comparaison des algorithmes

Dans cette section, nous comparons les deux algorithmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) utilisés pour optimiser la puissance des panneaux solaires : le Perturb and Observe (P&O) et la Logique Floue (FL). Les figures ci-dessous illustrent les résultats des simulations pour chaque algorithme, montrant la puissance de sortie du panneau solaire (P_{pv}) et le rapport cyclique (duty cycle).

La puissance de sortie du panneau solaire (P_{pv}) Algorithme P&O :

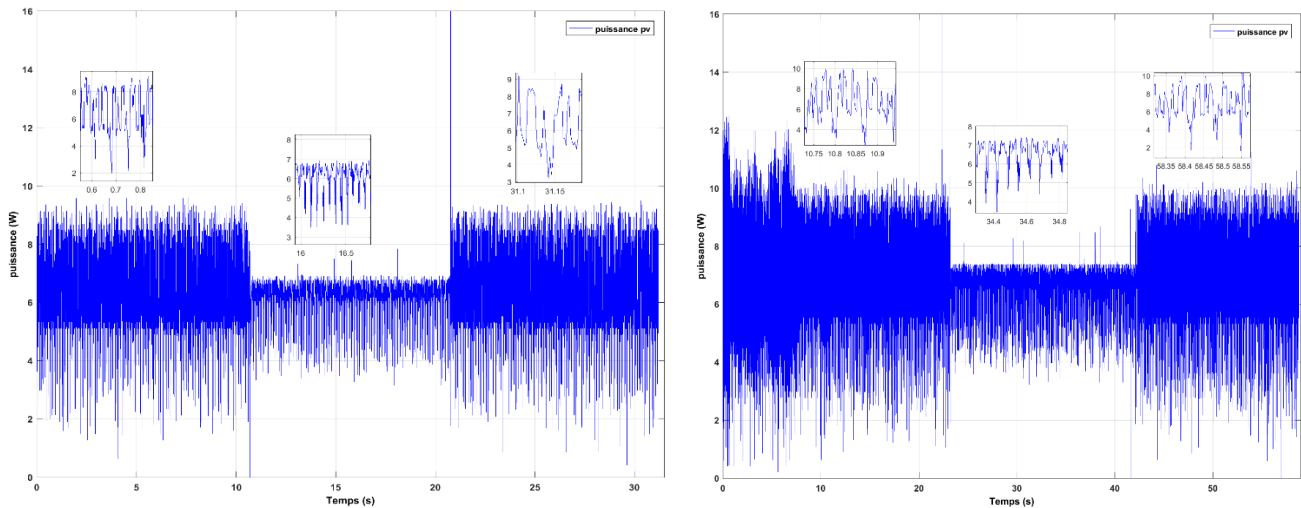


Figure 3. 25 : Comparaison entre les puissances avec l’algorithme P&O et l’algorithme logique floue

Puissance : La méthode de logique floue présente une meilleure stabilité et précision avec moins de fluctuations, bien que les deux méthodes montrent une réponse rapide aux variations de puissance.

Le rapport cyclique (Duty Cycle) :

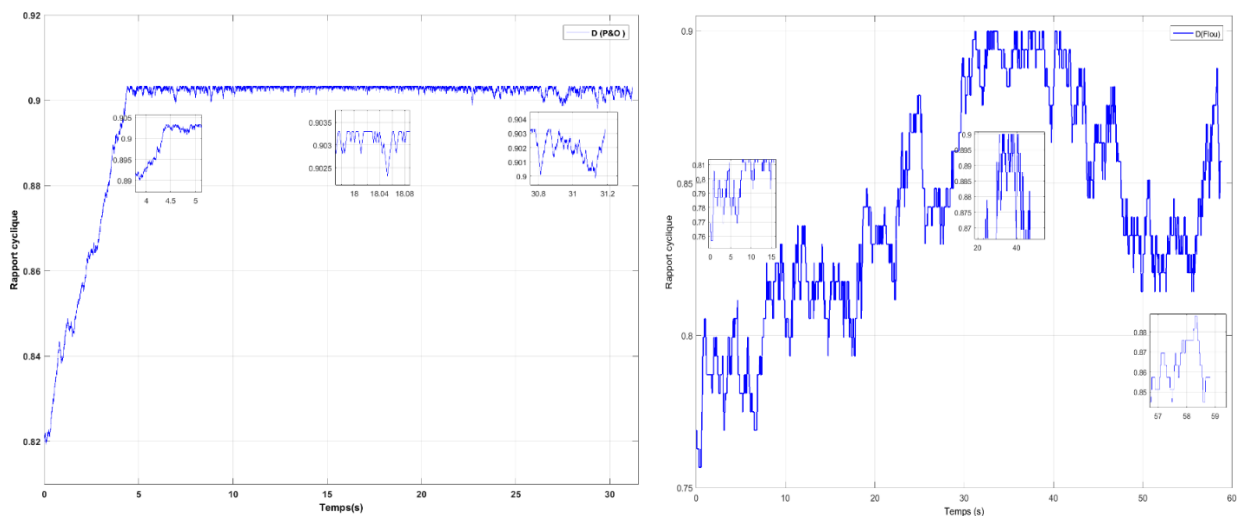


Figure 3. 26 : Comparaison du rapport cyclique dans les 2 algorithmes P&O et logique floue

Fuzzy Logic (logique floue) MPPT :

Haute Efficacité : La logique floue est connue pour sa haute efficacité car elle peut mieux gérer les systèmes non linéaires. Elle utilise un ensemble de règles et de fonctions d'appartenance pour prendre des décisions, ce qui permet des ajustements plus précis du cycle de service

Réponse Adaptative : La logique floue s'adapte plus efficacement aux conditions changeantes (comme l'irradiation et la température). Cela peut conduire à un taux d'efficacité plus élevé (par exemple, 99,8%) car le contrôleur peut rapidement et précisément trouver le point de puissance maximale.

Cycle de Service Fluctuant : La nature adaptative de la logique floue peut entraîner des fluctuations plus importantes du cycle de service. En effet, le contrôleur ajuste constamment le cycle de service pour maximiser la production d'énergie. Ces ajustements fréquents peuvent entraîner un cycle de service moins stable, car le contrôleur tente continuellement d'optimiser les performances en temps réel.

Perturb and Observe (P&O) MPPT:

Simplicité et Stabilité : L'algorithme P&O est plus simple et repose sur la perturbation périodique (modification) du cycle de service et l'observation du changement de la production d'énergie. En fonction de l'augmentation ou de la diminution de la puissance, l'algorithme ajuste le cycle de service en conséquence.

Cycle de Service Stable : Le P&O tend à avoir un cycle de service plus stable car il effectue des ajustements graduels et périodiques plutôt que continus et rapides. Cela peut rendre la production d'énergie moins optimale mais plus stable dans le temps.

Moins Adaptatif : L'algorithme P&O peut ne pas réagir aussi rapidement aux changements rapides des conditions environnementales, ce qui conduit à une efficacité globale légèrement inférieure par rapport aux contrôleurs logiques flous.

Le Comportement du Cycle de Service Diffère :

Contrôle Adaptatif : Les contrôleurs logiques flous s'adaptent en temps réel, ce qui peut entraîner des fluctuations plus importantes du cycle de service car ils cherchent constamment à optimiser la production d'énergie.

Ajustement Périodique : Le P&O effectue des ajustements périodiques, conduisant à un cycle de service plus stable mais potentiellement moins optimal.

Efficacité et Stabilité : Dans les applications pratiques, le choix entre ces algorithmes implique souvent un compromis entre efficacité et stabilité. Les contrôleurs logiques flous peuvent atteindre une efficacité plus élevée mais pourraient nécessiter des techniques de filtrage ou d'amortissement plus sophistiquées pour stabiliser le cycle de service. À l'inverse, le P&O offre simplicité et stabilité mais peut ne pas toujours atteindre l'efficacité maximale possible.

Pour atténuer les fluctuations du cycle de service dans le MPPT à logique floue, nous pouvons envisager de mettre en œuvre des techniques telles que :

Filtrage : Appliquer des filtres pour lisser les variations du cycle de service.

Approches Hybrides : Combiner la logique floue avec d'autres stratégies de contrôle pour équilibrer stabilité et efficacité.

Ajustement : Modifier les fonctions d'appartenance et les règles dans le contrôleur logique flou pour réduire les fluctuations excessives.

Ces ajustements peuvent aider à obtenir un cycle de service plus stable tout en maintenant une haute efficacité.

3.5.2. Rendement globale de système :

Tableau 3. 1 : Critère de performance des contrôleurs MPPT : le rendement

Méthode Condition	P&O	Logique flou
Rendement	92,85%	99,675%

La logique floue démontre une nette supériorité en termes de rendement par rapport à l'approche traditionnelle de l'algorithme P&O, ce qui suggère son potentiel pour une meilleure performance dans des conditions variées.

3.6. Conclusion :

Nous avons observé une robustesse des convertisseur DC-DC adaptés et nous avons aussi constaté que l'algorithme de logique floue peut attendre un meilleur rendement comparé à l'algorithme P&O. Les résultats obtenus ont montré une augmentation du rendement de 92,85 % à 99,67 %. Néanmoins, en présence des bruits dans la mesure de I_{pv} et V_{pv} , l'algorithme à base de logique floue diverge complètement du point de puissance maximale, contrairement à l'algorithme P&O qui demeure relativement stable.

Pour remédier à ce problème, nous proposons d'introduire des filtres numériques dans l'algorithme à base de logique floue et d'introduire des filtres analogiques au niveau du circuit d'adaptation. De plus, il est possible de travailler avec des ADCs de résolutions supérieurs à 12 bits assurée par l'ESP32.

Conclusion

Dans ce travail, nous avons exploré le système photovoltaïque dans son ensemble, en mettant en lumière ses principaux composants, notamment les techniques de recherche de point de puissance maximale (MPPT). Ensuite, nous avons examiné le fonctionnement des hacheurs et leur intégration dans le système MPPT, ainsi que les commandes associées, en utilisant des simulations simples pour évaluer les points forts des algorithmes P&O et de la logique floue.

La partie pratique de notre travail a été essentielle, démontrant plusieurs aspects concrets, en commençant par la modification (adaptation) d'un convertisseur abaisseur (Buck) à sortie fixe en un convertisseur abaisseur (Buck) à sortie variable avec une commande proportionnelle aux rapports cycliques calculés par les algorithmes MPPT. Nous avons observé un fonctionnement linéaire quasi parfait entre le rapport cyclique et la tension de sortie des convertisseurs DC-DC adaptés. Nous avons aussi constaté une robustesse dans le fonctionnement des convertisseurs DC-DC adaptés, similaire à celle du convertisseur DC-DC à sortie fixe.

Le deuxième aspect principal est le développement, la mise en œuvre et l'analyse du fonctionnement des algorithmes MPPT sur les microcontrôleurs à 32 bits tels que l'ESP32 d'ESPRESSIF SYSTEMS. Nous avons également conçu des algorithmes et identifié les points cruciaux à considérer lors de leur application. Cette phase pratique a révélé des défis qui ne se manifestent pas toujours lors des simulations, souvent considérées comme des cas idéaux.

À partir des résultats obtenus, nous avons constaté, à titre d'exemple, que l'algorithme de logique floue peut atteindre un meilleur rendement comparé à l'algorithme P&O. Une augmentation du rendement de 92,85 % à 99,67 % a été enregistrée. Toutefois, avec l'ajout de bruit dans l'acquisition de I_{pv} et V_{pv} , l'algorithme à base de logique floue s'écarte complètement du point de puissance maximale, contrairement à l'algorithme P&O qui reste relativement stable. Pour rectifier ce problème, nous envisageons d'insérer un filtrage numérique et d'incorporer des filtres analogiques dans le circuit de capture de I_{pv} et V_{pv} .

En fin de compte, cette étude a permis de mieux comprendre non seulement les théories sous-jacentes aux systèmes photovoltaïques et aux techniques MPPT, mais aussi les défis pratiques rencontrés lors de leur implémentation réelle.

Références bibliographiques

- [1]. Chapitre II Convertisseur de puissance DC/DC. (2024). retrieved April 29, 2024, from dspace.univ-tiaret.dz
- [2] : ZIAT SoheirIbtissem et MEDJAHED nour el houda , «Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque commandé par la commande MPPT (P&O)», Mémoire Master, Universitaire Belhadj Bouchaib -Ain-Temouchent 2020.
- [3]: Buck Converters (Step-Down Converter). (2024). retrieved April 29, 2024, from www.monolithicpower.com
- [4]: Buck Converter: Basics, Working, Design & Application. (2024). retrieved April 29, 2024, from www.how2electronics.com
- [5]: Boost Converter: Basics, Working, Design & Application. (2024). retrieved April 29, 2024, from how2electronics.com
- [6] : Alain Bilbao Learreta « Réalisation d'une commande MPPT numérique » LAAS /CNRS
- [7] : Femia, N., Pétrone, G., Spagnuolo, G., Vitelli, M. (2004). *Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method*. IEEE Transactions on Power Electronics. Vol.20, N. 4, pp. 16-19
- [8]: Naffouti, S. (2012). *Dimensionnement et commande d'un hacheur parallèle alimenté par une source photovoltaïque* [Mémoire de projet de fin d'étude, Université de Monastir, Tunisie].
- [9] : Mahmoud, A., & Issam, B. (2017). Maximisation de la production d'un système photovoltaïque à base de MPPT soumis à des éclaircissements différents [Mémoire de master, Université BADJI MOKHTAR Annaba].
- [10]: A. Belkaid, «Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance Pour une chaine de conversion photovoltaïque autonome », thèse de doctorat, Université Sétif 1-Sétif 2015.
- [11] : CHERIFI, F., & HADDADI, R. (2023). "Optimisation par la logique floue d'un système photovoltaïque." Mémoire Master, Université Abderrahmane Mira - Béjaïa
- [12] : R.Boukenoui, H.Salhi, R.Bradai, A.Mellit, " A NeW Intelligent MPPT Method For Stand-Alone Photovoltaic Systems Operating Under Fast Transient Variations Of Shading Patterns ", Solar Energy 124 (2016) 124-142