



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
de la Recherche scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued
Faculté de Technologie
Mémoire de Fin d'Études

**En vue de l'obtention du diplôme de
MASTER ACADEMIQUE**
Faculté de la Technologie Filière : Electrotechnique
Spécialité : Réseaux Electriques

Réalisé par: Nesri Abdelfateh , Bekkouche Mohammed

Thème

**Stratégie de contrôle pour maximiser
la puissance d'un système
photovoltaïque**

Devant le jury composé de:

Mr. Maamir Madiha
Mr. Chérif Hakima
Mr. Taouil Slimane

Université Echahid Hamma Lakhdar
Université Echahid Hamma Lakhdar
Université Echahid Hamma Lakhdar

Encadreur
Président
Examineur

2023-2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ

الرَّحِيمِ

Merci,

J'ai le plaisir de consacrer ces quelques lignes en guise d'expression de remerciements et d'appréciation à tous ceux qui ont contribué à la préparation de cet ouvrage. Je voudrais rendre un hommage particulier à ma directrice de recherche, Mme MAAMIR MADIHA, qui a suivi de près ce projet avec sérieux et compétence. J'espère que vous trouverez ici l'expression de ma profonde gratitude pour l'intérêt constant qu'elle a porté au projet, pour sa présence continue et pour le soutien précieux qu'elle m'a apporté.

Dédicace

Je dédie ce mémoire

***A ma très chère maman et à mon père,
sources de soutien et d'inspiration.***

À moi-même.

Merci à vous tous.

ملخص:

تعتبر الطاقة الشمسية من مصادر الطاقة المتجددة الهامة، إلا أن الحصول على أقصى قدر من الطاقة المولدة يتأثر بدرجة الحرارة ومستوى الإشعاع الضوئي. لذا، يُعتبر تتبع نقطة الطاقة القصوى باستخدام طريقتي التحكم الضبابي و التحكم عن طريق الإزعاج والمراقبة ضروريًا للحفاظ على أعلى مستوى من الطاقة المولدة من الألواح الشمسية. تم تطبيق هذا النهج الأخير تطبيق عملي لتحقيق أقصى استفادة من الطاقة المولدة من الألواح الكهروضوئية تحت ظروف متغيرة مثل درجة الحرارة ومستوى الإشعاع الضوئي. وختامًا، أظهرت نتائج ذلك فعالية في إيجاد الحلول المثلى لتحقيق أقصى استفادة من الطاقة تحت ظروف متفاوتة.

الكلمات المفتاحية : [MPPT ، P&O ، المنطق الضبابي، Matlab/Simulink]

Résumé :

L'énergie solaire est une source importante d'énergie renouvelable, cependant, l'obtention de la puissance maximale générée est influencée par la température et le niveau de rayonnement lumineux. Par conséquent, il est nécessaire de suivre le point de puissance maximale (MPPT) en utilisant les techniques de contrôle flou logique (FLC) et de contrôle par perturbation et observation (P&O) pour maintenir le plus haut niveau de puissance générée par les panneaux solaires. Cette dernière approche a été mise en œuvre de manière pratique pour optimiser l'énergie générée par les panneaux photovoltaïques sous des conditions variables telles que la température et le niveau de rayonnement lumineux. En conclusion, les résultats montrent l'efficacité de cette méthode dans la recherche des solutions optimales pour maximiser l'énergie sous diverses conditions.

Mots clés : [MPPT, P&O, Logique Fuzzy, Matlab/Simulink]

Summary:

Solar energy is an important source of renewable energy; however, achieving the maximum generated power is influenced by temperature and light radiation levels. Therefore, tracking the maximum power point (MPPT) using fuzzy logic control (FLC) and perturbation and observation (P&O) control methods is essential to maintain the highest level of power generated by solar panels. This latter approach was practically implemented to optimize the energy generated by photovoltaic panels under varying conditions such as temperature and light radiation levels. In conclusion, the results demonstrate the effectiveness of this method in finding optimal solutions to maximize energy under diverse conditions.

Keywords: [MPPT, P&O, Fuzzy Logic, Matlab/Simulink]

Table des matières

LISTE DES FIGURES	10
LISTE DES TABLEAUX	13
Introduction générale	16
Chapitre I :Généralités sur les système photovoltaïques	18
I.1. Introduction.....	19
I.2. Rayonnement solaire	19
I.3. Celluleet principe de photovoltaïque :	20
I.4. Type de cellule photovoltaïque :	21
I.4.1. Cellules monocristallines :	21
I.4.2. Cellules poly-cristallines :	22
I.4.3. Cellules amorphes :	22
I.4.4. Rendement d'une cellule :	23
I.5. Système Photovoltaïque :	24
I.6. Module photovoltaïque :	24
I.7. Générateur photovoltaïque :	25
I.8. Types de connexions de cellules photovoltaïques :	25
I.8.1. Monter ses panneaux solaires en série :	25
I.8.2. Monter ses panneaux solaires en parallèle.....	26
I.8.3. Mix série/parallèle de modules photovoltaïques	26
I.9. Champ photovoltaïque :	27
I.10. Différentes connexions des systèmes photovoltaïques :	28
I.10.1. La connexion directe :	28
I.10.2. Systèmes PV connectés au réseau :	28
I.10.3. Convertisseurs DC-DC:.....	29
I.11. Les type des convertisseurs de tension DC/DC :	30

I.11.1. Convertisseur boost:	30
I.11.2. Convertisseur Buck	31
I.11.3. Le convertisseur Buck-Boost :	34
I.11.4. Onduleur	36
I.12. Conclusion :	36
Chapitre II :Modélisation et commande MPPT de systèmephotovoltaïque	37
II.1. Introduction :	38
II.2. Modélisation d'un panneau photovoltaïque :	38
II.3. Simulation du panneau PV sous Matlab	39
II.4. Résultats de simulation :	42
II.4.1. Caractéristique I-V :	42
II.4.2. Caractéristique P-V :	42
II.5. Modélisation des hacheurs :	45
II.5.1. Simulation du Convertisseur Boost :	45
II.5.2. Résultat de la simulation:	46
II.6. Commande MPPT :	47
II.6.1. Principe De La Commande MPPT	47
II.6.2. Différents types de commandes MPPT	48
II.6.2.1. Méthodes Classiques:	48
II.6.2.2. Méthodes Intelligentes:	48
II.6.3. Algorithme basé sur la perturbation et l'observation (P&O) :	49
II.6.4. Simulation avec la commande P&O	51
II.6.5. Résultat de simulation :	51
II.6.5.1. Simulation sous des conditions climatiques stables :	51
II.6.5.2. Simulation sous des conditions climatiques variables :	53
II.6.6. Analyse des résultats de P&O :	54

II.6.6.1.	Simulation sous des conditions climatiques stables :	54
II.6.6.2.	Simulation sous des conditions climatiques variables :	54
II.7.	Les algorithmes MPPT basés sur le principe de la logique floue	55
II.7.1.	Principe de la logique floue :	55
II.7.2.	Structure générale d'un système flou :	55
II.7.3.	Contrôleur flou (FLC) utilisé avec un pas variable :	56
II.7.4.	Simulation avec la commande FLC :	58
II.7.5.	Résultat de simulation :	60
II.7.5.1.	Simulation sous des conditions climatiques stables :	60
II.7.5.2.	Simulation sous des conditions climatiques variables :	61
II.7.6.	Analyse des résultats de FLC:	62
II.7.6.1.	Simulation sous des conditions climatiques stables :	62
II.6.6.2.	Simulation sous des conditions climatiques variables :	63
II.8.	Conclusion:	64
Chapitre III :Réalisation des systèmes de commande MPPT		65
III.1.	Introduction :	66
III.2.	Réalisation du hacheur Boost :	66
III.2.1.	Réalisation de circuit imprimé :	66
III.2.2.	Soudure des composants électroniques	67
III.3.	Différents composants du système :	68
III.3.1.	Capteurs de tension/courant utilises :	68
III.3.1.1.	Définition sur les capteurs	68
III.3.1.2.	Capteur de courant Transducer LA 25-NP:	69
III.3.1.3.	Capteur de tension (LV 28-P Voltage Transducer):	69
III.3.2.	L'unité de commande :	70
III.3.2.1.	Définition de la carte Arduino Mega2560:	70

III.3.2.2. Présentation de la carte Arduino Mega 2560 :.....	70
III.3.3. Fiche technique du PV utilise :.....	71
III.4. Montage du système complet :.....	72
III.5. Test et Résultat :.....	73
III.5.1. Test de l'hacheur boost :.....	73
III.6. Les caractéristiques pratique de système PV à vide :	74
III.6.1. Résultats:.....	75
III.7. Caractéristiques pratique de système PV à charge :.....	75
III.7.1. Résultats pratiques sans changement d'éclairement :	75
III.7.2. Résultats pratiques avec changement d'éclairement :.....	77
III.8. Conclusion :	80
Conclusion générale	82
Bibliographie	83
Annexe:.....	87

LISTE DES FIGURES

Chapitre I :

Figure (I.1): Composante du rayonnement global sur un plan horizontal.....	20
Figure (I.2) : Schéma d'une cellule élémentaire	21
Figure (I.3): Cellule monocristallin.....	22
Figure (I.4): Cellule polycristallin.....	22
Figure (I.5): Cellule amorphes.	23
Figure (I.7): montage en série [18]	26
Figure (I.8): montage en parallèle [18].....	26
Figure (I.9): montage hybride [18]	27
Figure (I.10): Champ photovoltaïque	27
Figure (I.11): Connexion directe d'un panneau photovoltaïque	28
Figure (I.12): Schéma de principe d'un hacheur.	29
Figure (I.13): Convertisseur élévateur (Boost).....	30
Figure (I.14): Tensions et courants d'entrée et de sortie en D et Ts pour un Boost...30	
Figure (I.15): Circuit électrique du Hacheur abaisseur.	32
Figure (I.16): Forme d'ondes des tensions et des courants d'entrée et de sortie du « Buck » en fonctions du rapport cyclique D et la période Ts.	33
Figure (I.17): Circuit équivalent du convertisseur Buck-Boost.	34
Figure (I.18): Tensions et courants du convertisseur Buck-Boost.	35

chapitre II :

Figure II.1: Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque	38
Figure II.2: Schéma du calcul de I_0 sous Simulink.....	39
Figure II.3: Schéma du calcul de I_{rs} sous Simulink.	40
Figure II.4: Schéma du calcul de I_{sh} sous Simulink.	40
Figure II.5: Schéma du calcul de I_{ph} sous Simulink.....	40
Figure II.6: Schéma du calcul de I sous Simulink.....	41

Figure II.7: Schéma du système complet sous Simulink.....	41
Figure II.8: Caractéristiques I-V du module photovoltaïque.....	42
Figure II.9: Caractéristique I/V d'un panneau PV	42
Figure II.10: Influence de la température sur la puissance du PV.....	43
Figure II.11: Influence de la température sur le courant du PV.	43
Figure II.12: Caractéristiques de puissance du champ PV pour une variation de l'éclairement.....	44
Figure I.13: Caractéristiques de courant du champ PV pour une variation de l'éclairement.....	44
Figure II.14: Simulation de le convertisseur boost avec système PV	45
Figure II.15: Tensions de sortie convertisseur Boost pour $\alpha=0.3$	46
Figure II.17: Tensions de sortie convertisseur Boost pour $\alpha=0.8$	46
Figure II.18: Organigramme de l'algorithme P & O.....	49
Figure II.19: Algorithme P&O sous l'évolution rapide d'irradiation.....	50
Figure II.20: Simulation avec la méthode P & O	51
Figure II.21 : Caractéristiques Puissance (W).....	52
Figure II.22: Caractéristiques Courant (A).....	52
Figure II.23: Caractéristiques Tension (V).....	53
Figure II.24: Profile de l'éclairement.	53
Figure II.25 : Profile de puissance.....	54
Figure II.26: Structure générale d'un système basé sur la logique floue	56
Figure II.27 :Bloc du calculateur de pas variable FLC proposé.....	56
Figure II.28 :: Les fonctions d'appartenance des entrées.....	57
Figure II.29: Les fonctions d'appartenance de la sortie.....	57
Figure II.30: Simulation avec la méthode FLC.	59
Figure II.31: Schéma bloc de l'algorithme MPPT basé sur la logique floue	59

Figure II.32 :Profile de l'éclairement.	60
Figure II.33: Caractéristiques Courant (A).....	61
Figure II.34: Caractéristiques Tension (V).....	61
Figure II.37 : Profile de l'éclairement.	62
Figure II.38 : Profile de puissance.....	62

chapitre III :

Figure(III-.1) : Circuit imprimé du hacheur réalisé.....	67
Figure(III-.3) : schema de la capteur tension et le courant	68
Figure(III-.5) : Capteur de tension (LV 28-P)	69
Figure(III-.7) Module DSP-80M	72
Figure(III-.8) : Système PV réalisé.	72
Figure(III-.10) :Résulta du courant el la tension	73
Figure(III-.11) : Caractéristique P/V	74
Figure(III-.12) : Caractéristique I/V	74
Figure(III-.14): Courant de panneau photovoltaïque	76
Figure(III-.15): La tension de panneau photovoltaïque	76
Figure(III-.16): Rapport cyclique de l'hacheur.....	77
Figure(III-.17): Caractéristique puissance de PV	78
Figure(III-.18): Caractéristique Courant de PV	78
Figure(III-.19): Caractéristique La tension de PV	79
Figure(III-.20): Rapport cyclique de l'hacheur.....	79

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau (1.1):</i> Différent types des cellules avec leur rendement.	23
Tableau (II-1) :La valeur de la tension pour trois valeurs différentes α	47
Tableau (II-2) : Les règles utilisées pour déterminer la sortie Δd	58
Tableau (III-1) :Caractéristique du PV 80W	71

Abréviations et Symboles

E ::	Eclairement (W/m ²).
I _{Ph} :	Le photo-courant (A).
I :	Le courant généré par la photopile(A).
I _{RS} :	Le courant de saturation inverse de la diode.
I ₀ :	Le courant de saturation.
I _{sc} :	Le courant du court-circuit(A).
I _{Pv} :	Courant délivré par le générateur PV (A).
V :	la tension aux bornes de la cellule(V).
q :	La charge de l'électron =1,6.10 ⁻¹⁹ C.
R :	La résistance série (Ω).
R _{sh} :	La Résistances shunt (Ω).
T :	La température de fonctionnement en Kelvin.
n :	le facteur d'idéalité de la diode.
I _{Sh} :	Le courant de la résistance shunt.
V _{OC} :	Tension de circuit ouvert.
I _{CO} :	Le courant de circuit ouvert.
I _{CC} :	Courant de court-circuit.
PPV :	la puissance disponible en sortie du GPV.
VPV :	la tension à la sortie du GPV.
IPV :	le courant de sortie du GPV.
N _s :	cellules en série.
N _p :	cellules en parallèle.
P :	La puissance caractéristique(W).
V _{opt} :	Tension optimale (V).
I _{opt} :	Courant optimale (A).
G :	L'éclairement de référence (1000 W/m ²).
L :	Inductance du hacheur.
D:	Rapport cyclique.
MPP	maximum power point tracking.
T:	
PPM	point de fonctionnement optimale.
:	
DC-	conversion continu-continu.
DC :	
P&O:	Perturb and Observe.
FLC :	Fuzzy Logic Controller

Introduction générale

Introduction générale

Face à l'épuisement des ressources énergétiques fossiles et aux problèmes environnementaux causés par les émissions de gaz à effet de serre lors de leur utilisation, il est devenu essentiel de développer d'autres sources d'énergie alternatives. Les énergies renouvelables se présentent comme une solution écologique, offrant une alternative aux combustibles fossiles et à l'énergie nucléaire.

Elles ont l'immense avantage d'être naturelles, inépuisables, non polluantes et parfaitement adaptées à une production décentralisée.

L'exploitation de ces sources d'énergie permettrait de fournir de l'électricité aux zones isolées, éloignées des réseaux électriques, tout en évitant la nécessité de construire de nouvelles lignes électriques qui exigent des investissements importants .

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) connaît une utilisation croissante dans diverses applications terrestres telles que l'éclairage, les télécommunications et le pompage .

Les systèmes PV fonctionnent sans avoir besoin de combustible externe, et les générateurs eux-mêmes ne contiennent aucune pièce mobile, ce qui réduit considérablement les besoins en entretien. Par conséquent, les coûts d'exploitation et de maintenance réguliers sont relativement bas.

C'est pourquoi cette source d'énergie est particulièrement adaptée aux milieux ruraux, où les populations sont dispersées en petites communautés et où la demande énergétique est relativement faible [16].

Le générateur PV ayant une caractéristique courant-tension non linéaire et présentant un point de puissance maximale (PPM) [22].

Cette caractéristique dépend du niveau d'éclairement et de la température, ainsi que du vieillissement de l'ensemble. Le point de fonctionnement du générateur PV peut donc varier entre les points extrêmes correspondants au courant de court-circuit et la tension en circuit ouvert. La détermination du point de fonctionnement du générateur PV dépend directement de la charge à laquelle il est connecté. La puissance maximale disponible est fournie seulement en un seul point de fonctionnement donné [28].

Afin d'optimiser l'utilisation de l'énergie fournie par le générateur photovoltaïque, l'utilisation de techniques d'optimisation, de régulation et de contrôle permet d'augmenter le rendement global du système photovoltaïque.

Ces techniques permettent de transférer la puissance électrique maximale du générateur

photovoltaïque à la charge, indépendamment des variations de l'éclairement et de la température.

Cela permet une gestion efficace de l'énergie disponible, améliorant ainsi le rendement global de l'installation photovoltaïque [26].

Les techniques MPPT (maximum power point tracking) sont utilisées dans les systèmes photovoltaïques pour maximiser la puissance délivrée par le panneau photovoltaïques en

L'objectif de ce travail est de fournir une meilleure compréhension des performances d'un convertisseur DC-DC configuré par un contrôle numérique lorsqu'il est connecté à un générateur photovoltaïque et d'optimiser sa tension de sortie pour obtenir une source fiable pouvant être utilisée comme générateur électrique.

Pour présenter notre travail de manière optimale, cette recherche sera organisée comme suit :

Dans le premier chapitre, nous avons présenté des informations générales sur les générateurs photovoltaïques et certains types de convertisseurs DC-DC utilisés, ainsi qu'une introduction aux systèmes photovoltaïques

Dans le deuxième chapitre, nous avons étudié le modèle électrique et mathématique des cellules et des modules photovoltaïques (le générateur photovoltaïque). Nous avons également expliqué certaines techniques d'optimisation, de régulation et de contrôle MPPT, puis nous avons présenté les résultats de l'optimisation de la puissance du générateur photovoltaïque en utilisant les méthodes P&O et le contrôle par logique floue, obtenus à partir de simulations réalisées avec Matlab/Simulink.

Dans le troisième chapitre, nous nous sommes principalement concentrés sur une procédure permettant de suivre le point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking, MPPT) d'un générateur photovoltaïque (GPV), afin d'assurer une exploitation optimale du générateur photovoltaïque.

Cela nécessite la mise en œuvre d'une technique de suivi du point de puissance maximale, telle que la méthode de perturbation et observation (Perturbation-Observation, P&O). Ainsi, dans ce projet, nous avons analysé la modélisation et la simulation des performances électriques d'un système photovoltaïque configuré par un contrôle numérique (contrôle MPPT : "Perturbation et Observation") garantissant le suivi de la puissance maximale fournie par le générateur photovoltaïque sous un rayonnement uniforme et non uniforme.

Enfin, nous concluons cette recherche par un résumé général soulignant l'importance de notre étude.

Chapitre I :Généralités sur les système photovoltaïques

I.1. Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque est une source d'énergie renouvelable qui utilise la lumière du soleil pour produire de l'électricité. Elle est produite à partir de panneaux solaires composés de cellules photovoltaïques qui convertissent directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Cette technologie est de plus en plus utilisée dans le monde entier, notamment dans les régions où l'ensoleillement est important. Les avantages de l'énergie solaire photovoltaïque sont nombreux, notamment sa capacité à produire de l'électricité de manière propre et renouvelable, sans émissions de gaz à effet de serre ni pollution atmosphérique. Ce chapitre va présenter notre recherche bibliographique concernant l'utilisation de cette énergie. Tout d'abord, nous expliquerons le principe de l'énergie photovoltaïque. Ensuite, nous découvrirons les notions importantes à connaître pour se familiariser avec cette énergie. Enfin, nous présenterons les éléments d'un système photovoltaïque et les différentes technologies utilisées.

I.2. Rayonnement solaire

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique qui se situe dans une bande de longueurs d'onde allant de 0,22 à 10 microns (μm) [12]. L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement avec une puissance moyenne de 1,37 kilowatt par mètre carré (kW/m^2) à plus ou moins 3%, Cette puissance varie en fonction de la distance entre la Terre et le Soleil lors de sa rotation autour de celui-ci .Cependant, une partie de ce rayonnement est absorbée par l'atmosphère, ce qui fait que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre est généralement inférieure à 1,2 kW/m^2 (1200W/m2) [17]. La rotation et l'inclinaison de la terre entraînent également des variations de l'énergie disponible en un lieu donné en fonction de la latitude, de l'heure et de la saison. De plus, la présence de nuages, de brouillard, de particules atmosphériques et d'autres phénomènes météorologiques provoque des fluctuations horaires et quotidiennes qui modifient le rayonnement solaire et le rendent diffus .

Au niveau du sol le rayonnement global reçu par une surface plane d'inclinaison quelconque est constitué de trois composantes principales [9]:

- Rayonnement direct
- Rayonnement diffus
- Rayonnement réfléchi ou l'albédo

Rayonnement global : Un plan reçoit de la part du sol un rayonnement global qui est le résultat de la superposition des trois compositions direct, diffus et réfléchi

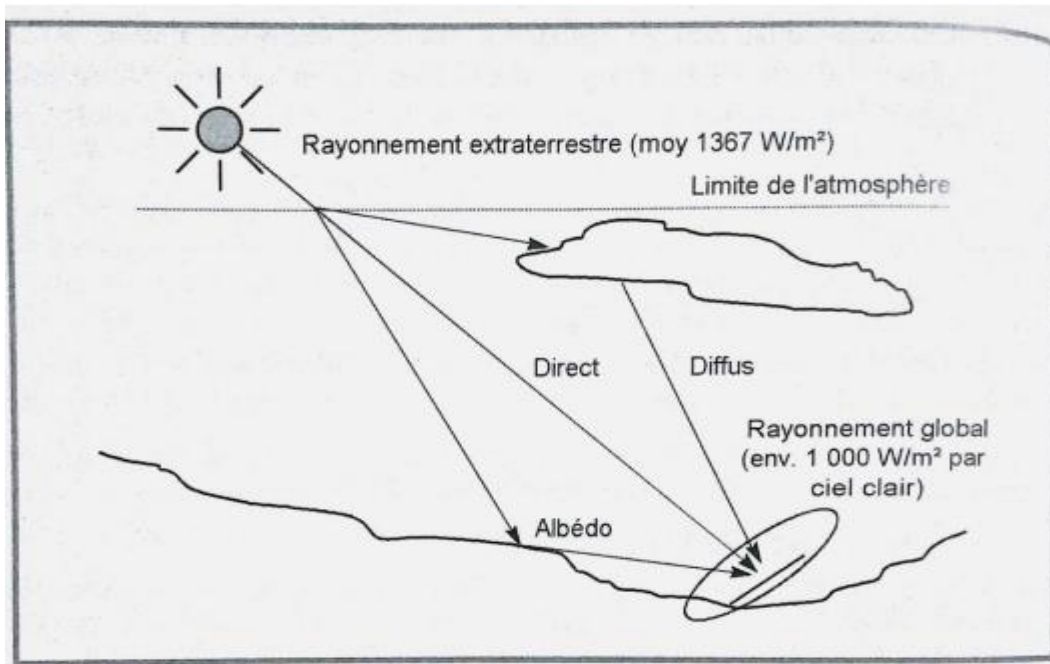


Figure (I.1): Composante du rayonnement global sur un plan horizontal

I.3. Cellule et principe de photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est un dispositif électronique qui convertit l'énergie lumineuse en énergie électrique. Elle est composée d'un matériau semi-conducteur, généralement du silicium, qui a la propriété de produire une différence de potentiel électrique lorsqu'il est exposé à la lumière [1].

La conversion photovoltaïque est le processus par lequel la lumière du soleil est convertie en électricité utilisable. Ce processus est basé sur l'effet photoélectrique, qui a été découvert par Albert Einstein en 1905.

Lorsque la lumière du soleil frappe une cellule photovoltaïque, elle est absorbée par des matériaux semi-conducteurs tels que le silicium. Les photons de la lumière solaire excitent les

électrons dans les atomes

de ces matériaux semi-conducteurs, ce qui leur donne suffisamment d'énergie pour se libérer de leur orbite autour du noyau atomique. Ce processus crée des paires électron-trou dans la cellule, ce qui crée une différence de potentiel électrique entre les deux côtés de la cellule.

Cette différence de potentiel électrique est appelée tension, et elle peut être utilisée pour produire un courant électrique en connectant les deux côtés de la cellule à un circuit externe. Ce courant électrique peut ensuite être utilisé pour alimenter des appareils électriques ou être stocké dans des batteries pour une utilisation ultérieure.

La tension générée par une cellule photovoltaïque peut varier entre 0.3 et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule [2] .

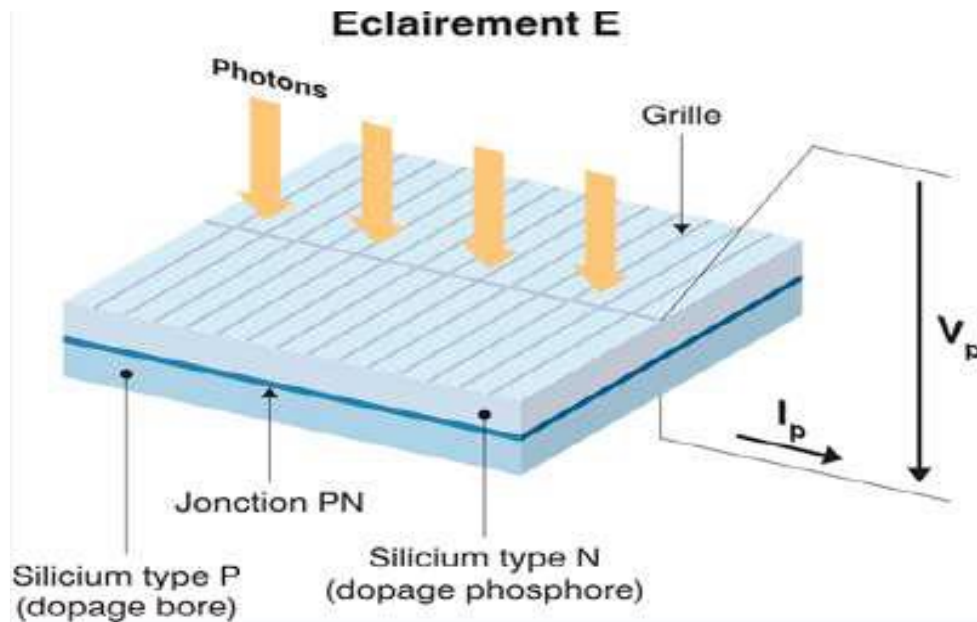


Figure (I.2) : Schéma d'une cellule élémentaire

I.4. Type de cellule photovoltaïque :

I.4.1. Cellules monocristallines :

Les cellules aux siliciums monocristallins (Figure 1.3) qui représentent le type avec le plus haut pouvoir de conversion, elles sont considérées parmi les cellules ayant le meilleur rendement.

I.4.2. Cellules poly-cristallines :

Des cellules aux siliciums poly-cristallins (Figure 1.4) Leur conception est plus facile, Les composants des cristaux de silicium sont bien visibles, le cout de fabrication est moins important cependant leur rendement est plus faible que les cellules aux siliciums monocristallins

I.4.3. Cellules amorphes :

Les cellules amorphes (Figure 1.5) ne possèdent pas de structure cristalline. Leur coût de fabrication est inférieur par rapport aux autres types, cependant leur rendement et leur efficacité sont faibles. Elles sont utilisées dans des petits produits de consommation (les calculatrices solaires) [14]

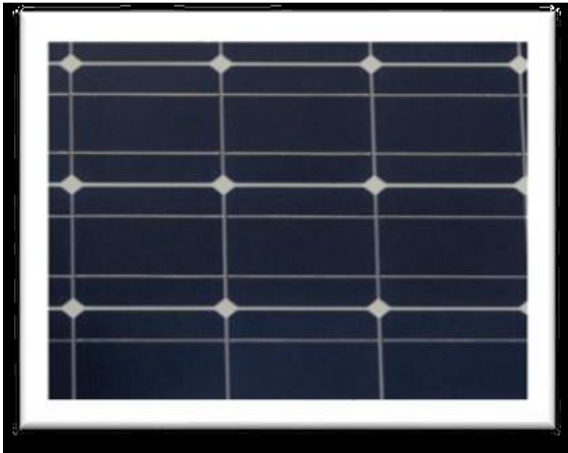


Figure (I.3): Cellule monocristallin.

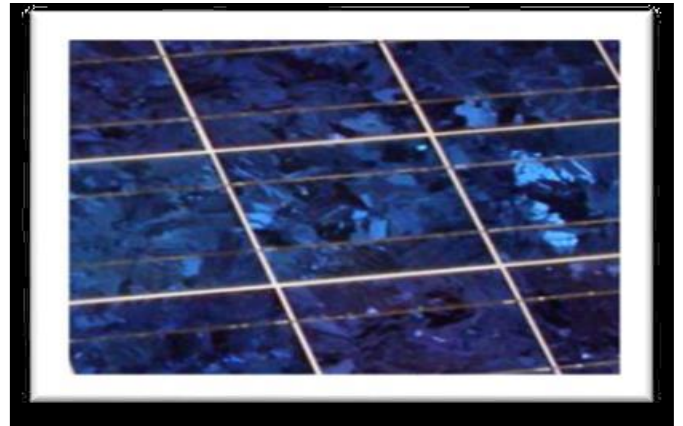


Figure (I .4): Cellule polycristallin.

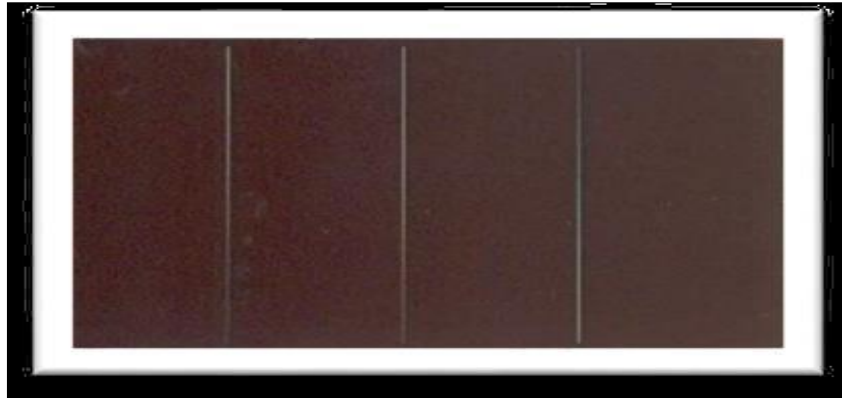


Figure (I.5): Cellule amorphes.

I.4.4. Rendement d'une cellule :

Le tableau suivant (1-1) présente les différents types de cellules avec leur rendement[14].

Technologie de cellules	Rendement en Laboratoire	Rendement Production
Silicium amorphe	13%	5 à 9%
Silicium poly cristallin	19.8%	11 à 15%
Silicium monocristallin	24.7%	13 à 17%

Tableau (1.1): Différent types des cellules avec leur rendement.

L'expression du rendement est donnée comme suite :

$$\eta_{stc} = \frac{P_m}{E_{stc} \times S_{cellule}} \quad (I.1)$$

Où

- η_{stc} : Rendement de la cellule photovoltaïque.
- **P_m**: Puissance produite par le générateur PV.

S_{cellule} : Surface de la cellule [m²]

- **E_{stc}** : Éclairement absorbé par la cellule.
- Ce rendement dépend de plusieurs facteurs [15].
- Réflexion à la surface.

- Température de jonction des cellules.
- Type de matériau utilisé et technique de fabrication.
- La résistance série et parallèle responsables des pertes par effet Joule.
- Absorption incomplète et excès d'énergie des photons absorbés.

I.5. Système Photovoltaïque :

Un générateur photovoltaïque est un ensemble d'équipements connectés qui utilise l'énergie photovoltaïque pour répondre aux demandes de charge. Selon la puissance requise, les panneaux peuvent être assemblés pour former un "champ photovoltaïque". Le panneau solaire est connecté au récepteur sans aucun autre élément et fonctionne "sur le soleil", c'est-à-dire que la puissance fournie au récepteur dépend de la quantité d'ensoleillement. Cependant, la demande de puissance ne correspond souvent pas aux heures d'ensoleillement, mais à d'autres moments qui nécessitent une intensité régulière. Le système est alors équipé de batteries qui stockent l'énergie et la restituent si nécessaire. Par conséquent, les régulateurs sont essentiels pour traiter les batteries surchargées ou profondément déchargées. Pour de nombreuses applications, le courant continu produit par le générateur PV est converti en courant alternatif à l'aide d'un onduleur PV.

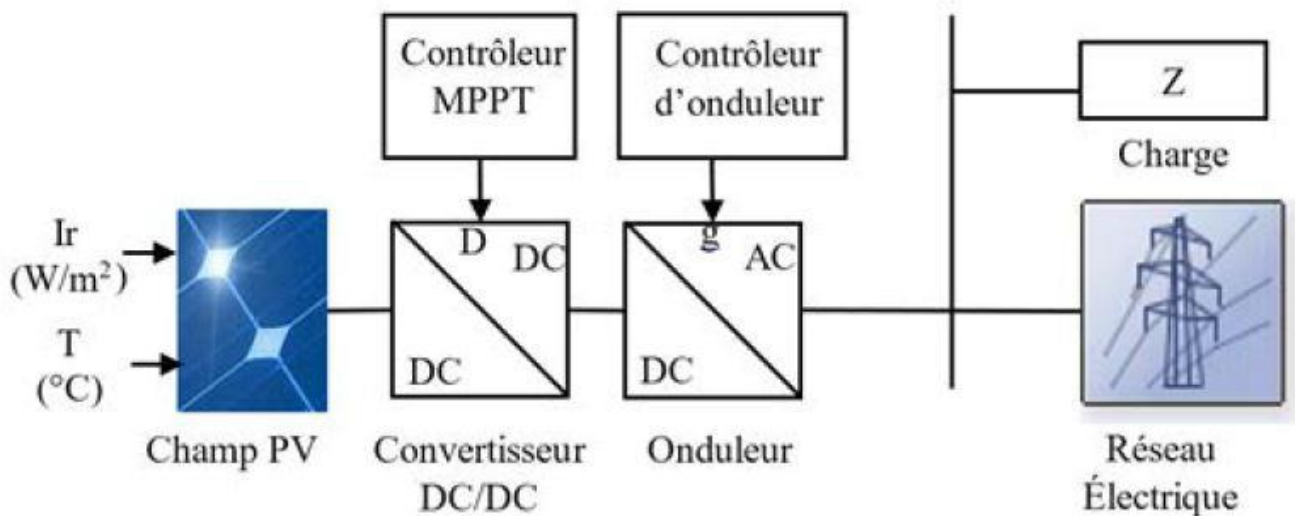


Figure (I.6): Schéma synoptique d'un système PV connecté au réseau.

I.6. Module photovoltaïque :

Les caractéristiques électriques d'une seule cellule sont généralement insuffisantes pour alimenter les équipements électriques. Il faut associer les cellules en série pour obtenir une

tension plus importante : le module solaire ou panneau photovoltaïque.

I.7. Générateur photovoltaïque :

Le générateur photovoltaïque est un ensemble d'équipements mis en place pour exploiter l'énergie photovoltaïque afin de satisfaire les besoins en charge. En fonction de la puissance désirée, les modules peuvent être assemblés en panneaux pour constituer un "champ photovoltaïque". Relié au récepteur sans autre élément, le panneau solaire fonctionne "au fil du soleil", c'est-à-dire que la puissance électrique fournie au récepteur est fonction de la puissance d'ensoleillement. Elle est donc à son maximum lorsque le soleil est au zénith et nulle la nuit. Mais, très souvent, les besoins en électricité ne correspondent pas aux heures d'ensoleillement et nécessitent une intensité régulière (éclairage ou alimentation de réfrigérateurs, par exemple). On équipe alors le système de batteries d'accumulateurs qui permettent de stocker l'électricité et de la restituer en temps voulu [3].

Pour un certain nombre d'applications, le courant continu produit, par le générateur photovoltaïque, est convertit à l'aide d'un onduleur en courant alternatif. Un module photovoltaïque est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou en parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées tels que: la puissance, le courant de court-circuit I_{cc} ou la tension en circuit ouvert V_{co} .

I.8. Types de connexions de cellules photovoltaïques :

I.8.1. Monter ses panneaux solaires en série :

En matière de systèmes photovoltaïques, le câblage en série consiste à connecter les cellules solaires de manière séquentielle, où la borne négative (sortie) d'une cellule est connectée à la borne positive (entrée) de la cellule suivante. Cette configuration augmente la tension électrique totale de l'ensemble. Le figure (I.7) illustre le câblage en série des cellules photovoltaïques :

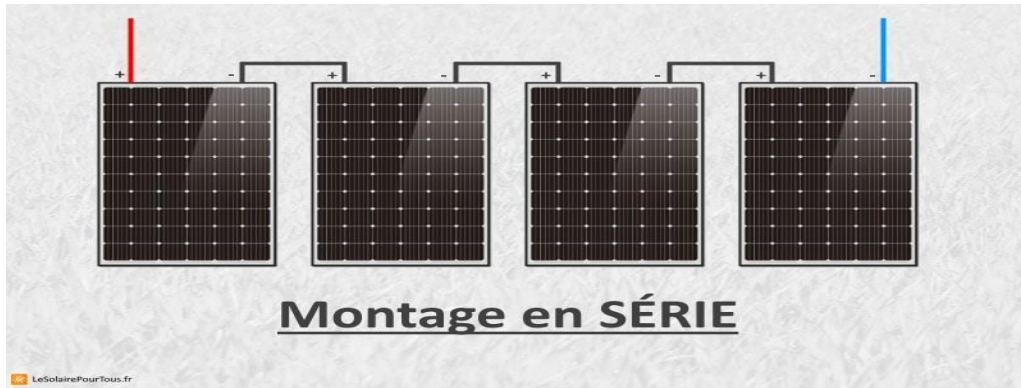


Figure (I.7): montage en série [18]

I.8.2. Monter ses panneaux solaires en parallèle

D'autre part, le câblage en parallèle consiste à connecter les bornes négatives de toutes les cellules ensemble et les bornes positives ensemble. Cette méthode permet d'augmenter le courant électrique disponible, améliorant ainsi la capacité à alimenter des dispositifs nécessitant un courant élevé. Voici un exemple de câblage en parallèle des cellules photovoltaïques :

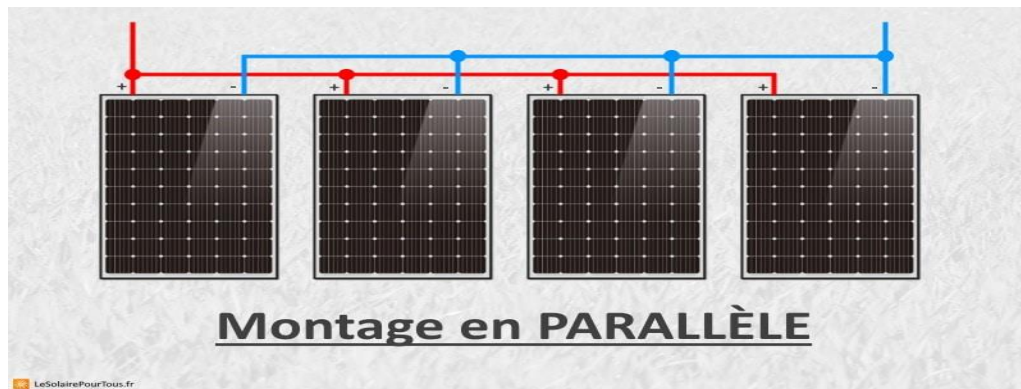


Figure (I.8): montage en parallèle [18]

I.8.3. Mix série/parallèle de modules photovoltaïques

En pratique, il est parfois avantageux de combiner les deux méthodes en une configuration série-parallèle. Dans ce cas, les cellules sont connectées en série pour former des groupes, et ces groupes sont ensuite connectés en parallèle. Cette approche permet d'augmenter à la fois la tension et le courant, offrant ainsi une flexibilité optimale pour répondre aux exigences spécifiques du système solaire.

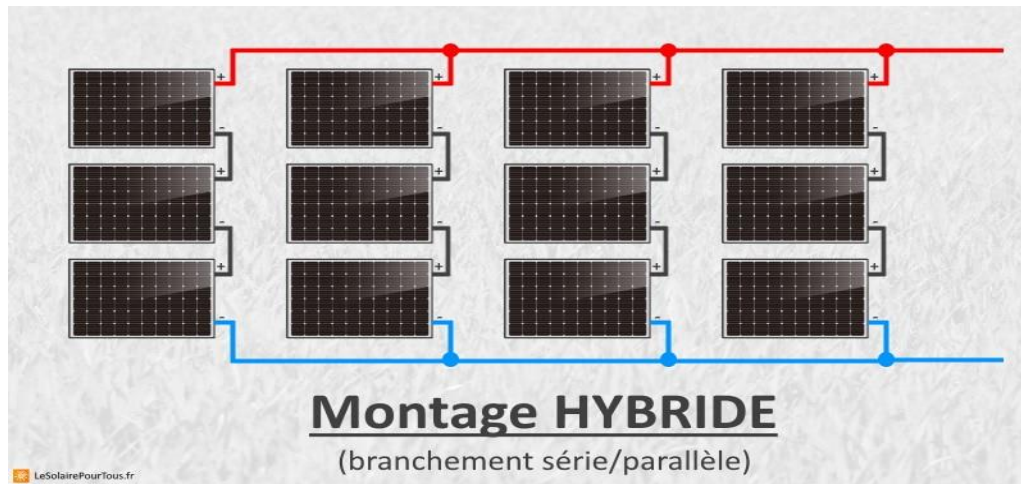


Figure (I.9): montage hybride [18]

- Le choix entre le câblage en série, en parallèle ou une combinaison des deux est déterminé par les besoins spécifiques du système photovoltaïque, tels que le courant nécessaire et la tension attendue, ainsi que les conditions d'installation disponibles. Ces stratégies varient en fonction de la conception du système solaire et de son application particulière, visant à maximiser l'efficacité de la production d'énergie solaire.

I.9. Champ photovoltaïque :

Le champ photovoltaïque se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le module PV avec un angle d'inclinaison



Figure (I.10): Champ photovoltaïque

I.10. Différentes connexions des systèmes photovoltaïques :**I.10.1. La connexion directe :**

La connexion directe d'un panneau photovoltaïque à une charge est le principe de fonctionnement le moins cher, dans la mesure où la charge accepte bien la connexion directe au générateur de puissance continue. L'inconvénient majeur de cette connexion est la dépendance entre la puissance fournie par le générateur et la charge. [4]

En effet, la puissance fournie par le module photovoltaïque résulte de l'intersection entre la caractéristique du générateur photovoltaïque et celle de la charge [6] Les panneaux solaires de première génération étaient dimensionnés pour que leurs points de puissance maximale correspondent à la tension nominale de batterie. Grâce à cette configuration, une simple connexion directe via une diode anti-retour suffit à effectuer le transfert d'énergie du générateur photovoltaïque à la charge.

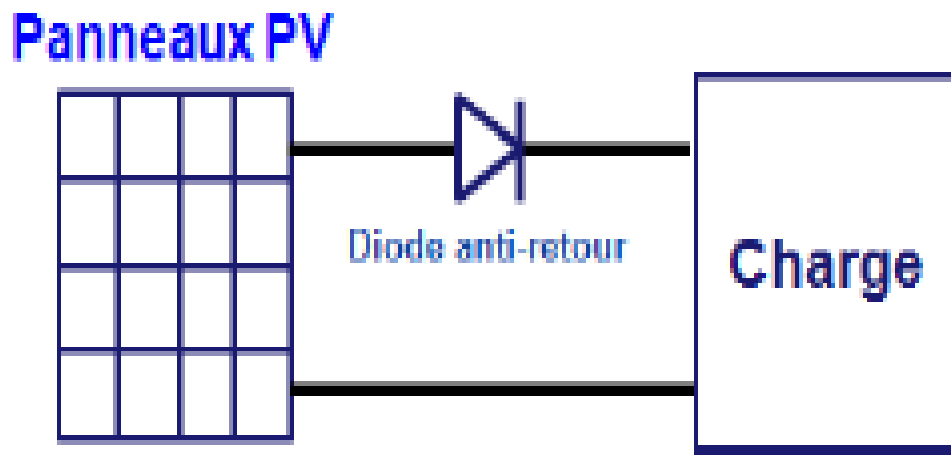


Figure (I.11): Connexion directe d'un panneau photovoltaïque

I.10.2. Systèmes PV connectés au réseau :

Un système PV connecté au réseau est un système photovoltaïque qui est connecté au réseau électrique public. Ce type de système est également connu sous le nom de système PV interconnecté. Le fonctionnement d'un système PV connecté au réseau est relativement simple.

Les panneaux solaires captent l'énergie solaire et la convertissent en électricité.

Cette électricité est ensuite envoyée à un onduleur, qui convertit le courant continu produit par les panneaux solaires en courant alternatif, qui est le type d'électricité utilisé par les appareils électriques.

I.10.3. Convertisseurs DC-DC:

Les hacheurs, également connus sous le nom de convertisseurs continu-continu, sont des dispositifs utilisés pour contrôler la puissance électrique dans les circuits à courant continu, offrant une flexibilité élevée et un rendement optimal. Ils se composent de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Dans des conditions idéales, ces composants ne consomment aucune puissance active, ce qui contribue à des rendements élevés. La technique du découpage, développée dans les années soixante, a résolu les problèmes de rendement médiocre et d'encombrement des alimentations series

Dans un système d'alimentation à découpage, la tension d'entrée est modulée à une fréquence spécifique par un transistor qui alterne entre l'état passant et bloqué. Cela produit une onde carrée de tension, laquelle peut être ensuite filtrée pour obtenir une tension continue. La figure (II.12) illustre un convertisseur DC/DC, qui peut servir d'interface entre la source d'alimentation et la charge . [30]

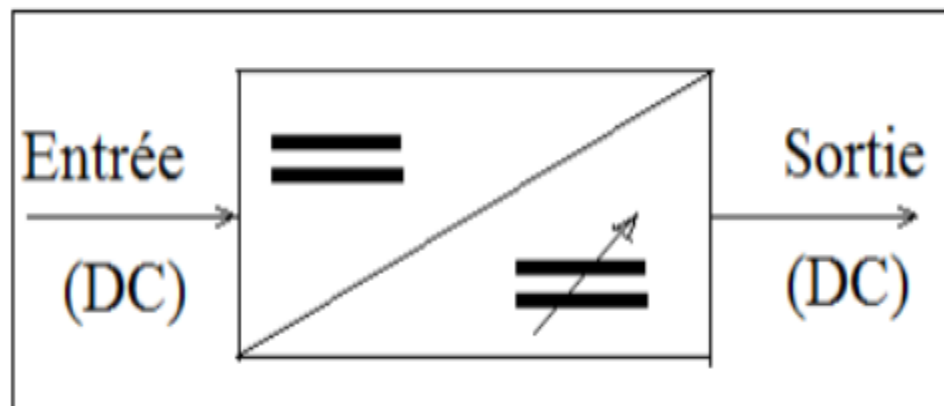


Figure (I.12): Schéma de principe d'un hacheur.

I.11. Les type des convertisseurs de tension DC/DC :

I.11.1. Convertisseur boost:

La Figure (I.13) représente un convertisseur élévateur « Boost » qui convertit la tension continue d'entrée en une tension de sortie plus élevée. Ce convertisseur comprend l'interrupteur (S) l'inductance (L), la diode qui protège S en empêchant le retour du courant et le condensateur C2 qui sert à lisser la tension de sortie. [19]

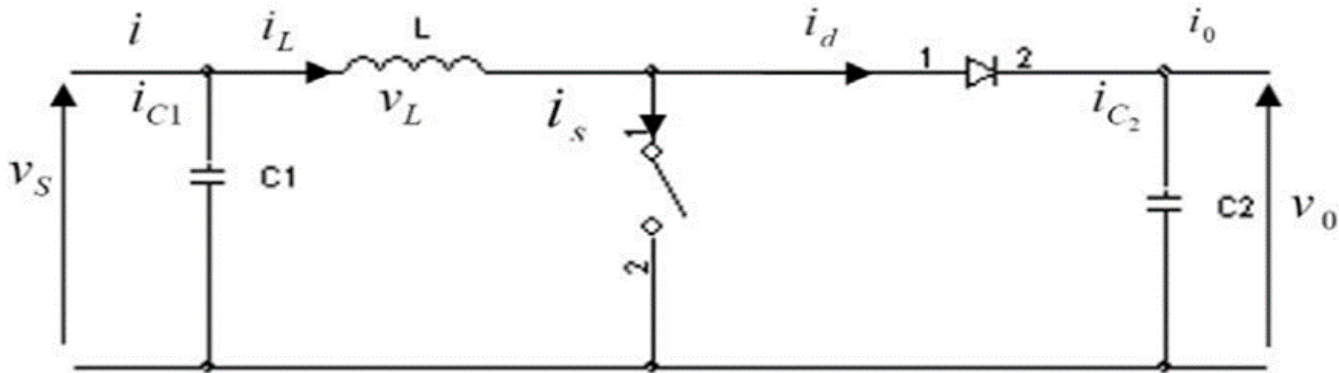


Figure (I.13): Convertisseur élévateur (Boost).

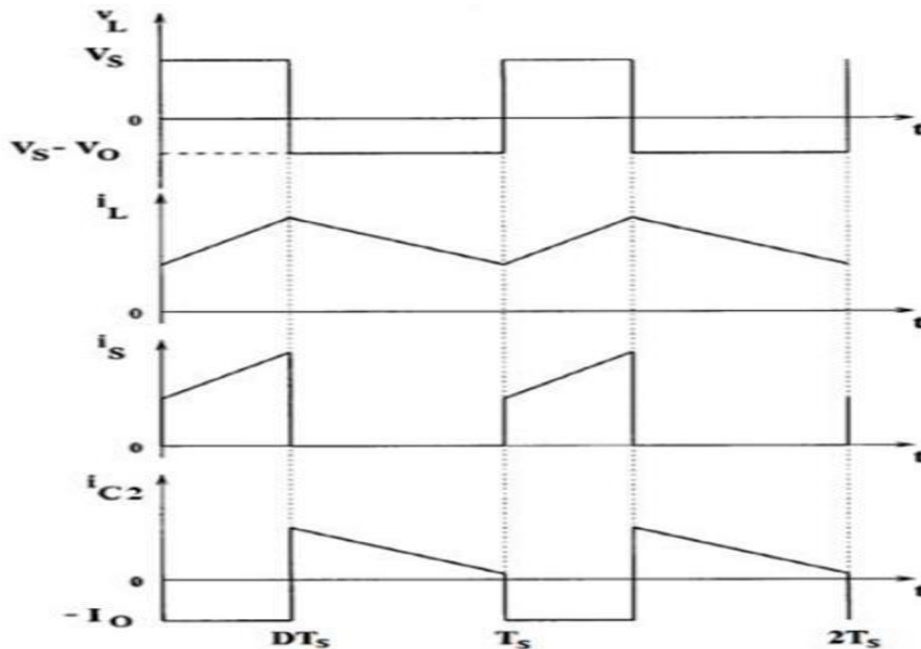


Figure (I.14): Tensions et courants d'entrée et de sortie en D et T_s pour un Boost.

Selon la Figure (I .14) , S se ferme et la diode est polarisée en inverse pour $t \in [0, D.T_s]$, L se charge et le courant délivré par la source commence à augmenter progressivement. Pendant cet intervalle de temps on a:

- $i_{c1}(t) = C1dv_L/(t)dt = i(t) - i_L(t)$
- $i_{c2}(t) = C2dv_0/(t)dt = - i_0(t)$
- $v_L(t) = L di_L(t)/dt = v_S(t)$

(II.2)

Pour $t \in [D.T_s, T_s]$, S est ouvert et L libère la tension emmagasinée qui s'ajoute à celle de la source pour alimenter la charge. On obtient l'ensemble suivant d'équations :

- $i_{c1}(t) = C1dv_S(t)/dt = i(t) - i_L(t)$
- $i_{c2}(t) = C2dv_0(t)dt = i_L(t) - i_0(t)$
- $v_L(t) = L di_L(t)dt = v_S(t) - v_0(t)$

(II.3)

➤ A partir des équations (II.2) et (II.3), on peut écrire l'équation suivante

- $(v_S) DT_s = (v_0 - v_S) * (1 - D) * T_s$

(II.4)

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

- $M(D) = \frac{V_S}{V_0} = \frac{1}{1-D}$

(II.5)

I.11.2. Convertisseur Buck

Le hacheur Buck est un convertisseur de puissance électronique utilisé pour abaisser la tension continue (DC) d'une source d'alimentation. Il est également connu sous le nom de convertisseur abaisseur ou convertisseur en série.

Cet hacheur commande le débit d'une source de tension dans une charge de courant [27] Il permet de convertir la tension d'entrée en une tension de sortie inférieure. [29]

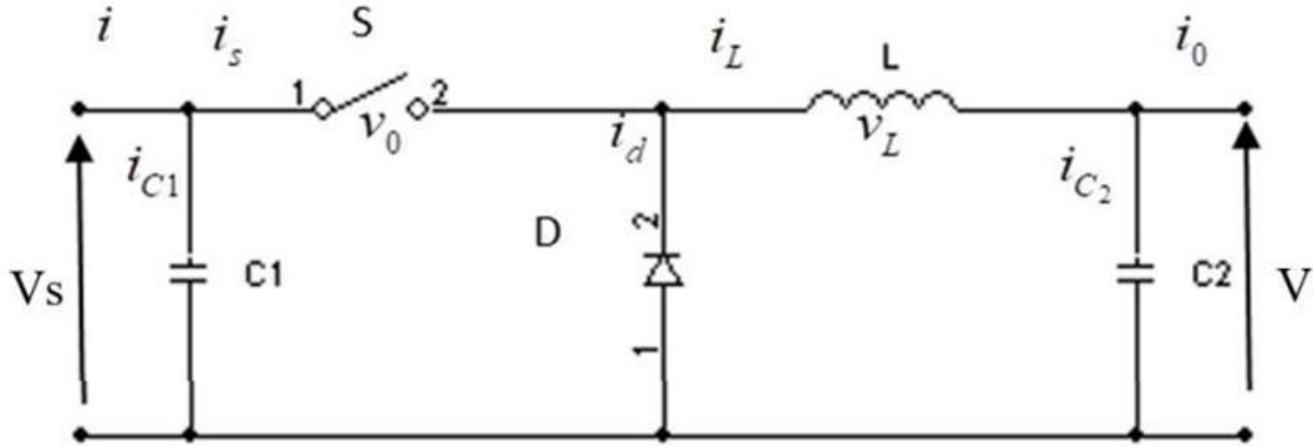


Figure (I.15): Circuit électrique du Hacheur abaisseur.

Pour étudier le convertisseur abaisseur et extraire son modèle mathématique, on analyse le fonctionnement du circuit équivalent pour S ouvert et fermé.

- Pour $t \in [0, D.T_s]$, S est fermé:

- $i_{C1}(t) = C1 dv_s(t)/dt = i(t) - i_L(t)$
- $i_{C2}(t) = C2 dv_o(t)/dt = i_L(t) - i_o(t)$ (II.6)

Pour $t \in [D.T_s, T_s]$, S est ouvert:

- $i_{C1}(t) = C1 dv_s(t)/dt = i(t)$
- $i_{C2}(t) = C2 dv_o(t)/dt = i_L(t) - i_o(t)$
- $v_L(t) = L di_L(t)/dt = -v_o(t)$ (II.7)

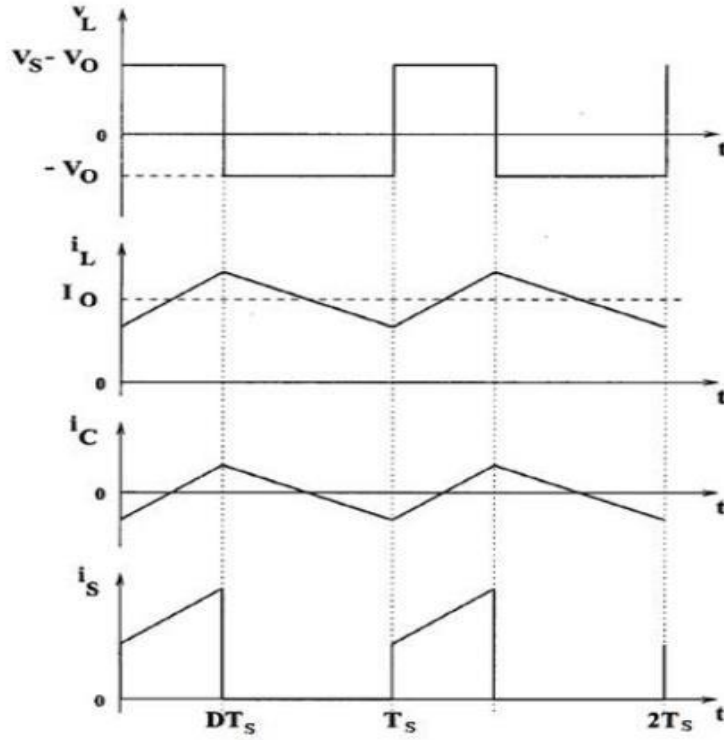


Figure (I.16): Forme d'ondes des tensions et des courants d'entrée et de sortie du « Buck » en fonctions du rapport cyclique D et la période T_s .

La Figure (I.15) représente les formes d'ondes des courants inductif, capacitif, et de commutation. L'expression de la tension moyenne d'inductance peut être facilement dérivée de la forme d'onde sur la Figure II.16 La tension moyenne d'inductance est égale à zéro en régime permanent :

- $$V_L(t) = D(V_S - V_O) + (1-D) \cdot (-V_O) = 0 \quad (I.8)$$

La relation de la tension d'entrée V_S et de sortie V_O en fonction du rapport cyclique D est donnée par l'équation (I.16):

- $$(v_S - v_O) DT_s = v_O \cdot (1 - D) \cdot T_s \quad (I.9)$$

A partir de l'équation (I .16), le rapport de conversion de l'hacheur dévolteur est donné par la forme suivant :

- $$M(D) = V_S / V_O = D \quad (I.10)$$

Le rapport de conversion $M(D)$ varie proportionnellement avec le rapport cyclique de commutation D .

I.11.3. Le convertisseur Buck-Boost :

Le convertisseur dévolteur-survolteur a acquis les caractéristiques et les propriétés électriques des deux types évoqués précédemment, il présente donc une sortie d'un transformateur hybride (abaisseur/élevateur) pour une tension d'entrée/sortie continue ; son schéma de base est illustré par la figure (II.17) [5].

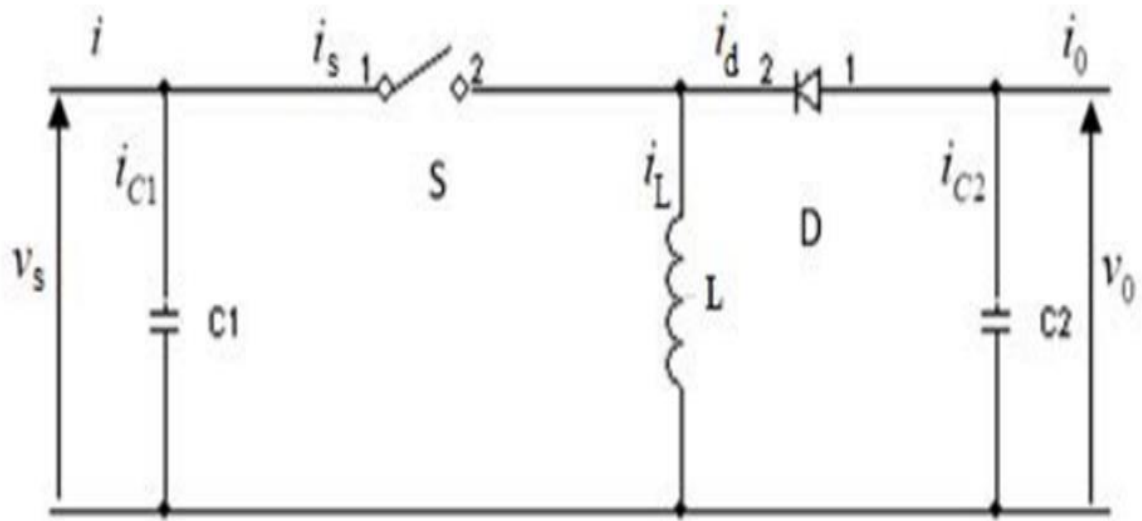


Figure (I.17): Circuit équivalent du convertisseur Buck-Boost.

Selon la Figure (I.18): S est en état de conduction durant l'intervalle $t \in [0, D.T_s]$

L'inductance L se charge et on a :

- $i_{C1}(t) = C1 dv_s(t)/dt = i(t) - i_L(t)$
- $i_{C2}(t) = C2 dv_0(t)/dt = -i_0(t)$
- $v_L(t) = L di_L(t)/dt = v_S(t)$

(I.11)

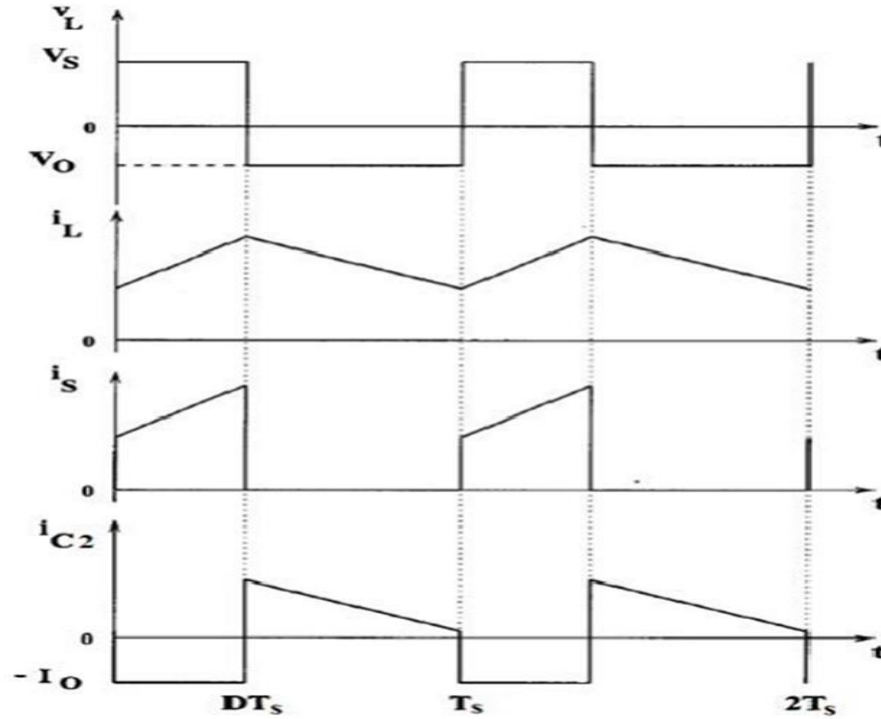


Figure (I.18): Tensions et courants du convertisseur Buck-Boost.

L'interrupteur S s'ouvre au début de l'intervalle $t \in [D.T_s, T_s]$. Le courant délivré par L circule à travers la diode pour alimenter la charge. Puisque le courant est forcé à travers la charge, la tension de sortie V_0 du convertisseur dévolteur-survolteur est négative par rapport à la masse et sa valeur peut être supérieure ou inférieure à la tension d'entrée V_s . [25] On a l'ensemble d'équations suivant :

- $i_{C1}(t) = C_1 dv_s(t)/dt = i(t) - i_L(t)$
 - $i_{C2}(t) = C_2 dv_0(t)/dt = -i_0(t)$
 - $v_L(t) = L di_L(t)/dt = v_S(t)$
- (I.12)**

En régime permanent, le rapport de conversion de convertisseur Buck-Boost s'écrit ainsi :

$$\bullet \quad (v_s) DT_s = v_0 \cdot (1 - D) \cdot T_s \quad \textbf{(I.13)}$$

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

$$\bullet \quad M(D) = V_S/V_0 = D/(1-D) \quad \textbf{(I.14)}$$

I.11.4. Onduleur

Les onduleurs sont souvent utilisés dans les systèmes d'énergie solaire ou éolienne pour convertir l'énergie DC produite par les panneaux solaires ou les éoliennes en AC pour alimenter les équipements électriques domestiques ou les grilles de distribution d'énergie. Ils sont également utilisés dans les véhicules électriques pour convertir la tension de la batterie en AC pour alimenter le moteur électrique

Il existe différents types d'onduleurs, tels que les onduleurs à onde sinusoïdale, les onduleurs à onde carrée et les onduleurs à modulation de largeur d'impulsion (PWM). Les onduleurs à onde sinusoïdale produisent une onde sinusoïdale de sortie de qualité supérieure, ce qui les rend plus adaptés aux applications sensibles à la qualité de l'énergie, tandis que les onduleurs à onde carrée ou PWM sont moins chers mais peuvent générer des interférences électromagnétiques qui peuvent affecter les équipements électroniques sensibles [6]

I.12. Conclusion :

Ce chapitre a permis de présenter les notions élémentaires à connaître sur l'énergie solaire photovoltaïque. De ce fait, nous avons constaté les avantages techniques qu'offre cette énergie ainsi que ses limites.

Dans le prochain chapitre, une simulation d'un système photovoltaïque sera traitée à l'aide de l'interface graphique MATLAB/GUI pour essayer de comprendre les phénomènes qui s'y produisent et qui sont à l'origine de l'utilisation de cette énergie.

Chapitre II :Modélisation et commande MPPT de système photovoltaïque

II.1. Introduction :

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté un aperçu général du système solaire photovoltaïque. Nous avons étudié le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule solaire et le système solaire.

Dans ce chapitre, nous présenterons le processus de modélisation et de simulation du système solaire en détaillant chaque élément individuellement, ainsi que le fonctionnement global du système. Tout d'abord, nous créerons un modèle représentant les caractéristiques de la cellule solaire en utilisant les équations du circuit réel. Ce programme nous permettra d'obtenir les caractéristiques $I_{pv}=f(V_{pv})$ et $P_{pv}=f(V_{pv})$ dans différentes conditions en variant la température et l'intensité lumineuse. Ensuite, nous simulerons les convertisseurs DC/DC élévateurs (Hacheur parallèle) et modéliserons leur mécanisme de commande (MPPT) qui recherche le point de puissance maximale[23].

II.2. Modélisation d'un panneau photovoltaïque :

Le circuit équivalent de la cellule PV idéale se compose d'une source de courant (I_{pv}) connectée en antiparallèle par rapport à la diode (D), de la résistance en série (R_{se}) et de la résistance en parallèle (R_p). La Figure 1 montre le modèle général de la cellule solaire

La cellule photovoltaïque est représentée généralement par le schéma suivant:

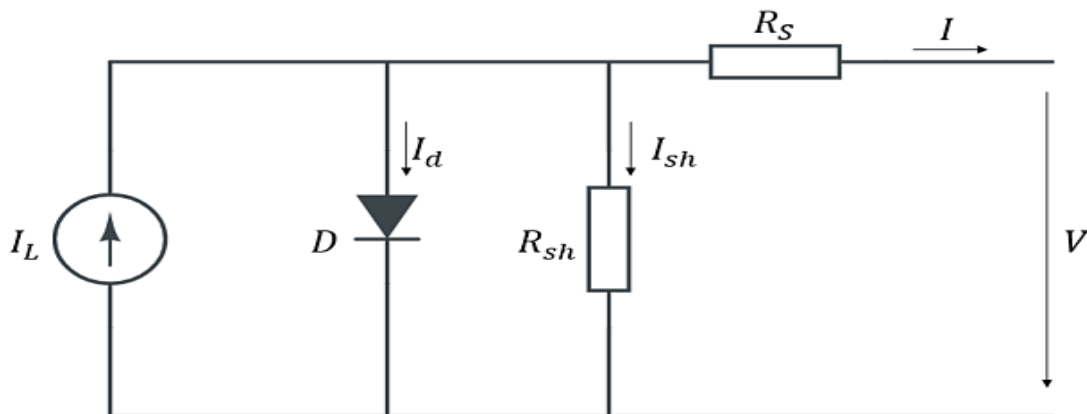


Figure II.1: Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque

Le modèle mathématique pour la caractéristique courant-tension d'une cellule PV est
Donné par :

L'équation de la caractéristique tension courant de la cellule solaire est donnée par l'équation (II.1)

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp(V + I * R_s) * \frac{q}{n * N_s * K * T} - 1 \right] - I_{sh} \quad (II.1)$$

- Le courant de saturation I_0 :

$$I_0 = I_{rs} * (T/T_n)^3 * \exp \left[\left(q * E_{g0} * \frac{\left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right)}{n * K} \right) \right]$$

(II.2)

- Le courant de saturation inverse de la diode I_{rs} :

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\left[\exp \left(q * \frac{V_{oc}}{n * N_s * K * T} \right) - 1 \right]} \quad (II.3)$$

- Le photo courant I_{ph} :

$$I_{ph} = [I_{sc} + (k_i * (T - 298))] * \frac{G}{1000} \quad (II.4)$$

- Le courant de la résistance shunt I_{sh} :

$$I_{sh} = \frac{(V + I * R_s)}{R_{sh}} \quad (II.5)$$

II.3. Simulation du panneau PV sous Matlab

Après avoir considéré que l'équation de la caractéristique tension courant de la cellule solaire est donnée par l'équation :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + R_s I}{n * K * N_s * T} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (II.6)$$

Les équations I_0 , I_{rs} , I_{sh} , I_{ph} sont représentés respectivement sous Simulink par les Figures(II.2, II.3 II.4 et II.5,) et la représentation sous Simulink de l'équation (II.1) est donnée par la Figure (II.6).

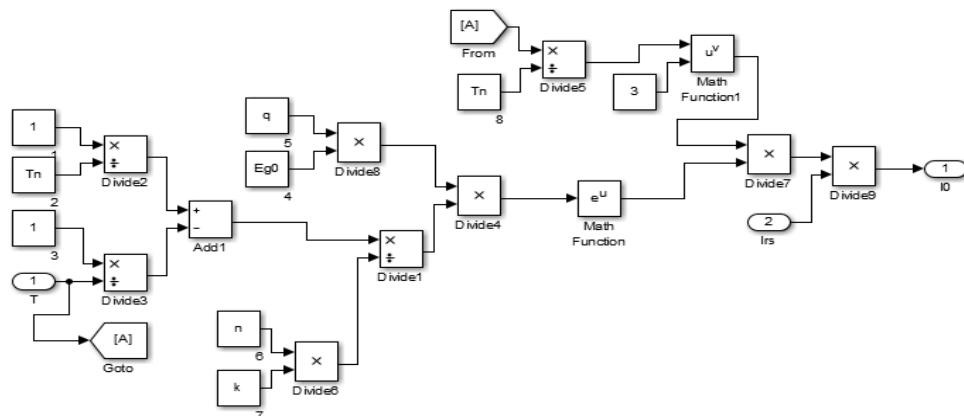


Figure II.2 : Schéma du calcul de I_0 sous Simulink.

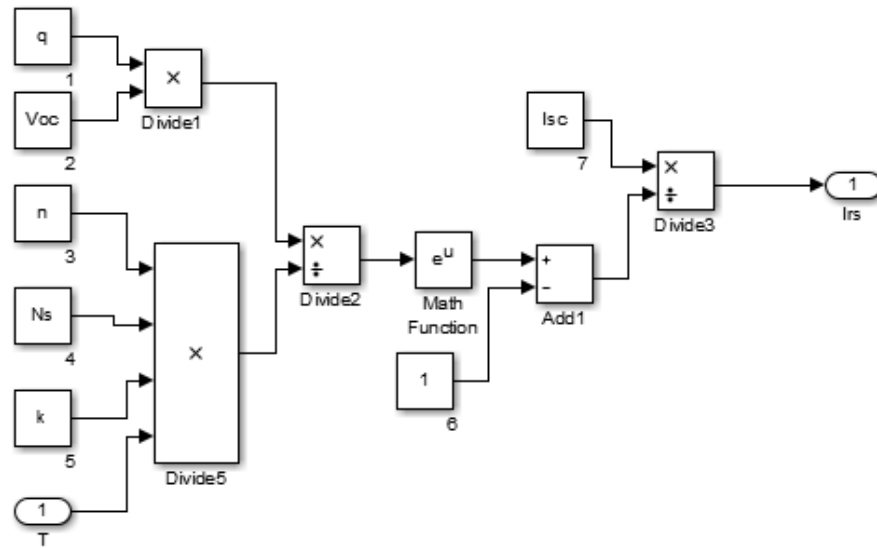


Figure II.3: Schéma du calcul de Irs sous Simulink.

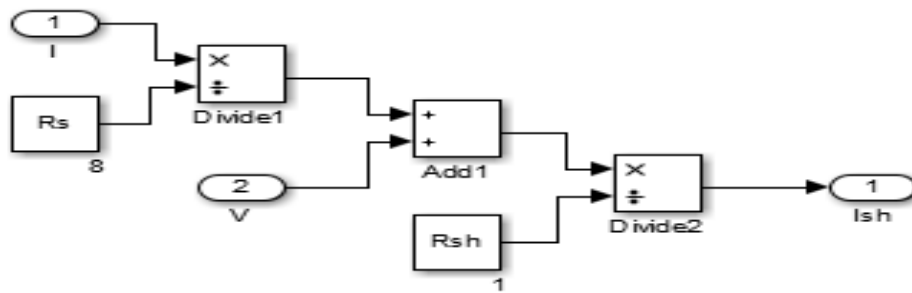


Figure II.4: Schéma du calcul de Ish sous Simulink.

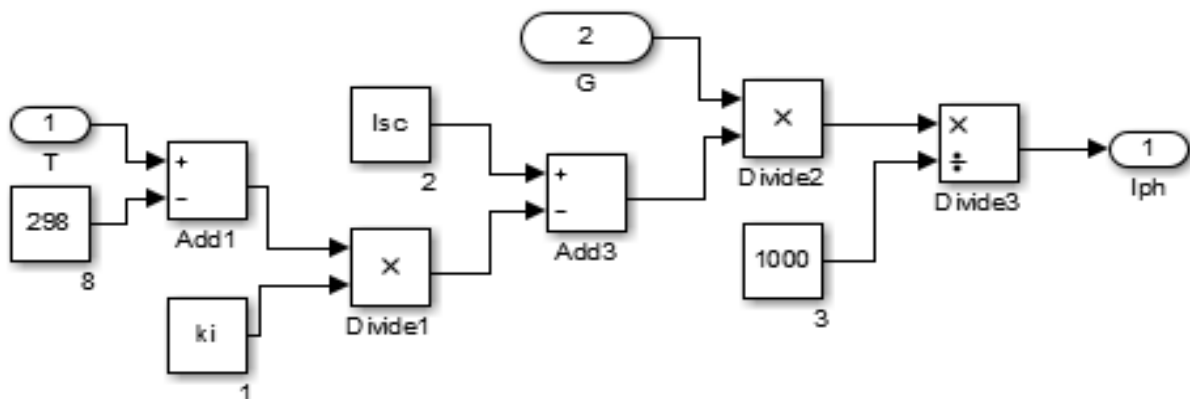


Figure II.5: Schéma du calcul de Iph sous Simulink.

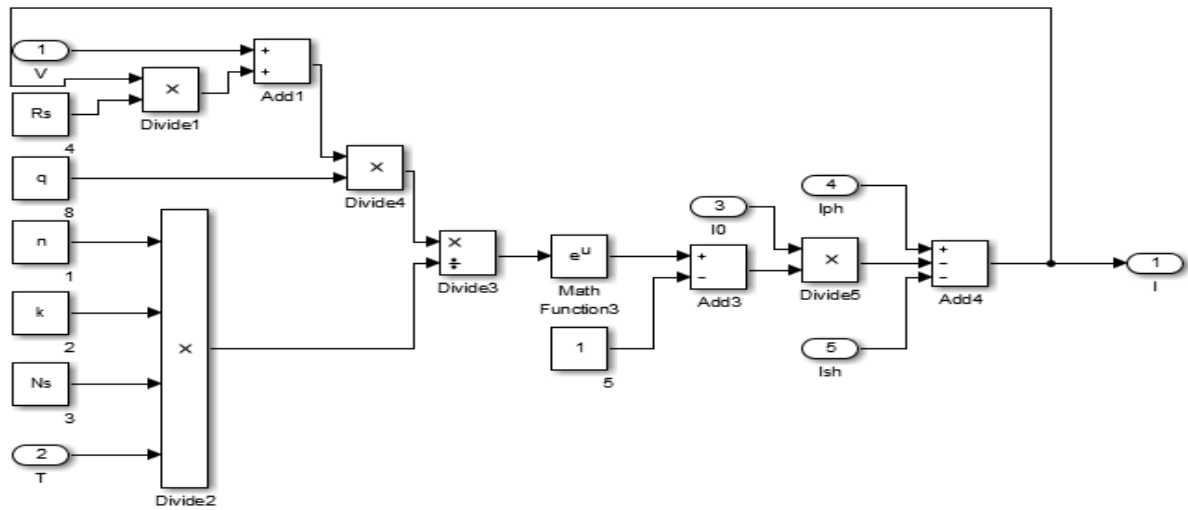


Figure II.6: Schéma du calcul de I sous Simulink.

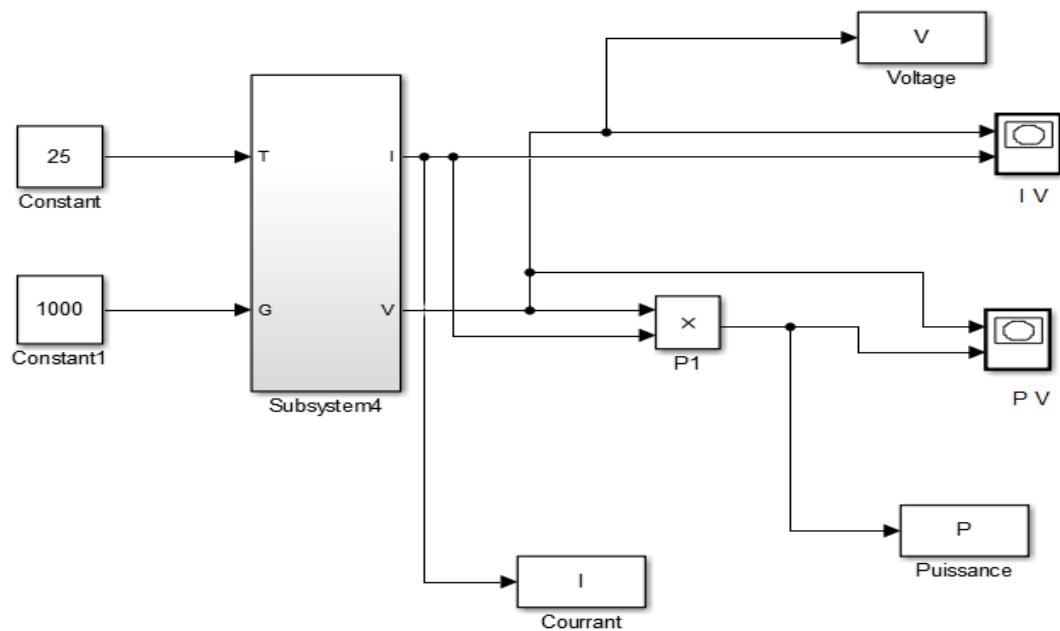


Figure II.7: Schéma du système complet sous Simulink

Avec :

- $V_{mp} = 17.1 \text{ V}$
- $I_{mp} = 3.5 \text{ A}$
- $V_{oc} = 21.1 \text{ V}$
- $I_{sc} = 3.8 \text{ A}$
- $P_m = 60 \text{ W}$
- $N_s = 36$

II.4. Résultats de simulation :

Les simulations faites permettent d'obtenir les courbes I-V et P-V du champ PV pour différents éclairagements et températures.

II.4.1. Caractéristique I-V :

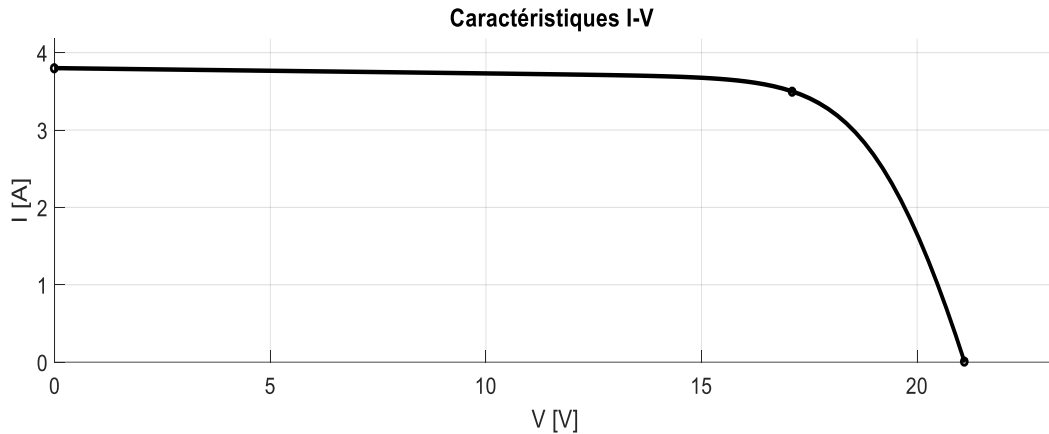


Figure II.8: Caractéristiques I-V du module photovoltaïque.

II.4.2. Caractéristique P-V :

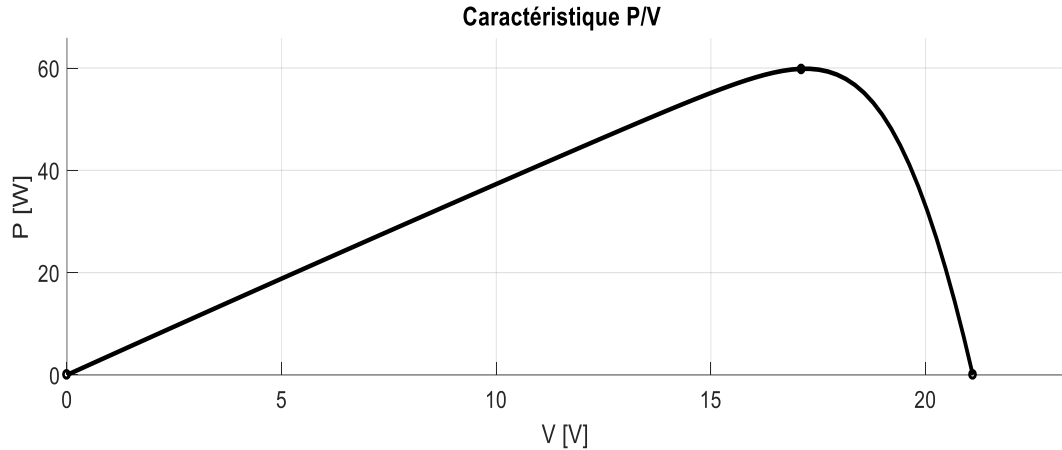


Figure II.9: Caractéristique P/V d'un panneau PV

Les performances du panneau sous différentes conditions de fonctionnement :

La courbe I/V montre la relation entre le courant généré et la tension dans des conditions d'irradiation solaire constantes. Les points principaux incluent le courant de court-circuit (I_{sc}) qui représente le courant maximal à tension nulle, et la tension en circuit ouvert (V_{oc}) qui représente la tension maximale à courant nul.

La courbe P/V illustre comment la puissance générée varie avec la tension. La courbe commence à zéro, augmente jusqu'à atteindre la puissance maximale au point de puissance maximale (P_{max}), puis diminue à nouveau jusqu'à zéro. Ce point représente la performance optimale du panneau, où la puissance disponible est la plus élevée possible.

Les variations de l'irradiation solaire et de la température affectent directement ces courbes, l'irradiation augmentant le courant et la puissance, tandis que l'augmentation de la température entraîne une diminution de la tension et de la puissance.

- Après avoir fixé l'ensoleillement à 1000 W/m^2 et varier la température de 25°C jusqu'à 75°C , les allures obtenues sont présentées en dessous :

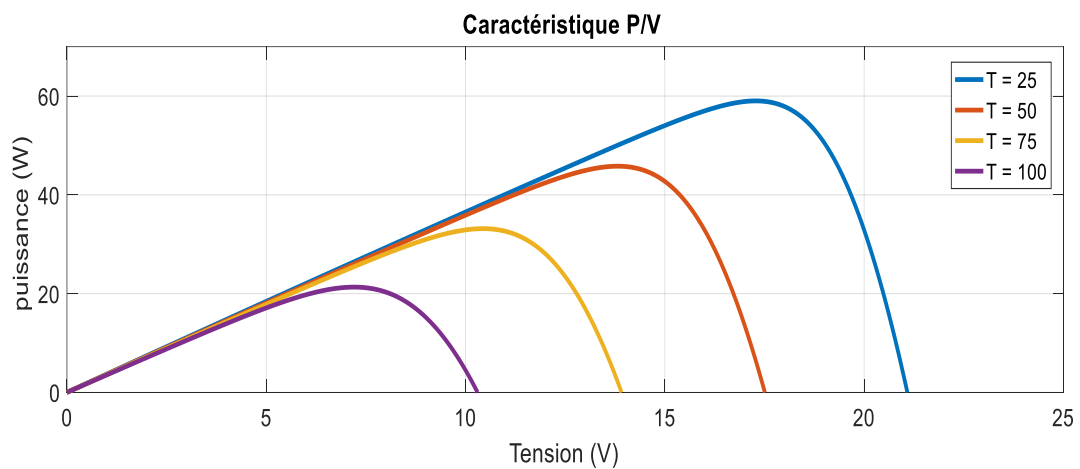


Figure II.10: Influence de la température sur la puissance du PV.

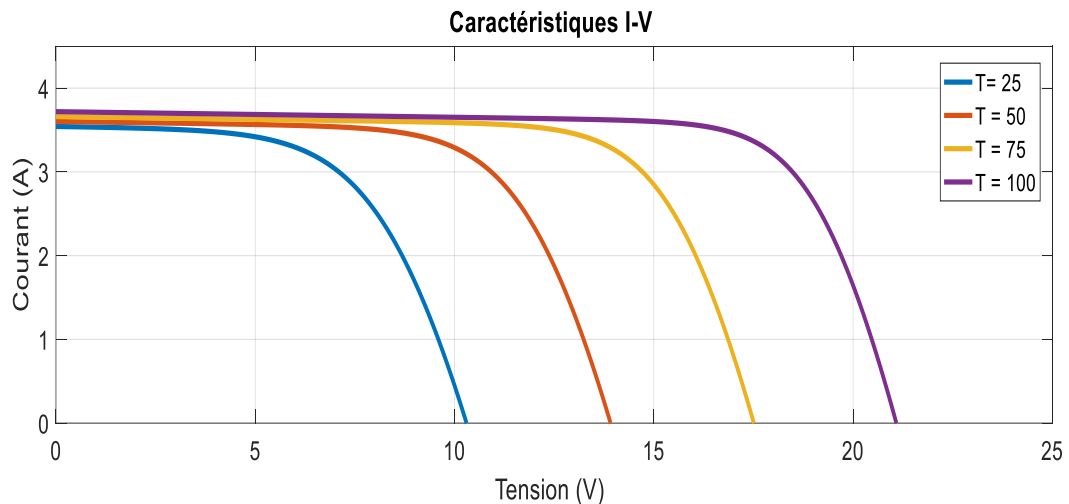


Figure II.11: Influence de la température sur le courant du PV.

- On observe que l'augmentation de la température entraîne principalement une diminution de la tension ce qui conduit à une baisse de la puissance du PV diminue. La Figure(II.10et 11) montre qu'une augmentation de la température 25°C à 100°C engendre une chute de puissance de 40%.
- On applique une température $T=25^{\circ}\text{C}$ constante et on varie l'ensoleillement (G) de 200 W/m² jusqu'à 1000 W/m², les résultats obtenus sont illustrés par les figures suivantes :

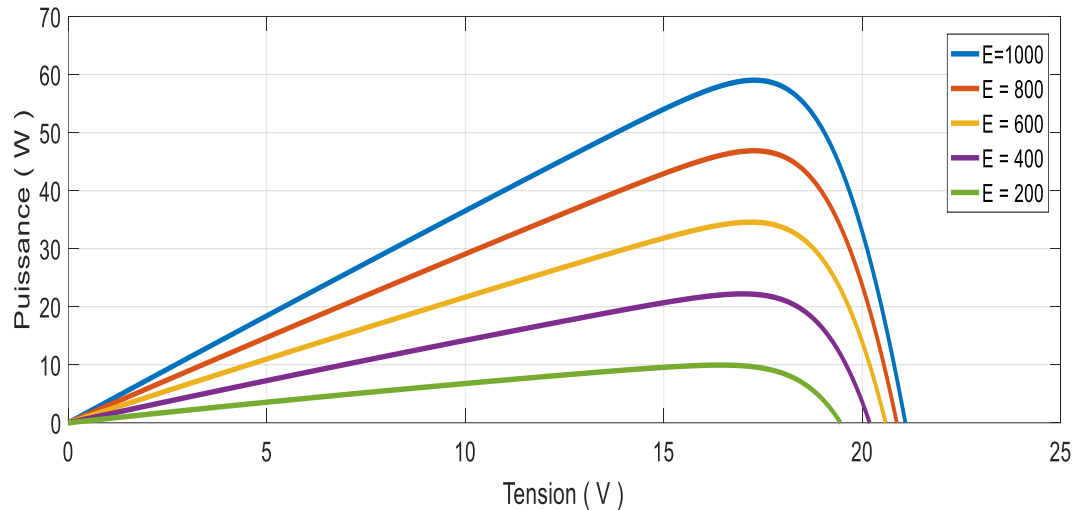


Figure II.12: Caractéristiques de puissance du champ PV pour une variation de l'éclairement.

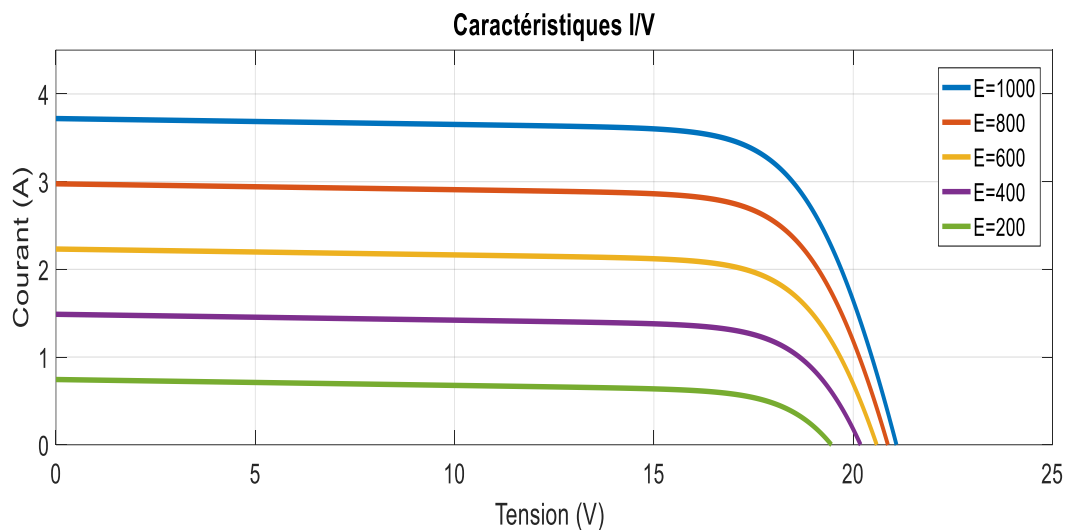


Figure I.13: Caractéristiques de courant du champ PV pour une variation de l'éclairement.

- La courbe courant-tension présente un décalage proportionnel aux variations de l'éclairement solaire. Une augmentation de l'ensoleillement entraîne principalement une augmentation du courant photovoltaïque (PV), ce qui engendre une augmentation de la puissance du PV.

II.5. Modélisation des hacheurs :

La valeur de l'inductance et la valeur du condensateur sont :

- $C = 470 \mu F$
- $L = 3.3 mH$
- $R = 23 \Omega$

II.5.1. Simulation du Convertisseur Boost :

Le convertisseur boost a été simulé en utilisant MATLAB/Simulink. Les résultats obtenus à partir du convertisseur boost sont présentés. La simulation a été réalisée en intégrant le convertisseur boost avec le système photovoltaïque, comme indiqué dans la figure (II.14), pour les rapports cycliques $D=(0.3)$, (0.5) , et (0.8) . La Figure (II.14) montre le schéma de simulation du convertisseur boost conçu. Les résultats sont présentés comme indiqué dans les figures (II.15, 16 et 17).

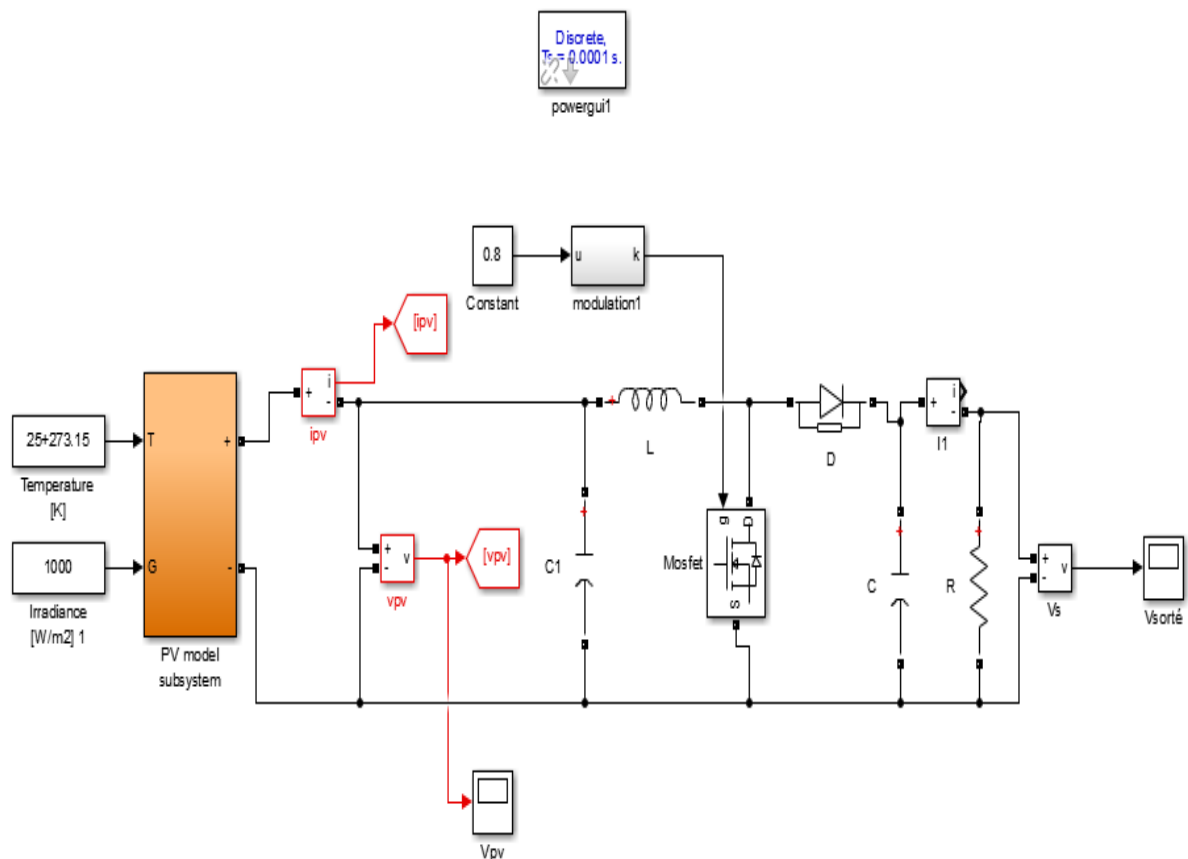


Figure II.14: Simulation de le convertisseur boost avec système PV

II.5.2. Résultat de la simulation:

Le convertisseur Boost a été intégré à l'unité photovoltaïque pour l'analyse comme illustré dans la Figure (II.14) Le convertisseur élévateur est alimenté par l'unité photovoltaïque, où la tension d'entrée du convertisseur élévateur est la sortie de l'unité photovoltaïque. Les figures II. (15) et (16) , (17) montrent les formes d'ondes obtenues à partir du convertisseur élévateur alimenté par l'unité photovoltaïque.

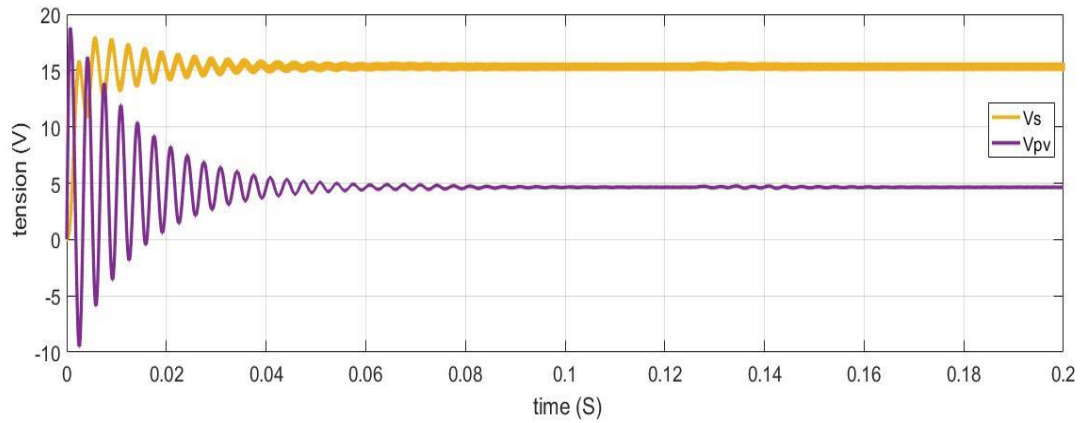


Figure II.15: Tensions de sortie convertisseur Boost pour $\alpha=0.3$

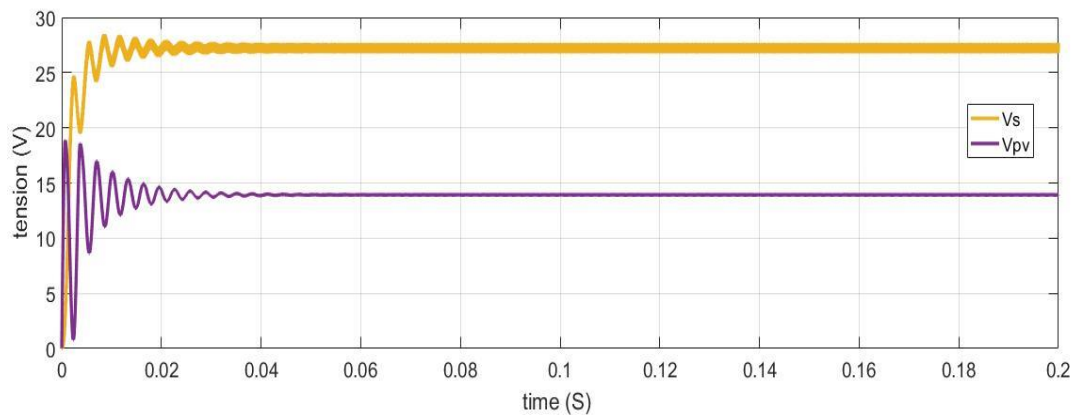


Figure II.16: Tensions de sortie convertisseur Boost pour $\alpha=0.5$

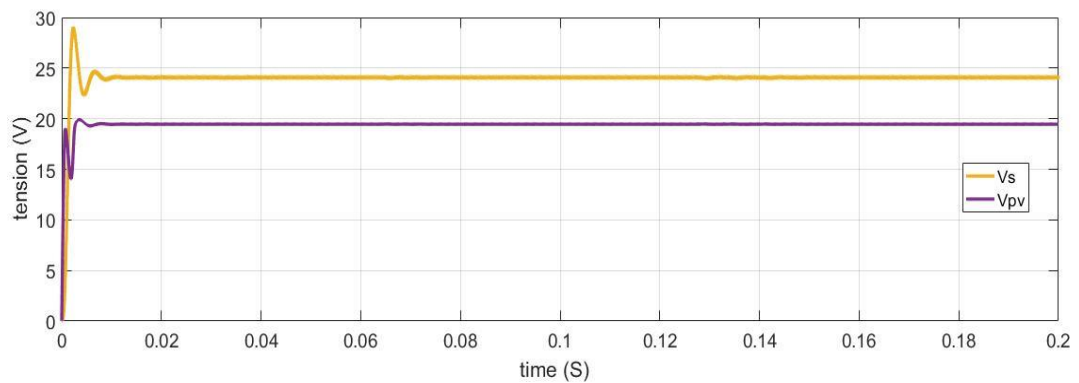


Figure II.17: Tensions de sortie convertisseur Boost pour $\alpha=0.8$.

➤ Résultats de simulation sur des étudians pour trois valeurs différentes α :

Pour sa valeur $\alpha = 0.3$ On remarque que la tension de sortie (V_s) est élevée par rapport à l'entrée à une valeur de (V_{pv}) $\alpha < 0.5$ Figure (II.15)

Pour sa valeur $\alpha = 0.8$ On remarque la tension de sortie (V_s) est élevée par rapport à la valeur d'entrée (V_{pv}) $\alpha > 0.5$ Figure (II.17).

Pour une valeur $\alpha = 0.5$, on note sur la Figure (II.16) que la valeur de tension de sortie (V_s) est élevée par rapport à la valeur de l'entrée (V_{pv}).

alfa	Vpv	V(sortes)
$\alpha = 0.3$	4.63	15.69
$\alpha = 0.5$	13.93	27.68
$\alpha = 0.8$	19.46	24.25

Tableau (II-1) : La valeur de la tension pour trois valeurs différentes α

II.6. Commande MPPT :

Des lois de commandes spécifiques ont été développées pour amener des dispositifs à fonctionner à des points maximums de leurs caractéristiques sans qu'a priori ces points soient connus à l'avance, ni sans que l'on sache à quel moment ils ont été modifiés ni qu'elles sont les raisons de ce changement. Pour le cas de sources énergétiques, cela se traduit par des points de puissance maximum. Ce type de commande est souvent nommé dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou bien « Maximum Power Point Tracking » en anglo-saxon (MPPT). Le principe de ces commandes vise à trouver le point de puissance maximal tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge afin de transférer la puissance maximale possible [21].

II.6.1. Principe De La Commande MPPT

Le principe de fonctionnement de la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) repose sur l'optimisation de la puissance de sortie d'un système photovoltaïque en ajustant en temps réel les conditions de fonctionnement des modules solaires pour maximiser leur rendement [11]. Le MPPT détecte en permanence le point de puissance maximale (MPP) du système, qui

correspond au point où la puissance de sortie est maximisée pour un niveau donné d'irradiance solaire et de température ambiante.

En ajustant la tension ou le courant de fonctionnement des panneaux solaires, le MPPT permet de maintenir le système fonctionnant au MPP malgré les variations des conditions environnementales.

En résumé, la commande MPPT vise à tirer le meilleur parti de l'énergie solaire disponible en ajustant les paramètres de fonctionnement des panneaux solaires pour maximiser la puissance de sortie du système photovoltaïque

II.6.2. Différents types de commandes MPPT

Les techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) visent à maximiser l'extraction d'énergie des panneaux solaires. Ces techniques reposent sur la mesure de la tension et du courant produits par les panneaux solaires et sur l'ajustement des charges pour assurer un fonctionnement au point de puissance maximale.

II.6.2.1. Méthodes Classiques:

Les commandes MPPT (Maximum Power Point Tracking) sont utilisées pour maximiser l'efficacité des panneaux solaires en ajustant constamment le point de fonctionnement du système afin de capter le maximum de puissance possible. Il existe plusieurs méthodes classiques de commande MPPT, chacune avec ses avantages et ses inconvénients. Voici un aperçu des types de commandes MPPT classiques :

- Perturbation et Observation (P&O)
- Conductance Incrémentale (IC)
- Méthode de la Tension Constante (CV)
- Méthode de l'Incrémentation de la Puissance

II.6.2.2. Méthodes Intelligentes:

Ces dernières années, des techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) ont été développées en utilisant des méthodes intelligentes pour améliorer les performances et l'efficacité des systèmes photovoltaïques. Ces méthodes intelligentes comprennent des techniques basées sur l'intelligence artificielle et des algorithmes avancés. Voici un aperçu de certains types de commandes MPPT intelligentes :

- Réseaux de Neurones Artificiels (ANN)
- Logique Floue (Fuzzy Logic)
- Algorithmes Génétiques (GA)

- Algorithme d'Optimisation par Colonies de Fourmis (ACO)
- Optimisation par Essaims de Particules (PSO)
- Algorithme de Recherche Harmonique (Harmony Search)

II.6.3. Algorithme basé sur la perturbation et l'observation (P&O) :

L'algorithme P&O est utilisé pour suivre le point de puissance maximale (MPPT), qui repose sur des variations de puissance pour déterminer le point de fonctionnement optimal du panneau solaire. En raison de sa structure simple et de sa mise en œuvre facile, ce qui la rend adaptée pour être utilisée sur des ensembles de portes programmables sur le terrain (FPGA). Le principe de fonctionnement de l'algorithme P&O est brièvement expliqué dans le schéma illustré. Cependant, il présente un inconvénient majeur en déviant du point de puissance maximale dans des conditions de changements rapides de rayonnement solaire, ce qui réduit sa précision et sa stabilité.[7]

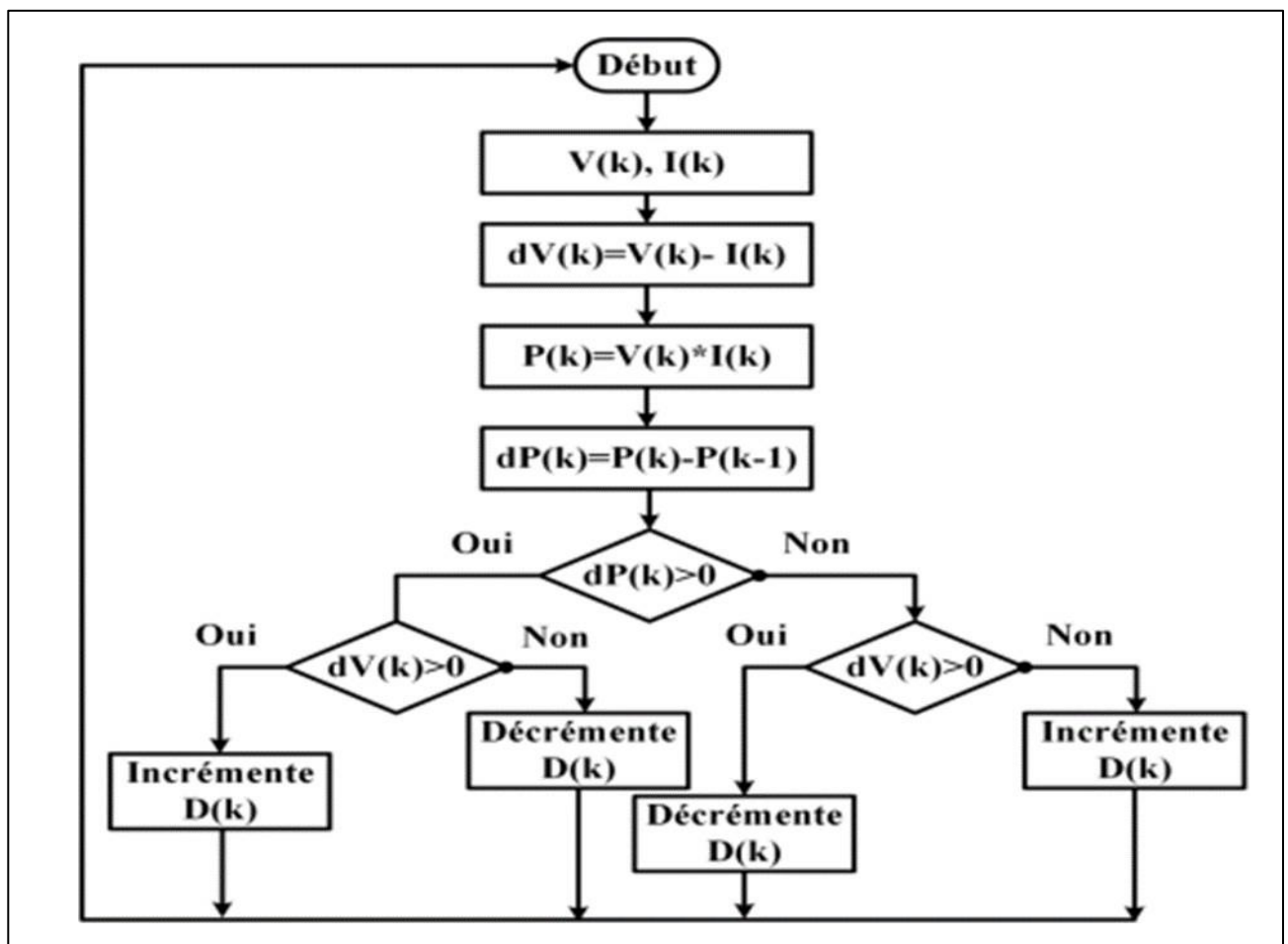


Figure II.18: Organigramme de l'algorithme P & O

Lorsqu'une fluctuation rapide de l'irradiation apparaît, l'algorithme P&O dévie du MPP, ce problème est illustré sur la figure (II.19). En supposant que le point de fonctionnement à un instant donné se trouve au point A, lorsque l'irradiation augmente rapidement, l'algorithme prend la fausse direction et se dirige vers le point B. Par la suite, il continue de suivre le point MPP périodiquement jusqu'à ce qu'il atteigne le point C. [20] Ce problème est déclenché parce que l'algorithme MPPT de type P&O ne discrimine pas les variations de puissance dues à l'évolution de l'irradiation ou à l'incrément de la perturbation au point de fonctionnement. Par conséquent, pour résoudre ce problème dans les cas les plus défavorables des changements climatiques, une nouvelle technique basée sur la logique floue sera proposée dans la section qui suit.

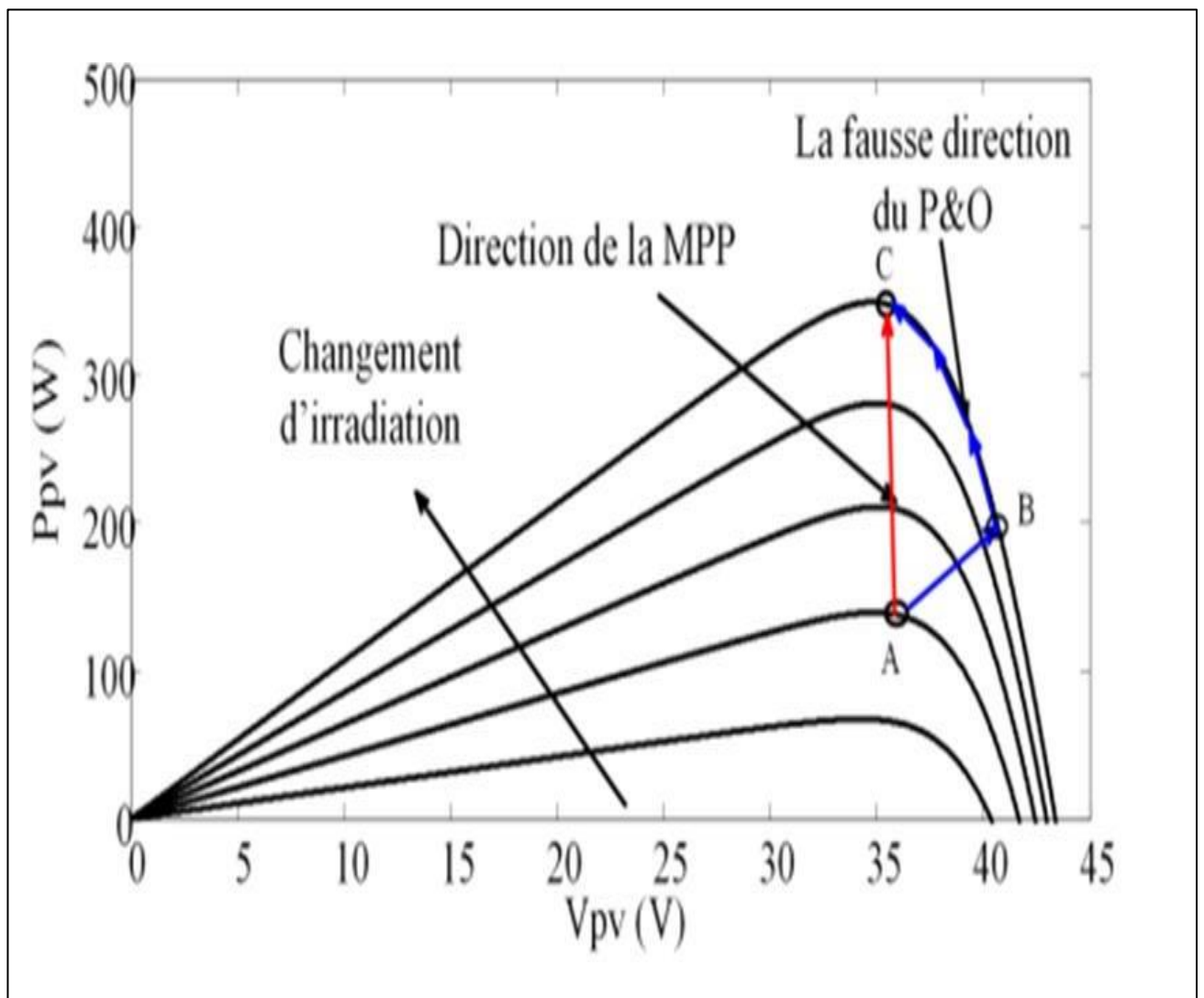


Figure II.19: Algorithme P&O sous l'évolution rapide d'irradiation

II.6.4. Simulation avec la commande P&O

Dans cette étude, on analyse la conception et la simulation d'une commande MPPT numérique basée sur la méthode de "perturbation et observation", qu'on a appliquée au système photovoltaïque.

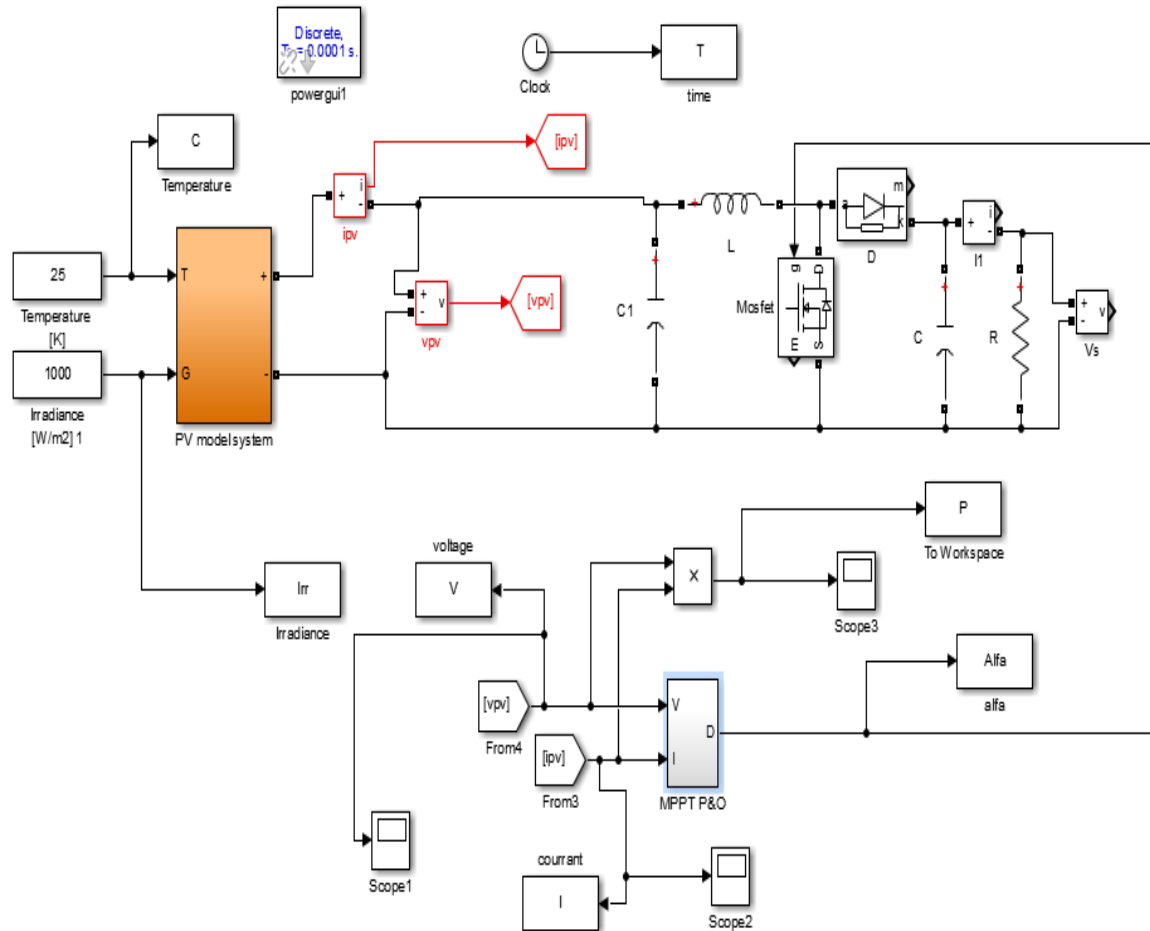
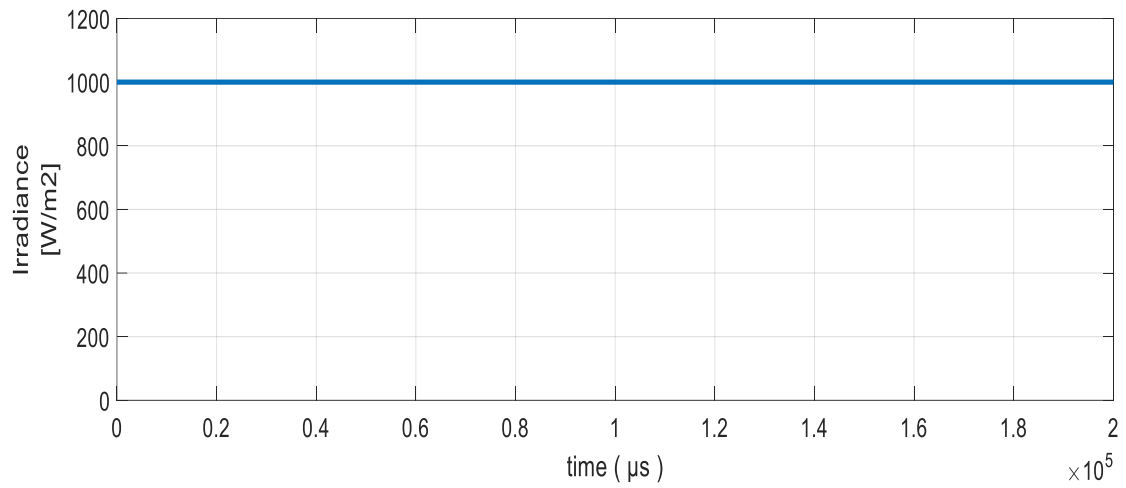
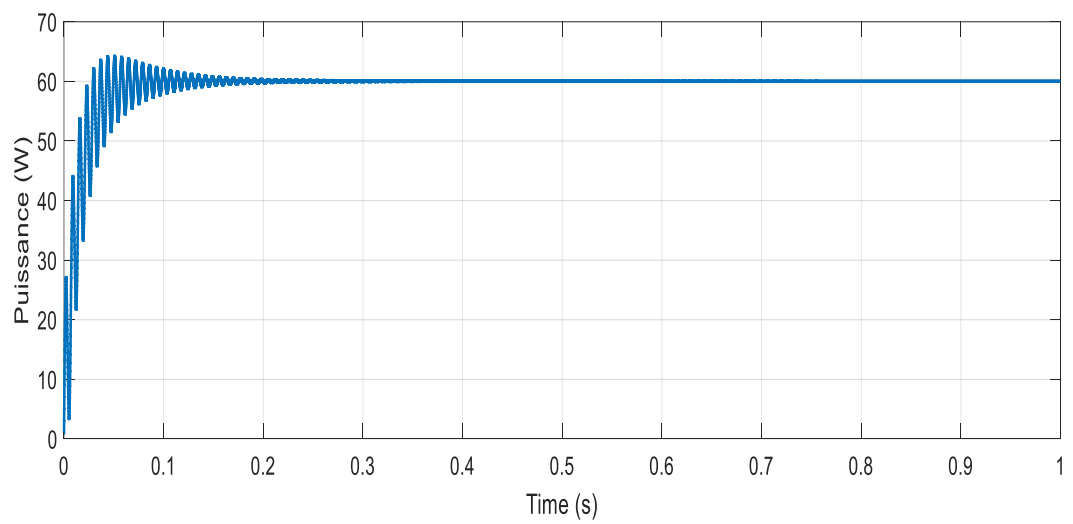
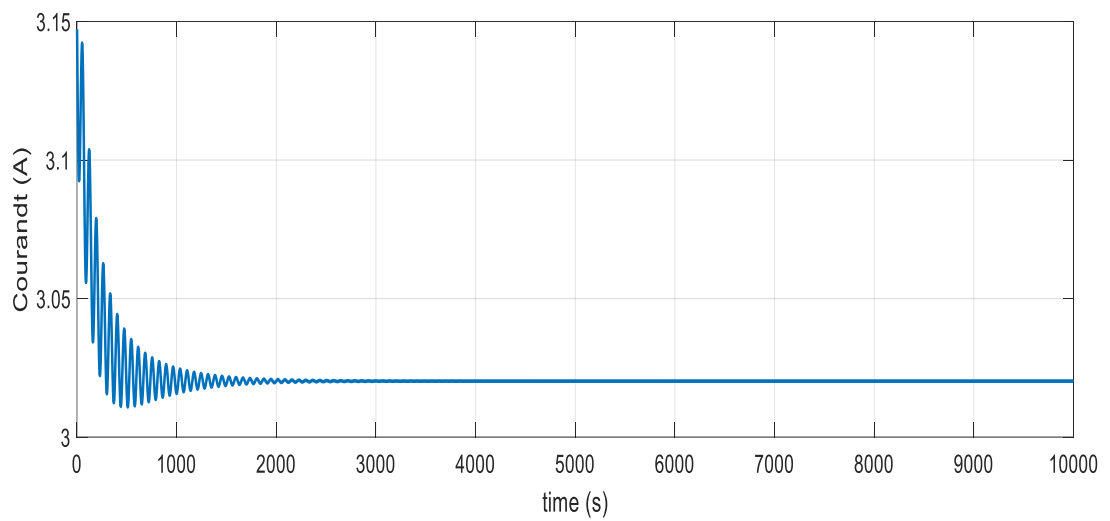


Figure II.20: Simulation avec la méthode P & O

II.6.5. Résultat de simulation :

II.6.5.1. Simulation sous des conditions climatiques stables :

Les simulations ont été effectuées en utilisant la technique P&O sur un système photovoltaïque sous un éclairage constant tel que présenté dans l'exemple (II.20). Durant toute la période de simulation, le contrôleur MPPT, à l'aide de la méthode P&O, extrait la puissance maximale, ce qui confirme clairement l'efficacité de l'algorithme P&O. Les figures (II.22) (a, b, c) illustrent les résultats des simulations pour la puissance, le courant et la tension respectivement.

**Figure II.21: Profile de l'éclairement****Figure II.22 (a) : Caractéristiques Puissance (W)****Figure II.23 (b) : Caractéristiques Courant (A)**

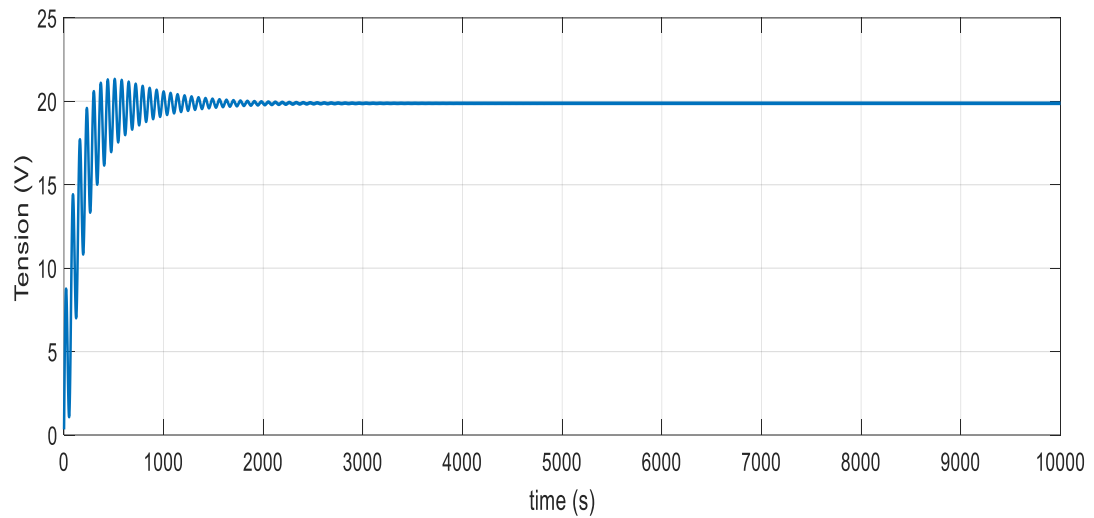


Figure II.24 (c): Caractéristiques Tension (V)

II.6.5.2. Simulation sous des conditions climatiques variables :

Les figures ci-dessous illustrent les résultats obtenus du fonctionnement de la puissance de système PV sous une :

- température constant $T = [25^{\circ}]$
- un éclairement variable $G = [400, 1000, 600, 200, 800] \text{ [W/m}^2\text{]}$

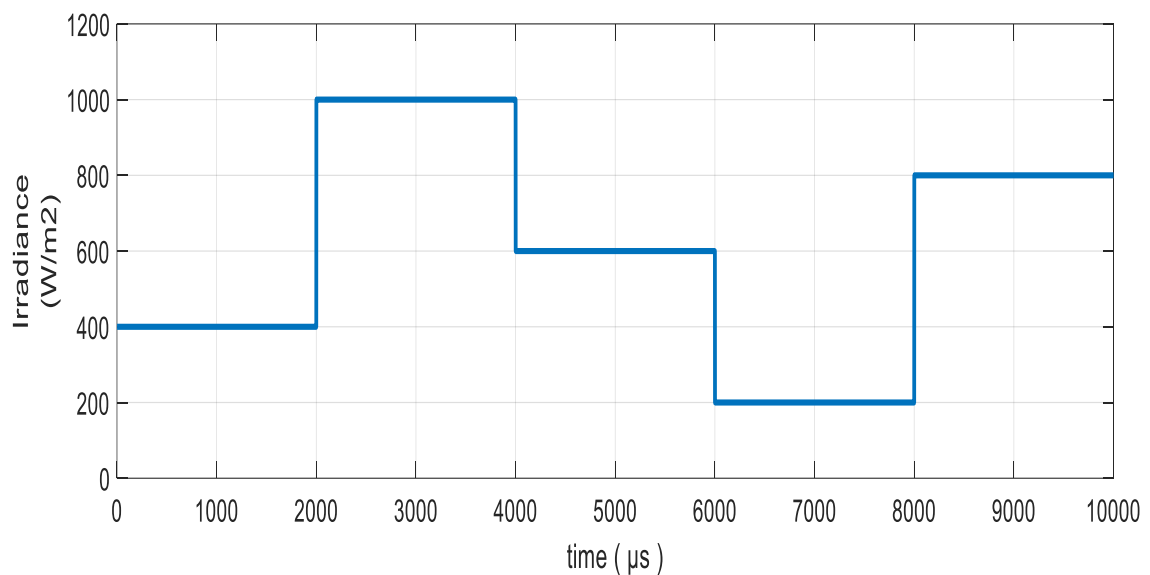
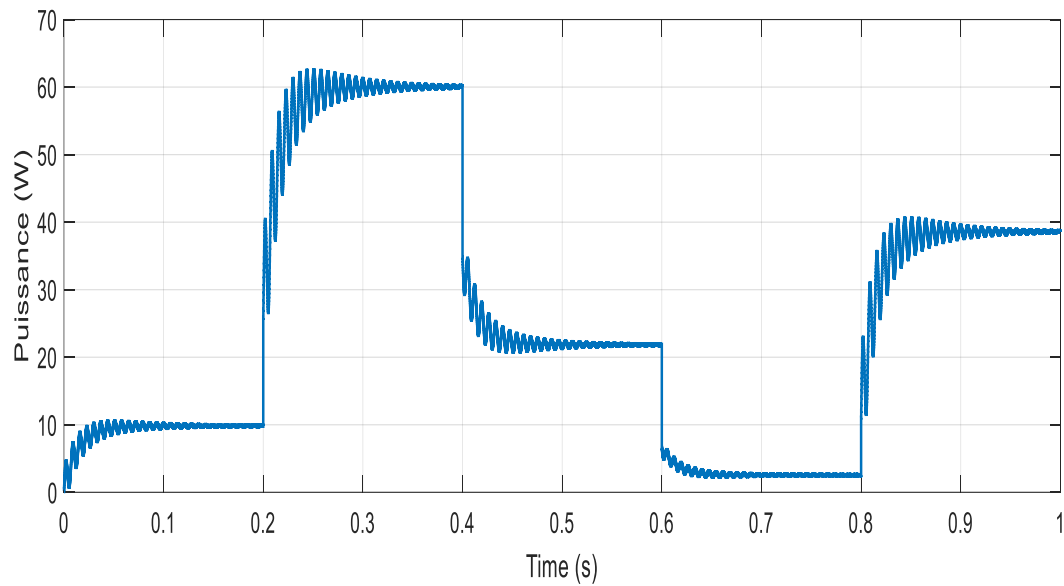


Figure II.25: Profile de l'éclairement.

Figure II.26 : Profile de puissance.

II.6.6. Analyse des résultats de P&O :

II.6.6.1. Simulation sous des conditions climatiques stables :

Les résultats ont montré que la puissance extraite du système photovoltaïque a atteint son pic et s'est stabilisée à une valeur constante, ce qui indique la réalisation du point de puissance maximale (MPP). Le courant généré par le système s'est stabilisé à une valeur reflétant les performances optimales du module sous des conditions stables. La tension générée s'est également stabilisée à la valeur qui permet d'atteindre le point de puissance maximale.

II.6.6.2. Simulation sous des conditions climatiques variables :

La puissance extraite a varié en fonction des changements du rayonnement solaire, ce qui reflète la réponse de l'algorithme aux conditions environnementales changeantes et la réalisation du point de puissance maximale dans chaque situation.

Le courant généré a montré des fluctuations correspondant aux variations du rayonnement solaire, ce qui indique l'adaptation de l'algorithme aux changements environnementaux.

La tension générée a également varié en fonction des changements du rayonnement solaire, reflétant la réalisation du point de puissance maximale sous chaque condition de rayonnement variable.

Les résultats de la simulation ont montré que l'algorithme MPPT utilisant la méthode P&O est efficace pour extraire la puissance maximale du système photovoltaïque sous des conditions climatiques stables et variables. Sous des conditions stables, la puissance, le courant et la tension se sont stabilisés à des valeurs reflétant la réalisation du point de puissance maximale. Sous des conditions variables, l'algorithme a démontré une adaptation efficace aux changements du rayonnement solaire, reflétant sa capacité à maintenir les performances optimales du système dans divers environnements.

II.7. Les algorithmes MPPT basés sur le principe de la logique floue

La commande par logique floue a été utilisée dans les systèmes de poursuite du point maximum de puissance MPPT, cette commande offre l'avantage d'être une commande robuste et relativement simple à élaborer et elle ne nécessite pas la connaissance exacte du modèle à réguler. La mise en place d'un contrôleur flou se réalise en trois étapes, qui sont : la fuzzification, l'inférence et la défuzzification.

II.7.1. Principe de la logique floue :

Le principe général et la théorie de base de la logique floue est la description d'un phénomène qui contient en général des expressions floues comme : Chaude, froid. Rapide, lent. Grand, moyen, petit. Max, min. Positive, nulle, négative...etc.

Les éléments constituant la théorie de base de la logique floue sont : Les variables linguistiques, les ensembles flous et les fonctions d'appartenance [24].

II.7.2. Structure générale d'un système flou :

Le système à base de la logique floue est composé de quatre blocs principaux Figure (II.25).

- Fuzzificateur
- Base de connaissances floues,
- Engine inférence floues,
- Défuzzificateur

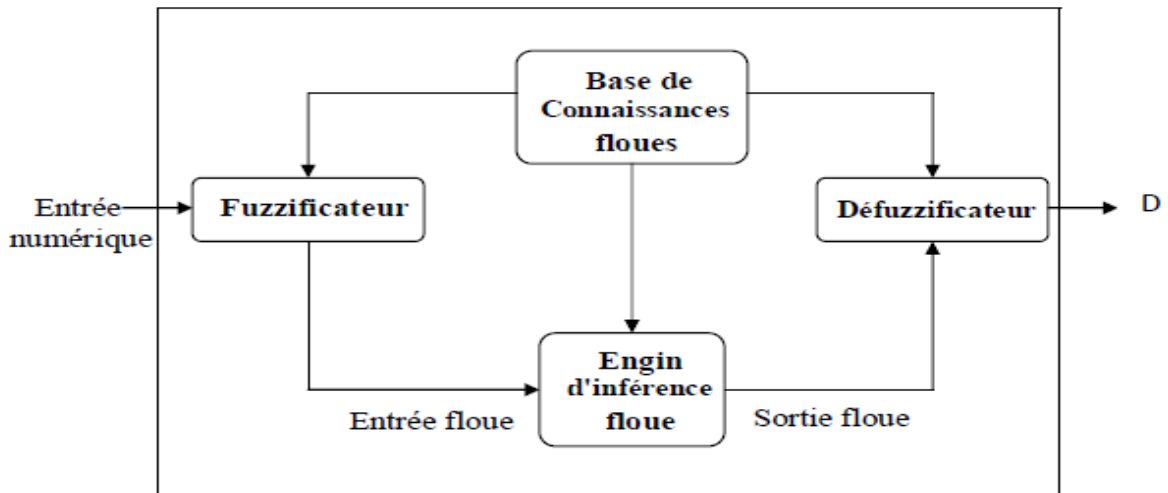


Figure II.27: Structure générale d'un système basé sur la logique floue

II.7.3. Contrôleur flou (FLC) utilisé avec un pas variable :

Le contrôleur flou FLC est utilisé pour faire varier en continu le pas d'incrément ou de décrémentation. Le contrôleur flou proposé est basé sur la connaissance préalable du système par un expert. La figure (II.26) amélioré par FLC avec un pas variable. Il se compose de quatre parties, Fuzzification, l'inférence, Défuzzification et les Bases de connaissances. Dans notre mémoire, le FLC construit avec deux variables d'entrée et une sortie. Les variables d'entrée du FLC sont la variation de la puissance du générateur PV, P_{pv} et variation du courant du GPV, I_{pv} tandis que la variable de sortie du FLC est la variation du pas, Δd [13].

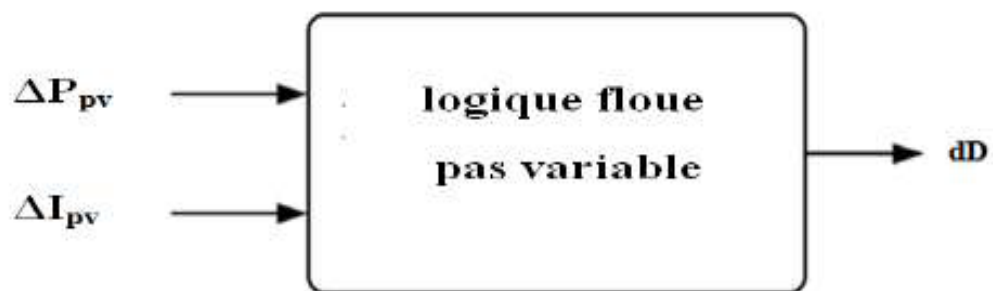


Figure II.28 : Bloc du calculateur de pas variable FLC proposé

Les entrées de bloc FLC peuvent être calculées à partir du capteur du courant et de tension. Les variables d'entrées, ΔP_{pv} et ΔI_{pv} , de bloc FLC proposé peuvent être calculées par les équations suivantes, où $P_{pv}(k)$ et $I_{pv}(k)$ sont respectivement la puissance et le courant du générateur PV et $V_{pv}(k)$ est la tension du réseau GPV.

$$P_{pv}(k) = V_{pv}(k) * I_{pv}(k) \quad (II.7)$$

$$\Delta P_{pv}(k) = P_{pv}(k) - P_{pv}(k-1) \quad (II.8)$$

$$\Delta I_{pv}(k) = I_{pv}(k) - I_{pv}(k-1) \quad (II.9)$$

Les fonctions d'appartenance des variables d'entrées et de sorties utilisées dans ce modèle est illustrée dans la Figure(II. 27) et (II.28). Toutes les fonctions d'appartenance sont exprimées avec une fonction triangulaire et se composent de cinq sous-ensembles flous qui sont notés NG (Négative Grande), NP (Négative Petite), ZZ (zéro), PP (Positive Petite) et PG (Positive Grande).

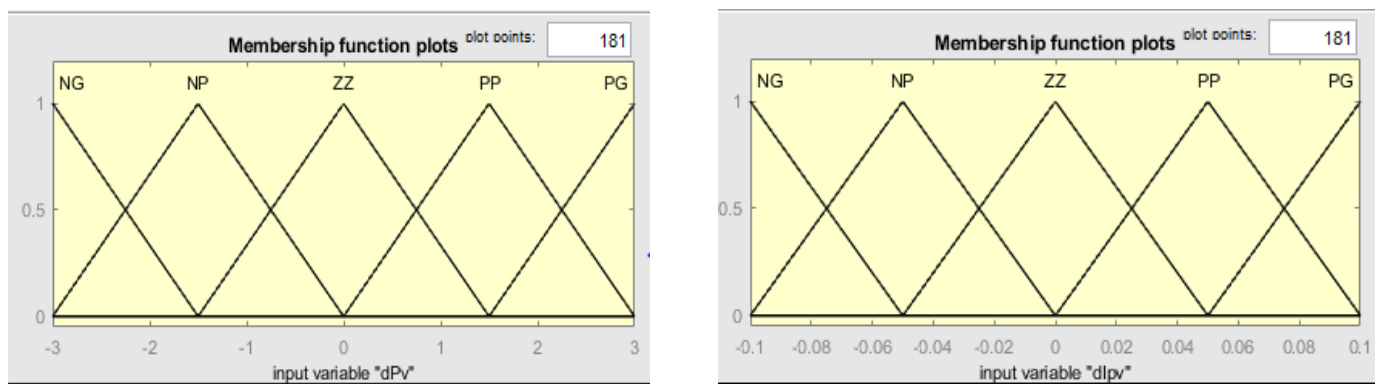


Figure II.29 :: Les fonctions d'appartenance des entrées

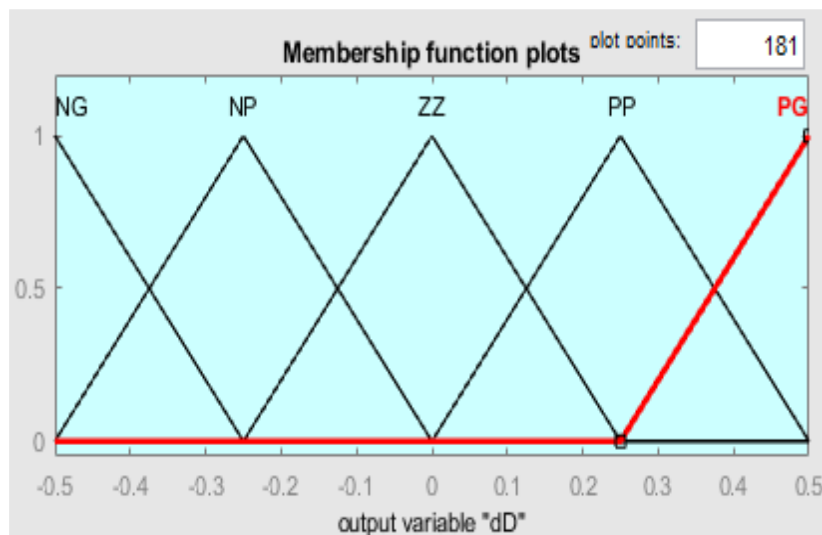


Figure II.30: Les fonctions d'appartenance de la sortie

La base de règles floues est une collection de règles si-alors que toutes les informations sont disponibles pour les paramètres contrôlés. Puisque le nombre de fonctions d'appartenance de chaque entrée est 5, alors les règles d'inférence floue du FLC consistent en 25 règles illustrées dans le tableau (II.2). Ces règles sont utilisées pour déterminer la sortie du contrôleur (le pas variable pour l'algorithme P&O) afin de suivre le point de puissance maximale.

La méthode de Mamdani est utilisée comme une méthode d'interface floue avec l'opération max-min combinée à la loi floue dans ce travail. La sortie du FLC proposé est défuzzifier pour calculer Δd [13].

ΔI_{pv}	ΔP_{pv}				
	NG	NP	ZZ	PP	PG
NG	NG	NP	NP	ZZ	ZZ
NP	NP	ZZ	ZZ	ZZ	PP
ZZ	ZZ	ZZ	ZZ	PP	PP
PP	ZZ	PP	PP	PP	PG
PG	PP	PP	PG	PG	PG

Tableau (II-2) : Les règles utilisées pour déterminer la sortie Δd

II.7.4. Simulation avec la commande FLC :

Dans cette étude, on analyse la conception et la simulation d'une commande MPPT numérique basée sur la méthode de "contrôle flou avec un pas variable", qu'on a appliquée au système photovoltaïque.

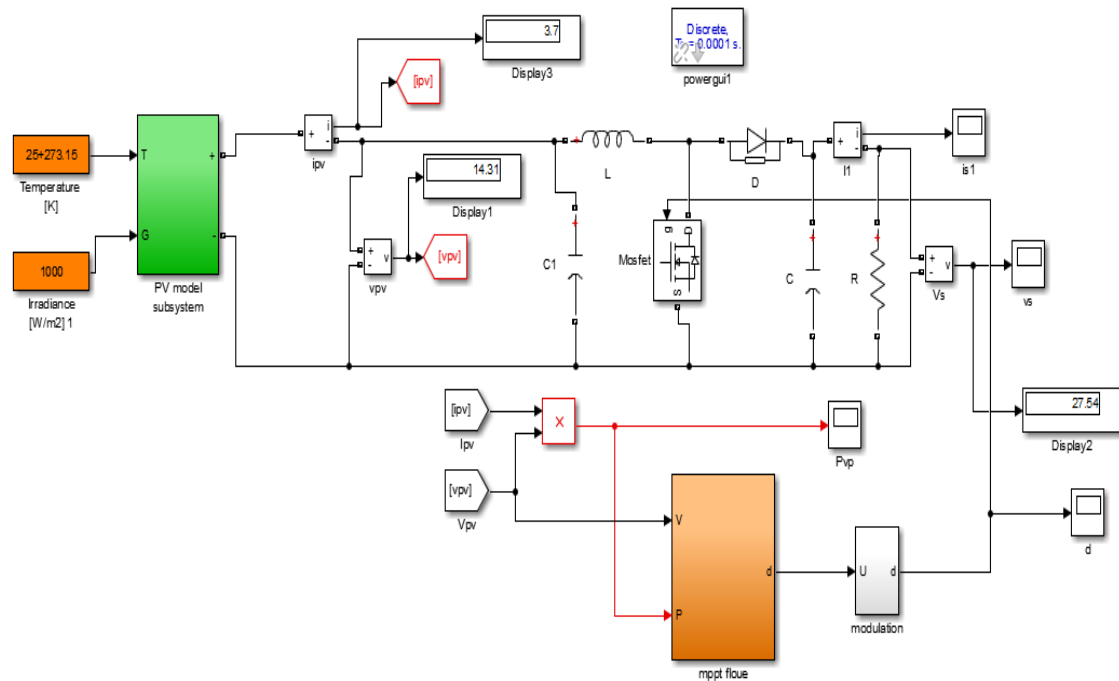


Figure II.31: Simulation avec la méthode FLC.

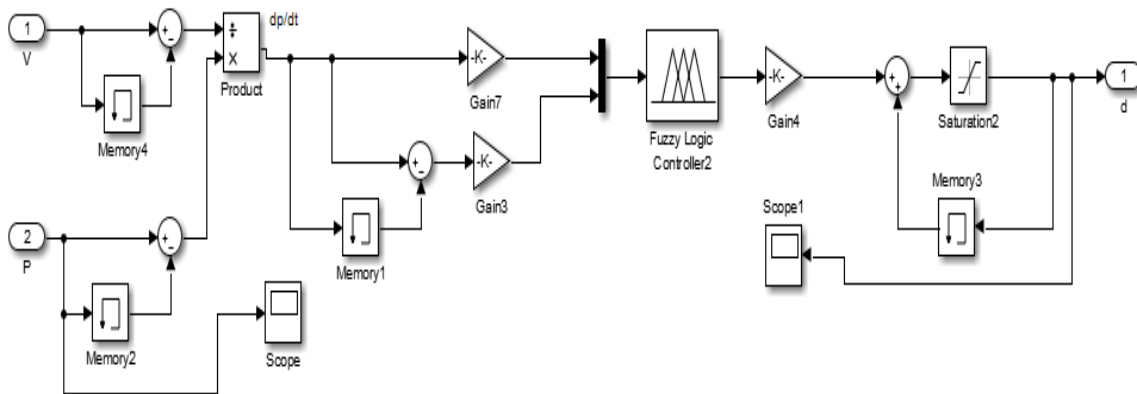


Figure II.32: Schéma bloc de l'algorithme MPPT basé sur la logique floue

II.7.5. Résultat de simulation :

II.7.5.1. Simulation sous des conditions climatiques stables :

Les simulations ont été effectuées en utilisant la technique de contrôle flou avec un pas variable sur un système photovoltaïque sous un éclairage constant tel que présenté dans l'exemple (II.29 et 30). Durant toute la période de simulation, le contrôleur MPPT, à l'aide de la méthode de contrôle flou avec un pas variable, extrait la puissance maximale, ce qui confirme clairement l'efficacité de cette méthode. Les figures (II.32) (a, b, c) illustrent les résultats des simulations pour la puissance, le courant et la tension respectivement.

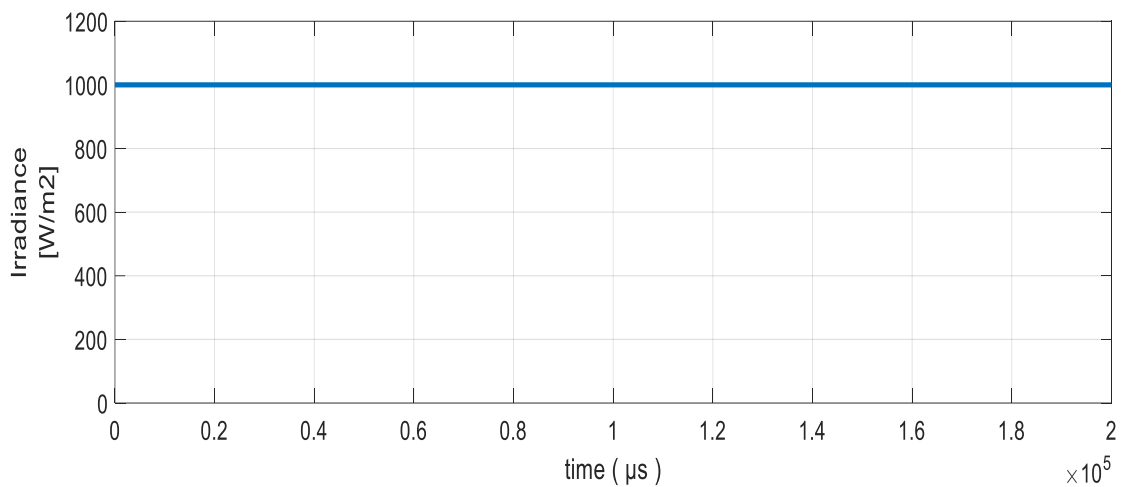


Figure II.33 :Profile de l'éclairement.

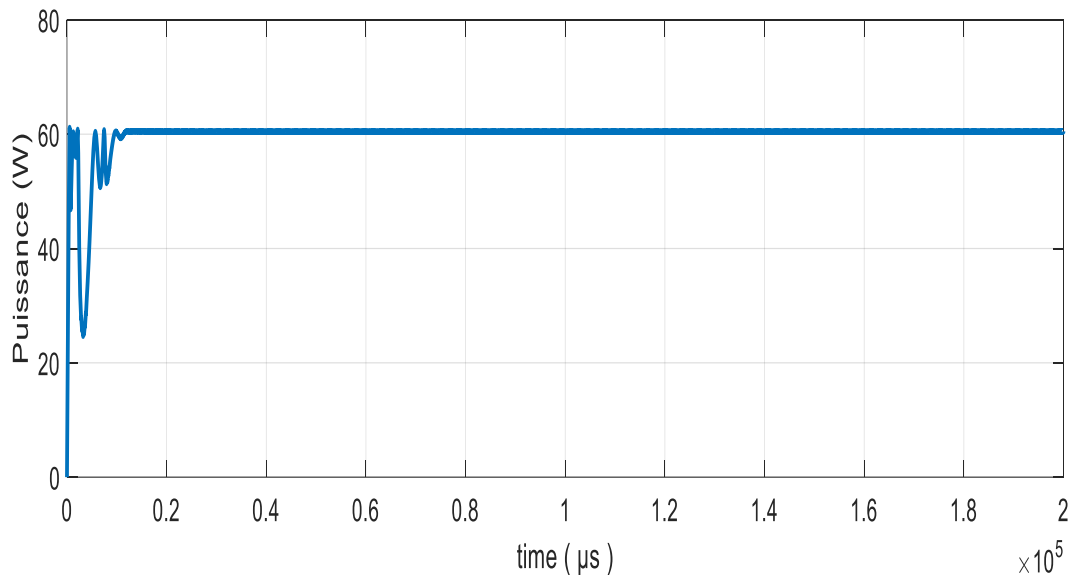


Figure II. 34 (a): Caractéristiques Puissance (W)

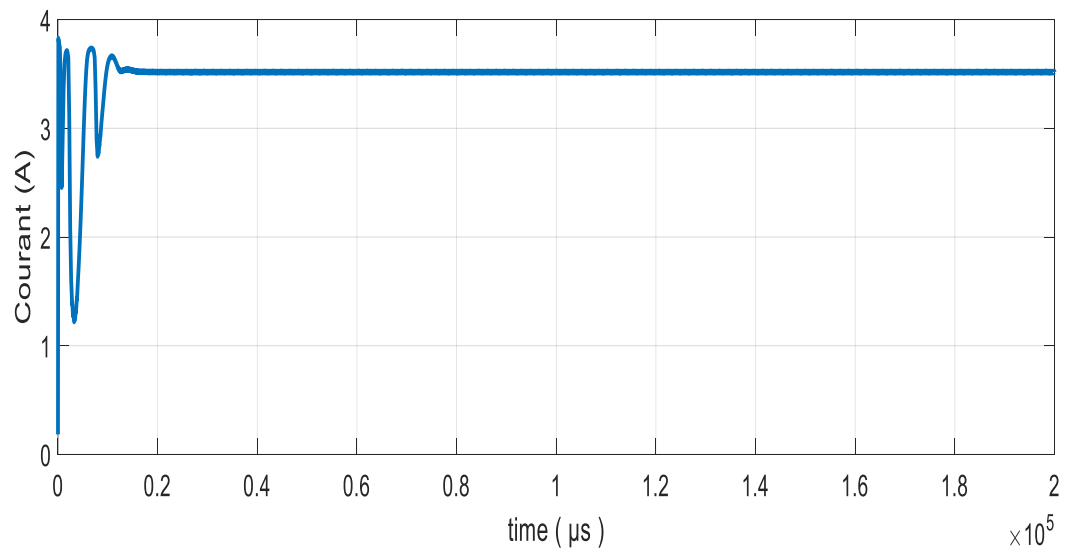


Figure II. 35(b) : Caractéristiques Courant (A)

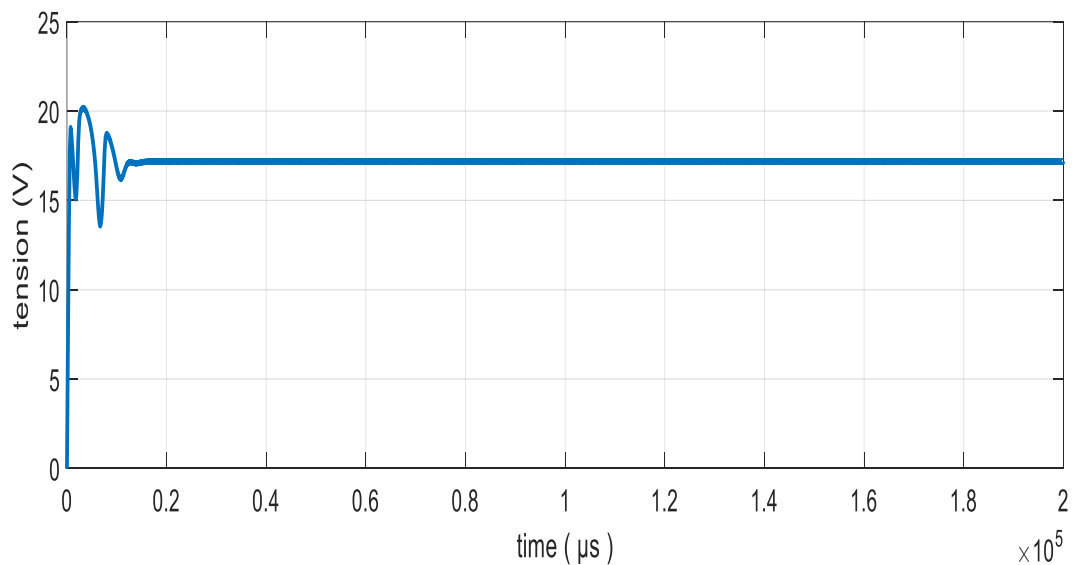


Figure II. 36(c) : Caractéristiques Tension (V)

II.7.5.2. Simulation sous des conditions climatiques variables :

Les figures ci-dessous illustrent les résultats obtenus du fonctionnement de la puissance de système PV sous une :

- température constant $T = [25]$
- un éclairement variable $G = [400, 1000, 600, 200, 800]$

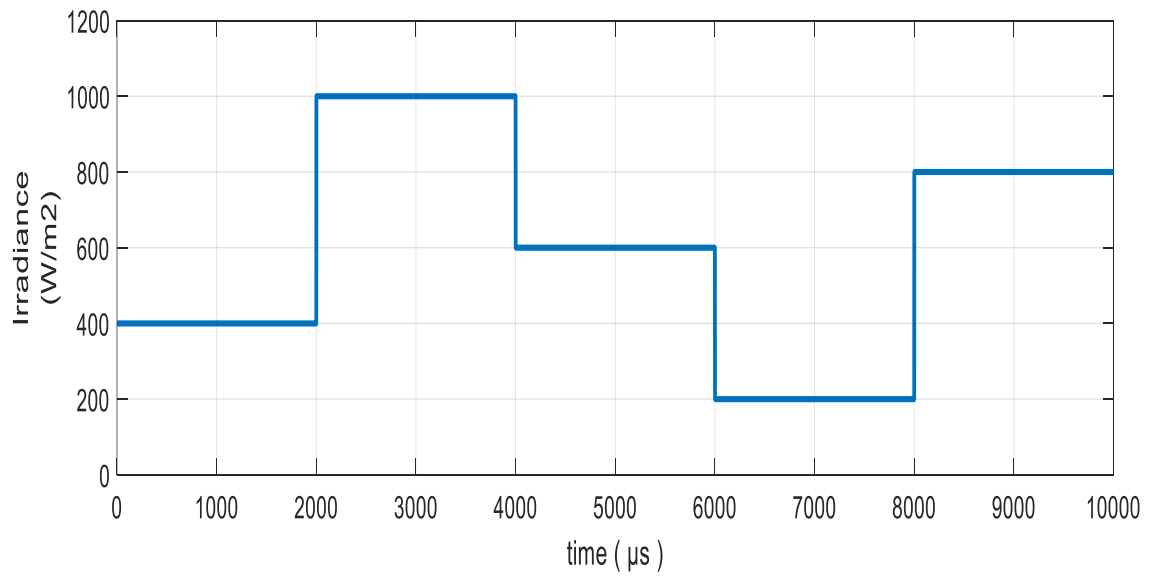


Figure II.37 : Profile de l'éclairement.

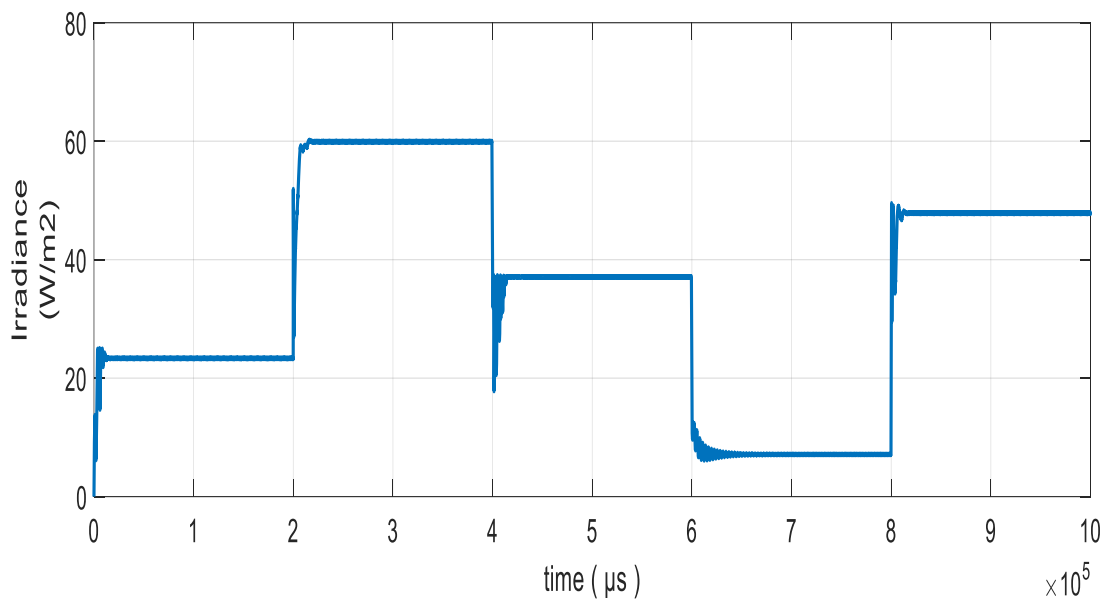


Figure II.38 : Profile de puissance.

II.7.6. Analyse des résultats de FLC:

Résultats de la simulation de l'algorithme MPPT utilisant le contrôleur flou (FLC) sous des conditions climatiques stables et variables

II.7.6.1. Simulation sous des conditions climatiques stables :

La simulation a été réalisée en utilisant un contrôleur flou (Fuzzy Logic Controller, FLC)

pour l'algorithme MPPT sur un système photovoltaïque (PV) sous un rayonnement solaire constant et une température constante. Le rayonnement solaire a été fixé à et la température à. Pendant toute la période de simulation, l'algorithme MPPT utilisant le FLC a extrait la puissance maximale, confirmant ainsi l'efficacité du contrôleur flou.

➤ **Résultats :**

Puissance (P) : Les résultats ont montré que la puissance extraite du système photovoltaïque a atteint son pic et s'est stabilisée à une valeur constante, indiquant la réalisation du point de puissance maximale (MPP).

Courant (I) : Le courant généré par le système s'est stabilisé à une valeur optimale, reflétant les performances maximales du module sous des conditions stables.

Tension (V) : La tension générée s'est également stabilisée à la valeur permettant d'atteindre le point de puissance maximale.

II.6.6.2. Simulation sous des conditions climatiques variables :

Pour analyser les performances de l'algorithme FLC sous des conditions climatiques variables, une simulation a été réalisée en utilisant le contrôleur flou avec des variations du rayonnement solaire et de la température comme suit :

- Température : La température a été maintenue constante à $T = [25^\circ]$
- Rayonnement solaire : Le rayonnement solaire a été modifié selon la séquence suivante :

$$G = [400, 1000, 600, 200, 800] \text{ [W/m}^2\text{]} 2$$

➤ **Résultats :**

Puissance (P) : La puissance extraite a varié en fonction des changements du rayonnement solaire, démontrant la capacité de l'algorithme FLC à répondre aux conditions environnementales changeantes et à atteindre le point de puissance maximale dans chaque situation.

Courant (I) : Le courant généré a montré des fluctuations correspondant aux variations du rayonnement solaire, indiquant l'adaptation efficace du contrôleur flou aux changements environnementaux.

Tension (V) : La tension générée a également varié en fonction des changements du rayonnement solaire, reflétant la réalisation du point de puissance maximale sous chaque condition de rayonnement variable.

Les résultats de la simulation ont démontré que l'algorithme MPPT utilisant un contrôleur flou (FLC) est efficace pour extraire la puissance maximale du système photovoltaïque sous des

conditions climatiques stables et variables. Sous des conditions stables, la puissance, le courant et la tension se sont stabilisés à des valeurs optimales, reflétant la réalisation du point de puissance maximale. Sous des conditions variables, l'algorithme FLC a montré une adaptation efficace aux changements du rayonnement solaire, confirmant sa capacité à maintenir les performances optimales du système dans divers environnements.

II.8. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons entamé la partie la plus importante et la plus délicate de cette étude. Il s'agit de la description du convertisseur DC/DC qui est un convertisseur de puissance (DC/DC de type Boost) commandé par un algorithme MPPT.

Dans la première partie de ce chapitre, Nous avons présenté le principe de la connexion directe entre le générateur photovoltaïque et la charge. Ensuite, nous avons étudié théoriquement le fonctionnement d'un convertisseur de type Boost qui est employés très souvent. La commande de ces convertisseurs s'effectue par une variation du rapport cyclique du signal de commande de l'interrupteur qui est déduit de l'algorithme du MPPT.

La deuxième partie, est consacrée à l'explication de principe de recherche du MPP après l'étude des différentes algorithmes MPPT utilisés dans notre travail, la méthode de perturbation et observation, et enfin l'algorithme MPPT basé sur la logique floue. Cependant, l'implémentation d'un ces types d'algorithme est l'objectif de chapitre prochain.

Chapitre III :Réalisation des systèmes de commande MPPT

III.1. Introduction :

Sur la base des fondements théoriques et cognitifs abordés dans les chapitres précédents concernant les différents éléments du système photovoltaïque, nous avons le plaisir, dans ce dernier chapitre, de présenter une explication détaillée de la mise en œuvre d'un convertisseur boost avec un système de contrôle MPPT, en utilisant l'algorithme classique de "perturbation et observation". Ce chapitre examinera les résultats pratiques de cette application, y compris les étapes prises, les améliorations appliquées et obtenues au cours de cette étude.

III.2. Réalisation du hacheur Boost :

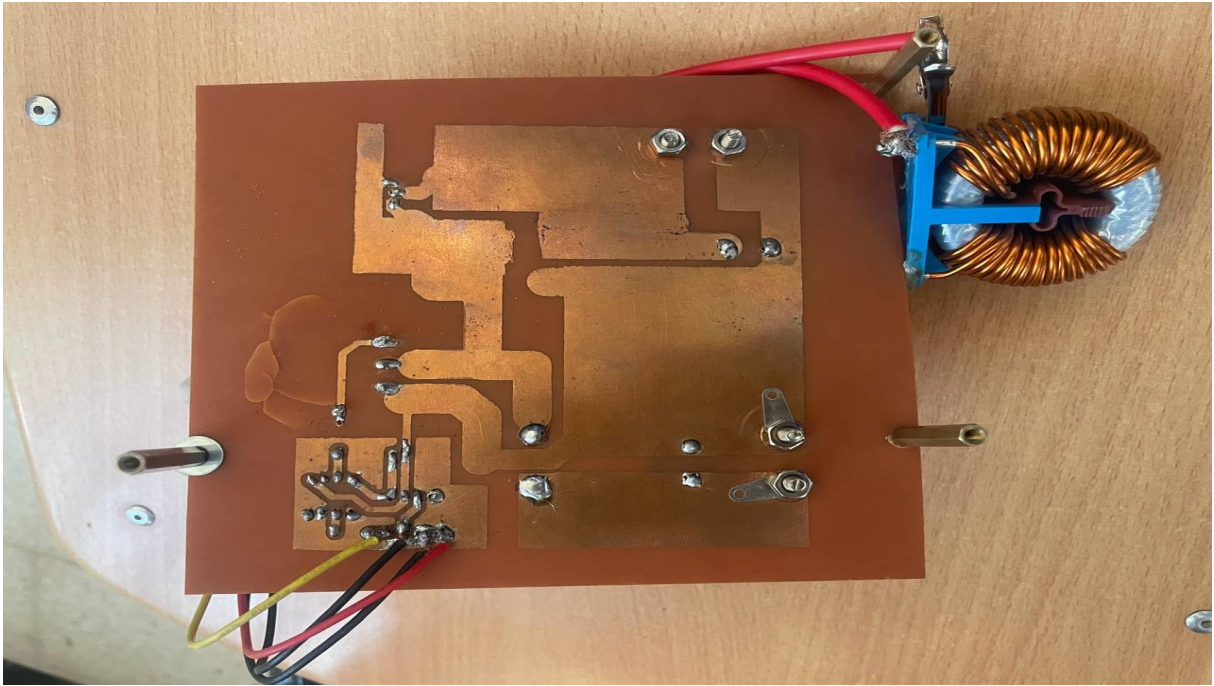
Pour la réalisation de ce convertisseur, nous avons passé par deux étapes :

III.2.1. Réalisation de circuit imprimé :

L'implémentation des circuits imprimés (PCB) est une étape fondamentale dans la conception des systèmes électroniques. Les PCB sont réalisés sur des substrats isolants tels que le fibre de verre, et les pistes de câblage conductrices sont imprimées dessus en utilisant du cuivre. Ces pistes sont utilisées pour connecter les composants électroniques sur la carte. Le PCB est considéré comme le principal moyen de connecter les composants électroniques de manière intégrée et organisée[10] .

Les pistes conductrices sont placées sur un seul côté de la carte, tandis que l'autre côté est laissé libre pour connecter les composants électroniques. Les PCB à face simple offrent un avantage en termes de coût, d'espace et de facilité de fabrication.

Dans notre projet, nous avons travaillé sur un PCB à face simple. La Figure (III.1) illustre la réalisation d'un circuit de convertisseur boost en utilisant le logiciel "Proteus" (ARES) pour son impression sur la carte.



Figure(III-.1) : Circuit imprimé du hacheur réalisé

III.2.2. Soudure des composants électroniques



Figure(III-.2) : schema de l'hacheur boost

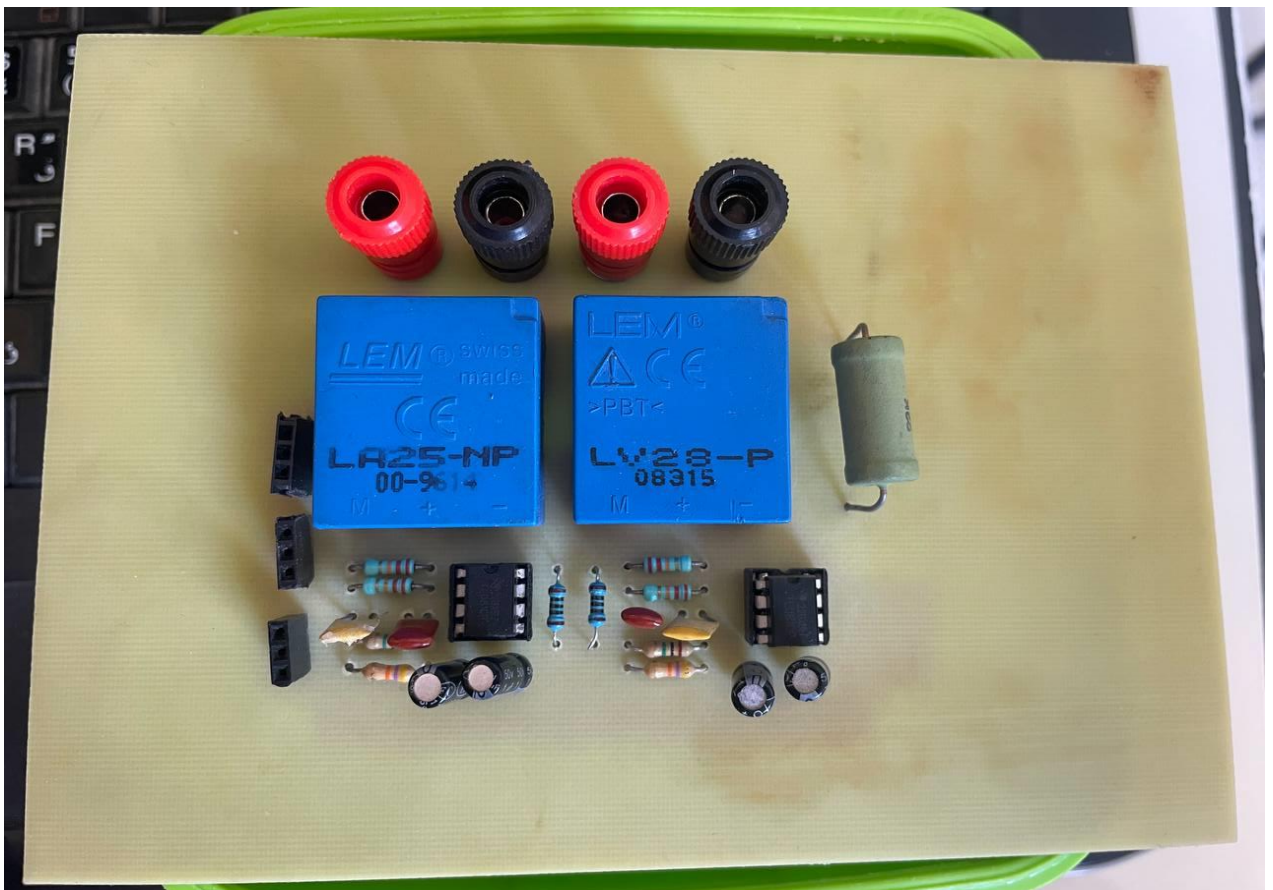
III.3. Différents composants du système :

III.3.1. Capteurs de tension/courant utilises :

III.3.1.1. Définition sur les capteurs

Un capteur est un dispositif capable de convertir une quantité physique (telle que la température, la pression, la lumière, etc.) en une autre quantité physique qui peut être utilisée. Un capteur est un dispositif capable de convertir une quantité physique (telle que la température, la pression, la lumière, etc.) en une autre quantité physique qui peut être manipulée. Par exemple, un microphone est un capteur qui convertit les ondes sonores en signaux électriques ; un autre capteur, tel qu'une photorésistance, convertit les signaux lumineux en une résistance qui change d'intensité.

Dans ce travail, un circuit électronique a été conçu et réalisé pour mesurer la tension et le courant sur une carte de circuit imprimé à face unique. La figure ci-dessous illustre l'architecture et les détails spécifiques du circuit conçu.



Figure(III-.3) : schema de la capteur tension et le courant

III.3.1.2. Capteur de courant Transducer LA 25-NP:

Le dispositif LA 25-NP offre un moyen précis de détection de courants AC et DC. Ce capteur de courant est basé sur le principe de l'effet Hall, qui a été découvert par le Dr Edwin Hall en 1879. Selon ce principe, quand un conducteur de courant est placé dans un champ magnétique, une tension est générée sur ses bords perpendiculaires à la direction à la fois du courant et du champ magnétique.

Les principales caractéristiques du Transducer LA 25-NP sont les suivantes :

- Courant nominal mesuré : 25 A RMS
- Plage de mesure du courant : ± 25 A
- Courant de sortie : ± 25 mA
- Tension d'alimentation : 12-15 V DC
- Résistance de charge : 50 Ω (max)
- Précision : $\pm 1\%$ de la pleine échelle
- Temps de réponse: $\leq 1 \mu s$
- Plage de température de fonctionnement: $-40^{\circ}C$ à $+85^{\circ}C$



Figure(III-.4) : Capteur de courant LA 25-NP)

Ce dispositif est conçu pour être monté sur un circuit imprimé (PCB) ou à travers des trous et est conforme aux normes industrielles pour garantir des performances et une fiabilité optimale

III.3.1.3. Capteur de tension (LV 28-P Voltage Transducer):

Le capteur LV 25-P est un dispositif de mesure de tension utilisant la technologie à boucle fermée (principe de l'effet Hall), principalement utilisé dans les applications industrielles pour mesurer les tensions alternatives et continues.



Figure(III-.5) : Capteur de tension (LV 28-P)

Les caractéristiques du capteur LV 28-P sont les suivantes :

- Type : Capteur de tension fonctionnant avec un système à boucle fermée.
- Type de sortie: Tension.
- Tension nominale primaire : Peut mesurer des tensions allant jusqu'à 500 volts.
- Plage de température de fonctionnement : De 0°C à 70°C.

Ce capteur est réputé pour sa précision et sa capacité à fonctionner dans une variété d'applications industrielles.

III.3.2. L'unité de commande :

L'unité de commande est l'unité de décisions. Son rôle est d'effectuer les calculs correspondants et commander l'interrupteur du BOOST par un algorithme MPPT. En pratique, tout ceci peut être accompli par l'utilisation d'un microcontrôleur. Notre choix s'est porté sur la carte Arduino Mega2560.

III.3.2.1. Définition de la carte Arduino Mega2560:

Les cartes Arduino sont conçues pour réaliser des prototypes et des maquettes de cartes électroniques pour l'informatique embarquée.

Ces cartes permettent un accès simple et peu coûteux à l'informatique embarquée. De plus, elles sont entièrement libres de droit, autant sur l'aspect du code source (Open Source) que sur l'aspect matériel (Open Hardware). Ainsi, il est possible à tout utilisateur de refaire sa propre carte Arduino dans le but de l'améliorer ou d'enlever des fonctionnalités inutiles à son projet.

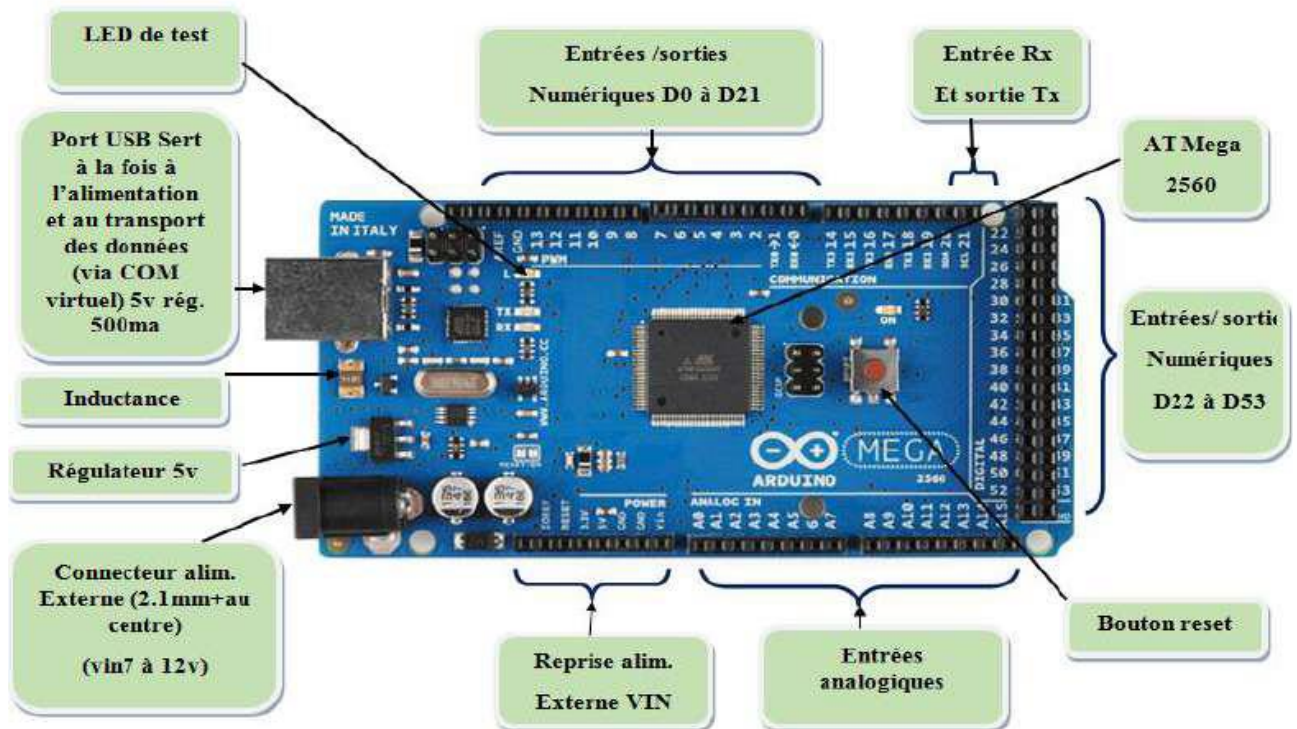
Le langage Arduino se distingue des langages utilisés dans l'industrie de l'informatique embarquée par sa simplicité.

En effet, beaucoup de bibliothèques et de fonctionnalités de base sont disponibles ce qui permet de faciliter la réalisation des prototypes ou des petites applications [8].

La carte Arduino Mega 2560 est basée sur un ATmega 2560 cadencé à 16 MHz. Elle dispose de 54 E/S dont 14 PWM, 16 analogiques et 4 UARTs. Elle est idéale pour des applications exigeant des caractéristiques plus complètes que la carte Uno [8].

III.3.2.2. Présentation de la carte Arduino Mega 2560 :

Actuellement, il existe plus de 20 versions de module Arduino, nous citons l'Arduino UNO, l'Arduino Mini, l'Arduino Nano, l'Arduino Diecimila, et l'Arduino Mega2560. Parmi ces types, nous avons choisi une carte Arduino Mega (ATmega 2560). Elle contient beaucoup de caractéristiques qui seront données par la suite. La carte est illustrée dans la figure (III.6)



Figure(III-6) : Présentation de la carte Arduino Méga 2560

III.3.3. Fiche technique du PV utilise :

Dans notre réalisation, nous utilisons un module PV du type photovoltaïque DSP-80M.

Puissance maximum P max	80 W
Tension en circuit ouvert (Voc)	22.5 V
Courant de court-circuit (Isc)	4.96 A
Tension à Pmax (Vmp)	18 V
Courant à Pmax (Imp)	4.44 A
Working Temperature	--45°C TO +85°C
Tolerance	± 3%
OQC	1

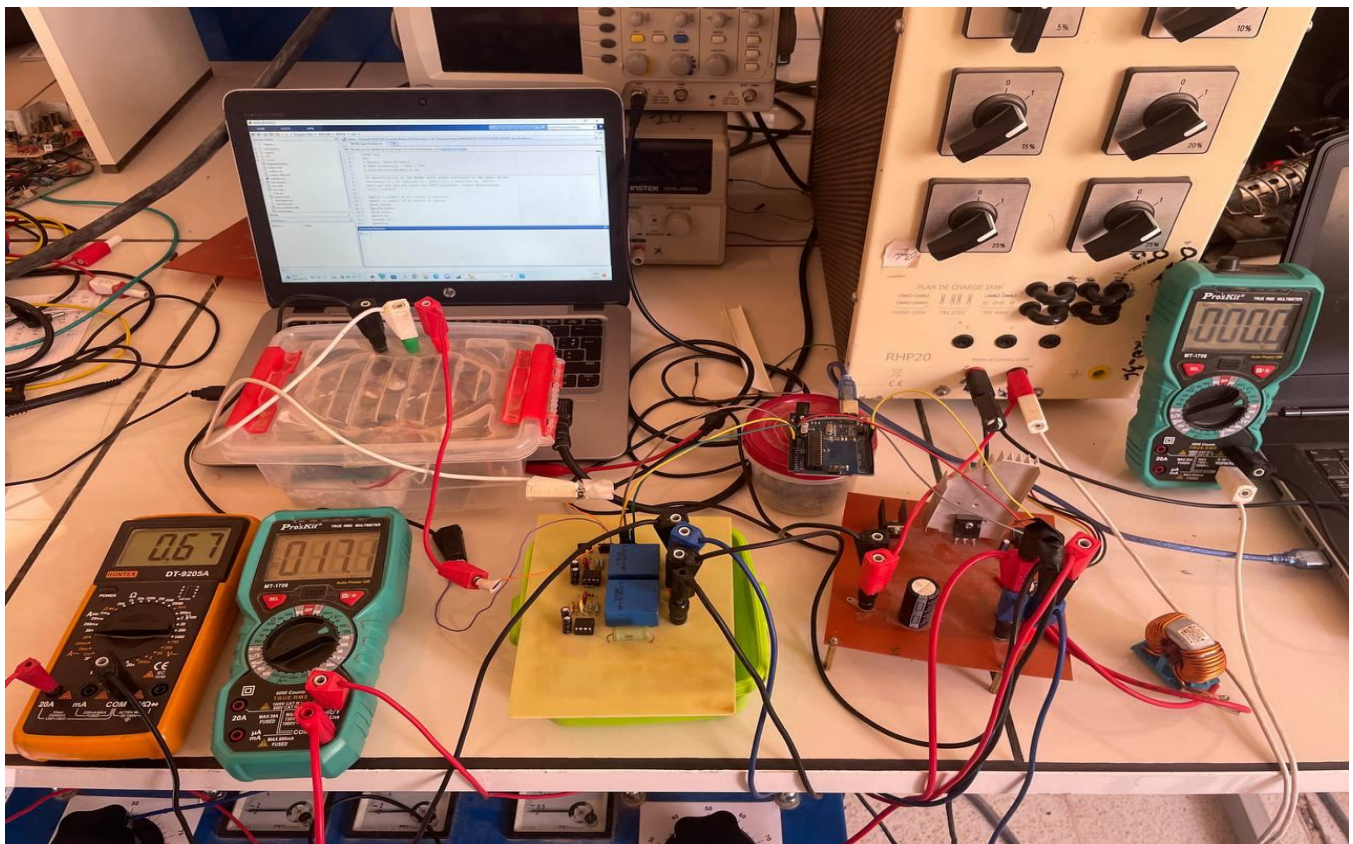
Tableau (III-1) :Caractéristique du PV 80W



Figure(III-.7) Module DSP-80M

III.4. Montage du système complet :

La figure (III-8) représente le système complet de la commande mppt avec l'hacheur boost.



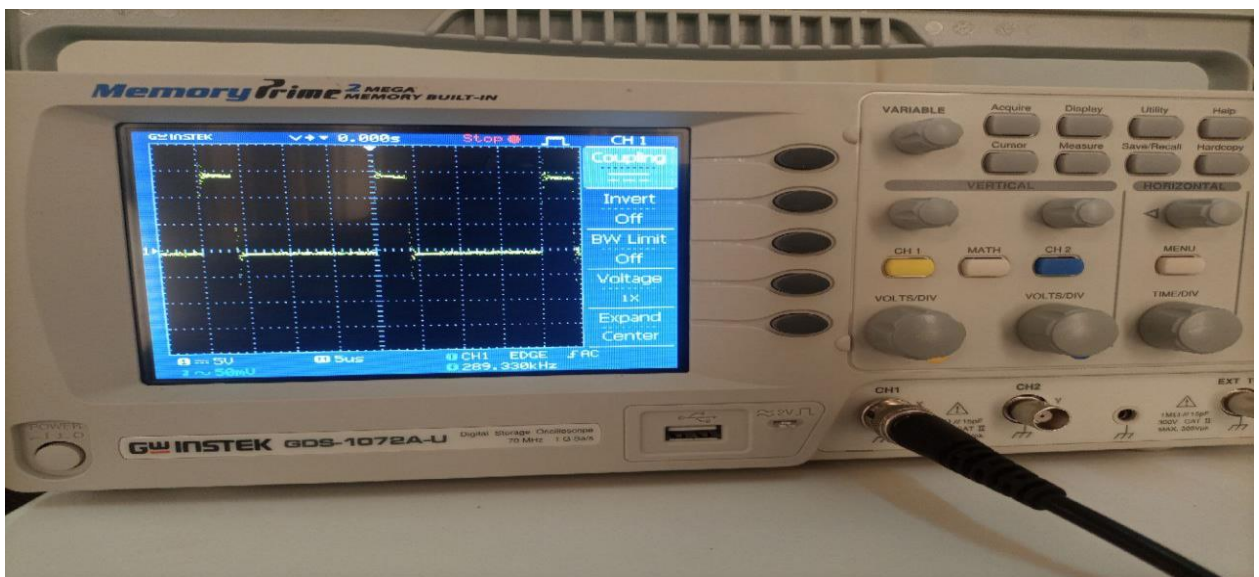
Figure(III-.8) : Système PV réalisé.

III.5. Test et Résultat :

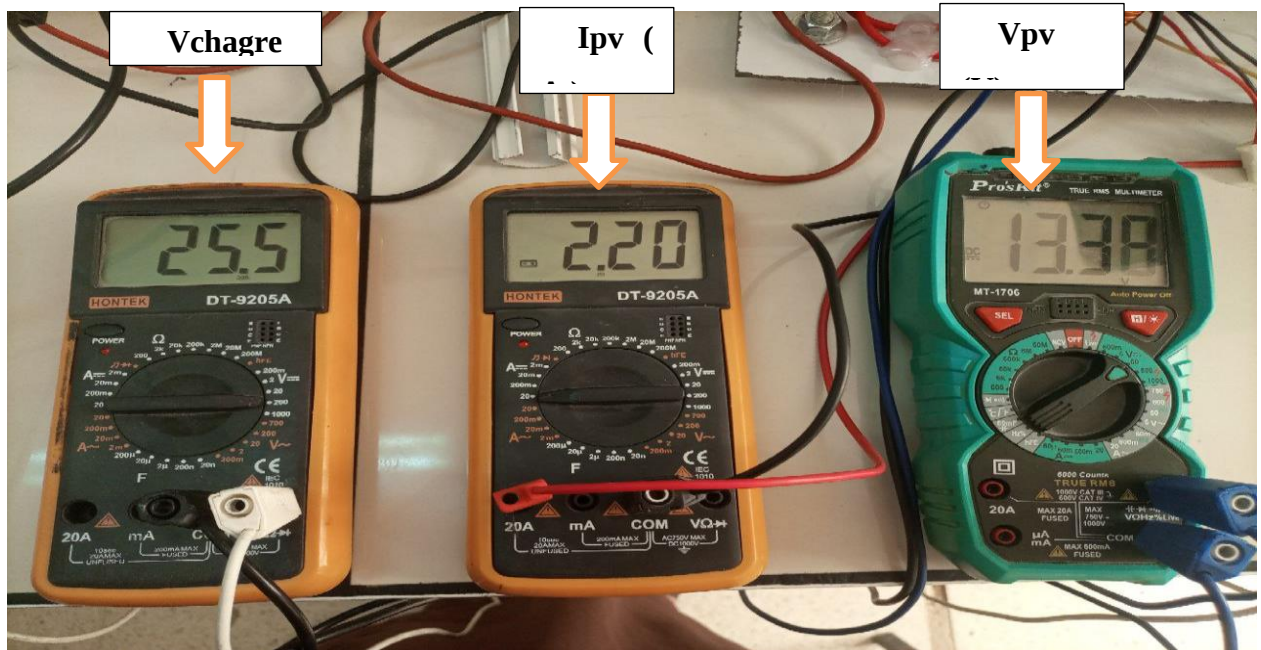
III.5.1. Test de l'hacheur boost :

En réalisant le montage complet, Le microcontrôleur d'Arduino mesure les signaux I_{pv} et V_{pv} , qui sont filtrés à travers les pin A0 et A1. Le microcontrôleur traitera ces informations et il les multiplie pour calculer la puissance moyenne, on a effectuée le test suivant :

- la simulation du fonctionnement du système avec un rapport cyclique α de 0,5.



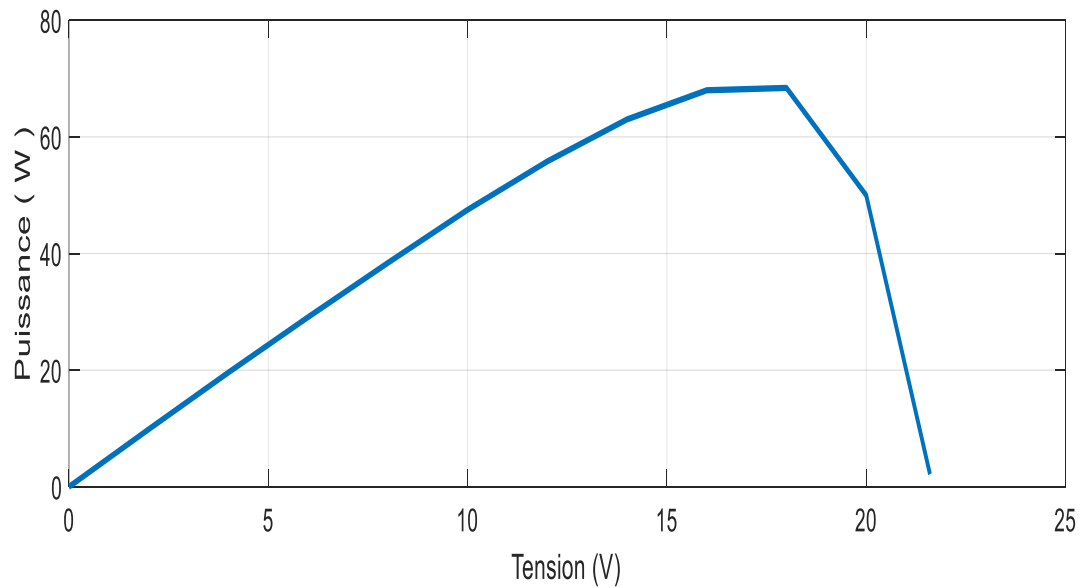
Figure(III-9) : Rapport cyclique avec $\alpha=0.5$



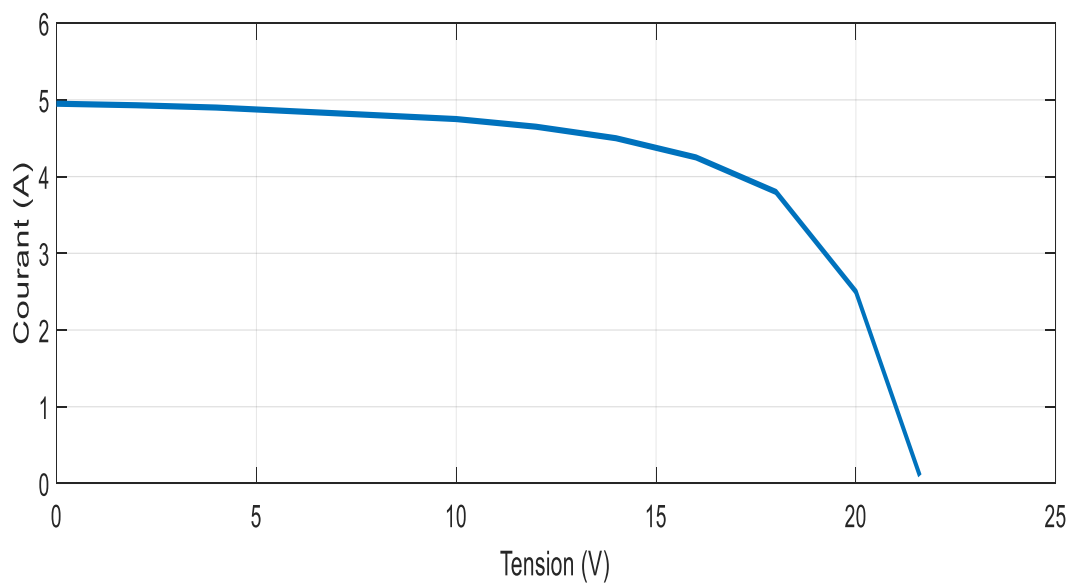
Figure(III-10) :Résulta du courant el la tension

III.6. Les caractéristiques pratique de système PV à vide :

Dans ce travail, nous avons mesuré les caractéristiques de courant et de tension du panneau solaire en le connectant à une résistance variable pour obtenir les résultats, comme indiqué dans le tableau suivant.



Figure(III-.11) : Caractéristique P/V



Figure(III-.12) : Caractéristique I/V

III.6.1. Résultats:

Courbe I/V : Elle montre comment le courant produit par le panneau solaire varie en fonction de la tension. Le courant commence à une valeur élevée lorsque la tension est faible (courant de court circuit) et diminue progressivement avec l'augmentation de la tension jusqu'à atteindre zéro à la tension de circuit ouvert.

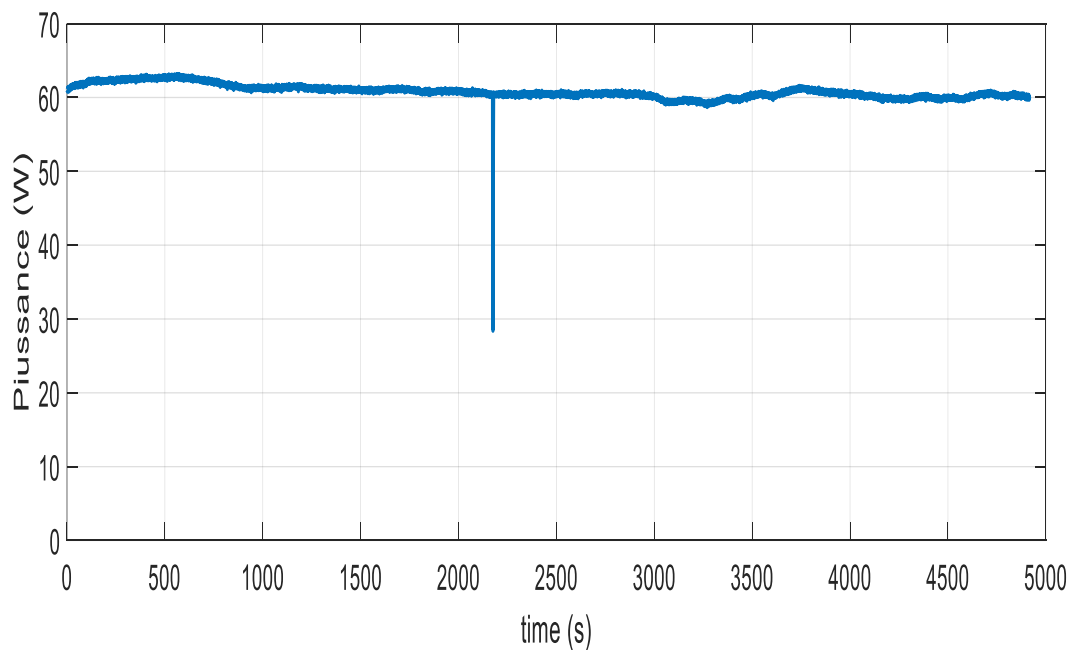
Courbe P/V : Elle montre comment la puissance produite par le panneau solaire varie en fonction de la tension. La puissance atteint une valeur maximale à un certain point (point de puissance maximale) puis diminue avec l'augmentation de la tension.

III.7. Caractéristiques pratique de système PV à charge :

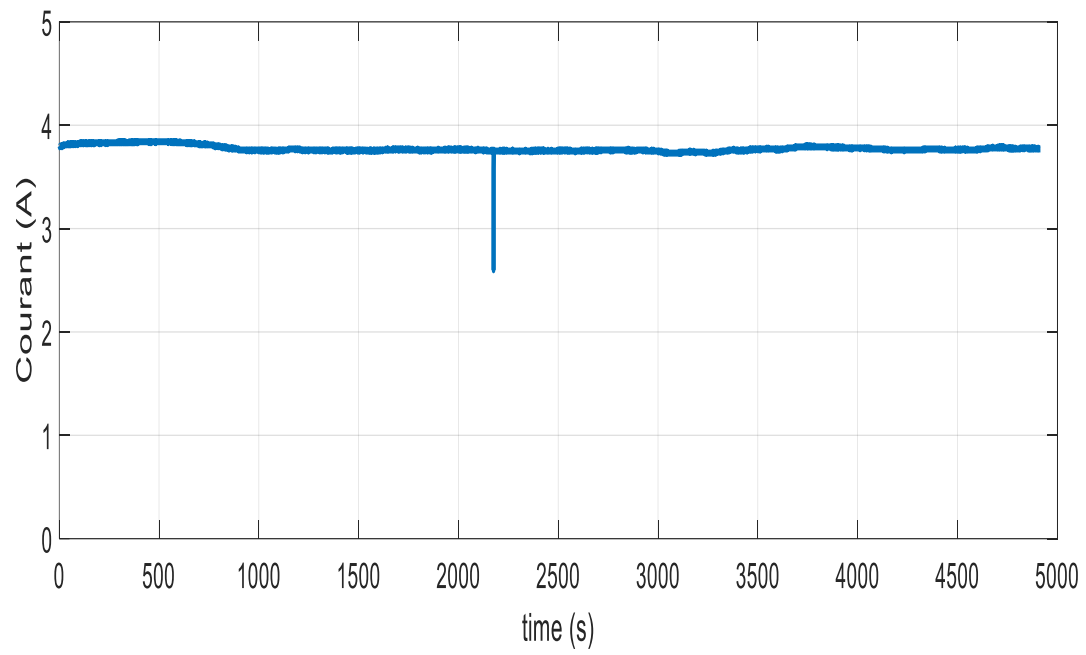
III.7.1. Résultats pratiques sans changement d'éclairement :

Les résultats pratiques de puissance courant, tension et rapport cyclique α du système photovoltaïque réalisé sont donnée sur les figures (III-12) à (III-13) à (III-14) à (III-15) pour une charge résistive de 50Ω et avec éclairement fixe, en appliquant l'algorithme P&O. Ces résultats montrent que le système PV fonction.

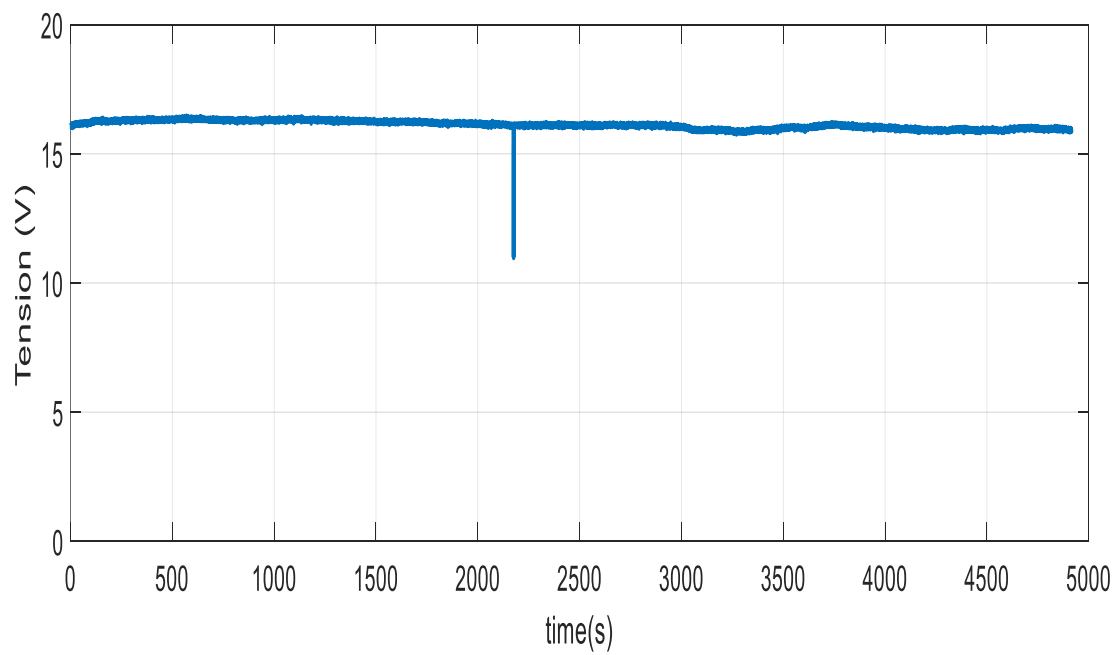
Ces résultats montre la rapidité du suivi de point de puissance maximale et l'oscillation autour de point de fonctionnement de l'algorithme P&O.



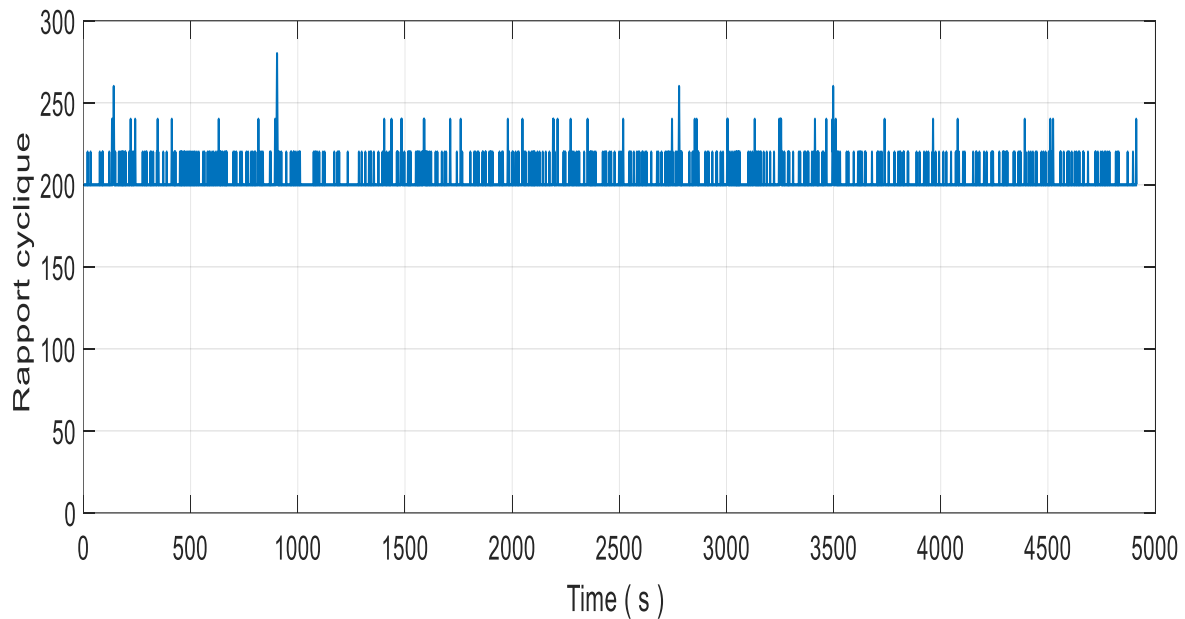
Figure(III-.13): puissance de panneau photovoltaïque



Figure(III-.14): Courant de panneau photovoltaïque



Figure(III-.15): La tension de panneau photovoltaïque



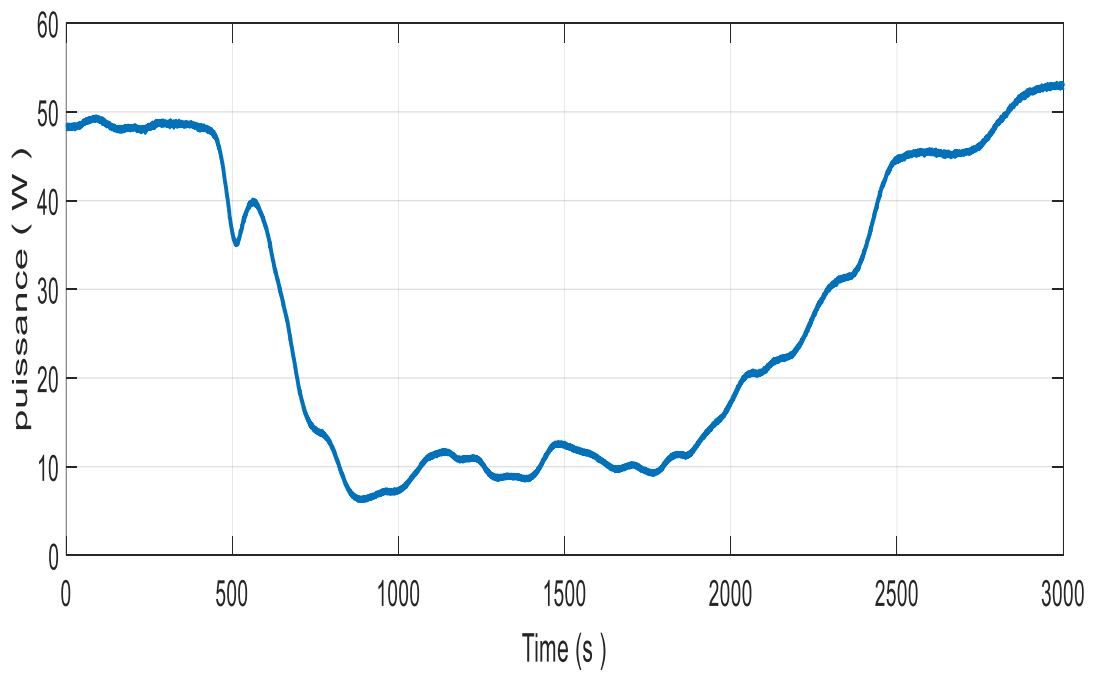
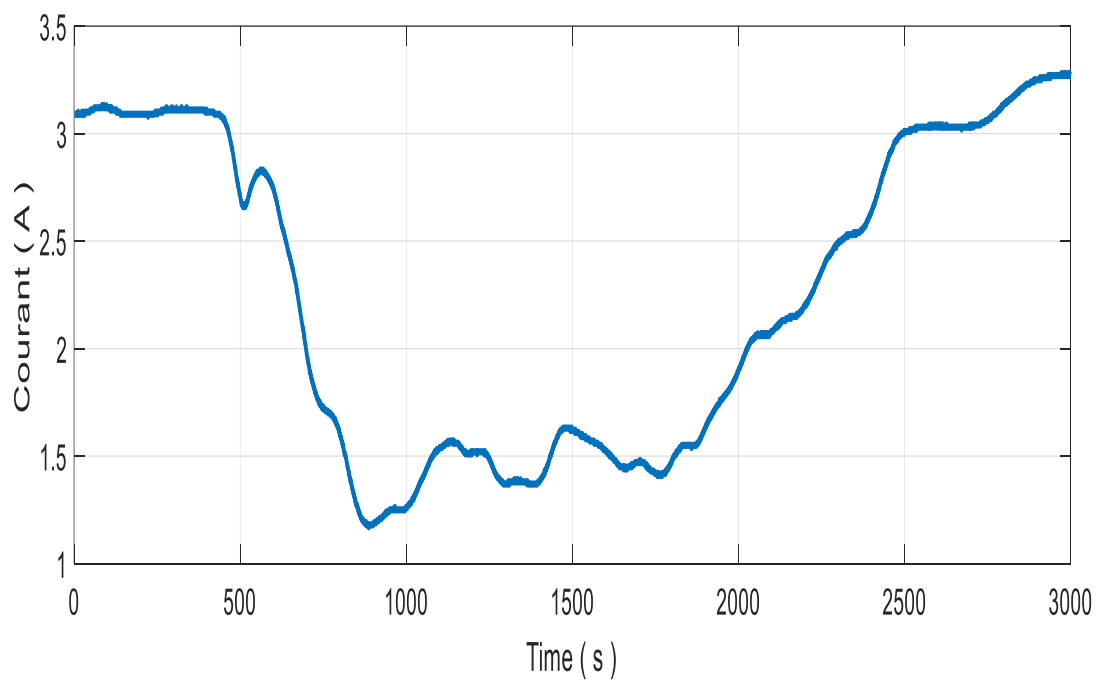
Figure(III-.16): Rapport cyclique de l'hacheur

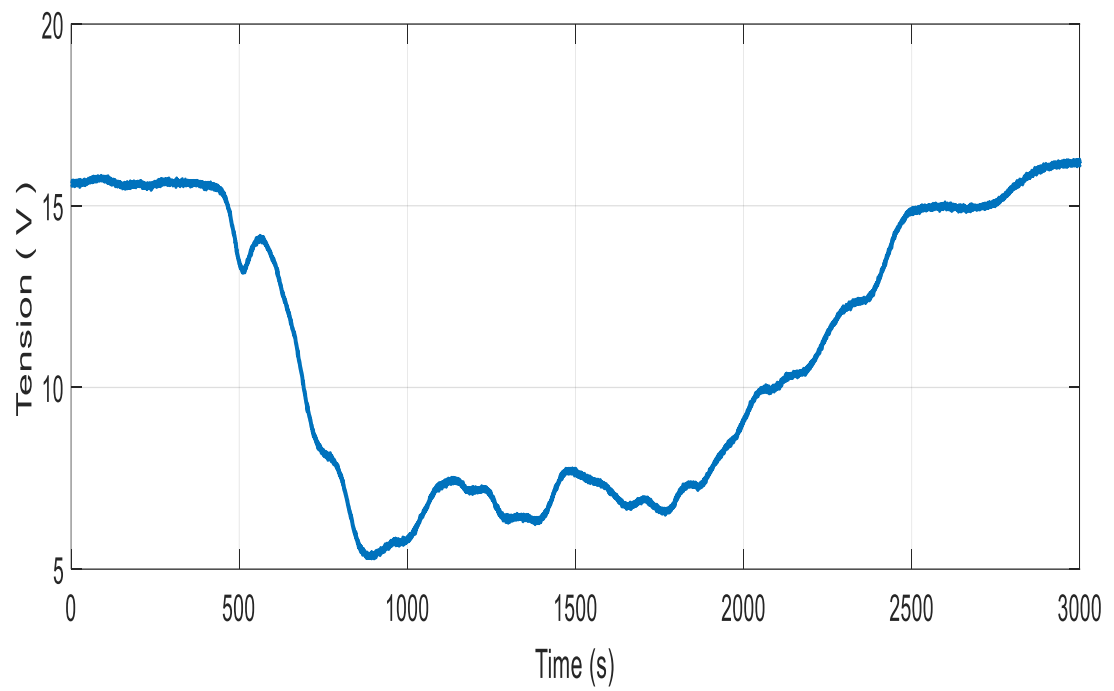
III.7.2. Résultats pratiques avec changement d'éclairement :

Les figures (III-16) à (III-17) à (III-18) à (III-19) Présent la puissance courant, tension et rapport cyclique α du système photovoltaïque réalisé charge résistive de 46Ω et avec éclairement variable en appliquant l'algorithme P&O.

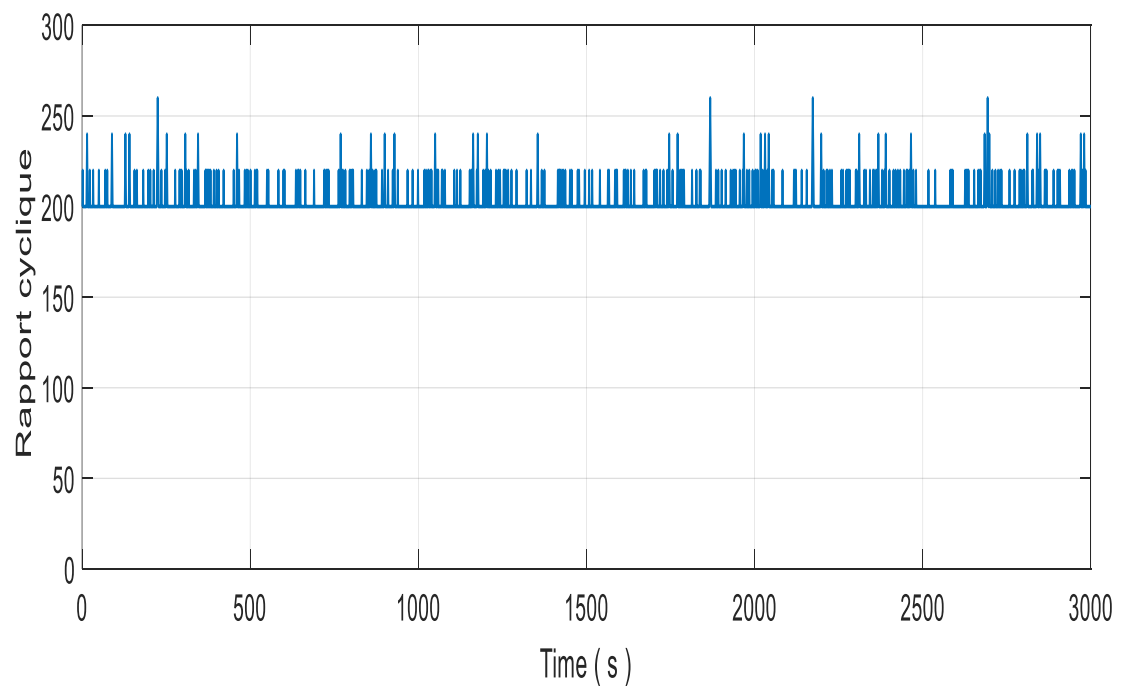
Ces résultats pratiques montrent que l' algorithmes de MPPT (P&O) présentent une bonne capacité de suivre le MPP et d'augmenter les performances du système PV lorsqu'un changement rapide de l'irradiation se produit. La commande par l' algorithmes adapte le générateur PV à la charge par le transfert de la puissance maximale fournie par le GPV.

Dans ce cas de changement de l'intensité d'éclairement, il apparaît que : Pendant le changement d'éclairement (qui dure 0.32 s), le rapport cyclique du convertisseur, diminue puis converge vers une nouvelle valeur qui correspond au point PPM.

**Figure(III-17):** Caractéristique puissance de PV**Figure(III-18):** Caractéristique Courant de PV



Figure(III-.19): Caractéristique La tension de PV



Figure(III-.20): Rapport cyclique de l'hacheur

III.8. Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre la réalisation de l'hacheur boost en utilisant la carte Arduino Méga. Ensuite, nous avons cité les différents composants du système, tel que le module DSP-80M., le capteur de courant et le capteur de tension. Enfin, nous avons fait des tests pratiques sur le système PV par la méthodes de commande MPPT : « P&O ». Les résultats de tests pratiques montrent que le système PV transfère la puissance maximale fournie par le module PV à la charge.

Conclusion générale

Conclusion générale

Afin d'améliorer l'efficacité des systèmes photovoltaïques, différents algorithmes de commande MPPT ont été étudiés pour la poursuite du point de puissance maximale. Dans cet objectif, ce travail contribue à la compréhension et à l'application d'une commande MPPT permettant de traquer la puissance maximale à tout moment et sous différentes conditions atmosphériques.

Le travail présenté dans cette thèse traite de la simulation et de l'implémentation d'un système photovoltaïque fonctionnant avec un convertisseur de type Boost. Ce convertisseur présente l'avantage d'augmenter la tension, ce qui permet à ce système de s'adapter aux changements climatiques et aux variations de la charge. L'objectif principal de cette recherche est la mise en œuvre des techniques de commande pour la recherche du point de puissance maximale (MPPT) en utilisant la technique de contrôle : "Perturbation et Observation" (P&O) qui a été appliquée en pratique et a montré de bons résultats.

Dans cette étude, une modélisation de deux techniques de contrôle : "Perturbation et Observation" (P&O) et la méthode de contrôle par logique floue (FLC) a été présentée via MATLAB/Simulink. Les résultats obtenus montrent que l'utilisation du contrôleur flou est meilleure que celle obtenue avec les algorithmes de contrôle par perturbation et observation.

Ces résultats confirment le bon fonctionnement du contrôleur (P&O) mais montrent un meilleur fonctionnement du contrôleur flou. Ce dernier a prouvé qu'il a de meilleures performances, avec un temps de réponse rapide et une erreur en régime permanent très faible, et qu'il est robuste face aux différentes variations des conditions atmosphériques. Les résultats obtenus permettent également une amélioration considérable de l'efficacité des installations photovoltaïques.

Bibliographie

- [1]BOUZID Kheir eddine « Etude et Réalisation d'un système photovoltaïque à base d'une carte Arduino uno » , Mémoire Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2016
- [2] Brunton, S.L., Rowley, C.W., Kulkarni, S.R., Clarkson, C., 2009. Maximum power point tracking for photovoltaic optimization using extremum seeking, in: 2009 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). Presented at the 2009 34th IEEE Photovoltaic
- [3] F. Chekired, « Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA», mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.
- [4]Brunton, S.L., Rowley, C.W., Kulkarni, S.R., Clarkson, C., 2009. Maximum power point tracking for photovoltaic optimization using extremum seeking, in: 2009 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). Presented at the 2009 34th IEEE Photovoltaic
- [5]F. Belkague, « Etude de la technique d'MPPT d'un système photovoltaïque », mémoire de master, Université Ziane Achour de Djelfa,2017.
- [6] Meliani, S.M., 2016. Cours-Master1
- [7] Y. F. Qin و A. M. Knight, "Comparative study of maximum power point tracking algorithms," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 22, no. 2, pp. 439-449, June 2007.
- [8] <https://www.gotronic.fr/art-carte-arduino-mega-2560-12421.htm>
- [9]- Anne Labouret, Michel Villos : « Energie solaire photovoltaïque », Dunod 3ème édition 2006.
- [10] Mannan, A. (2019). Printed Circuit Board Design: A Review of Manufacturing Processes. *Journal of Electronic Design Technology*, 10(1), 25-36.
- [11] Bouzid, Abdelaziz, et al. "A comprehensive review on maximum power point tracking techniques for photovoltaic power systems." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 64 (2016): 779-797
- [12]N. Chandrasekaran ,K .Thyagarajah,« Modeling and matlab simulation of pumping system using motor powered by solar system» *European Journal of Scientific Research*,6-13,2011

- [13] Messaoudi Mohammed Tahar « Simulation d'un système photovoltaïque autonome régulé par logique floue ». Mémoire Master , Université Kasdi Merbah Ouargla. 2015.
- [14] O. Guenounou et H. Lehouche, « Etude et simulation des techniques MPPT d'un système photovoltaïque », Université A. MIRA-BEJAIA, 2019.
- [15] Y. Lasmi, "Optimisation de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) d'un système photovoltaïque par les techniques intelligentes." 2018.
- [16] Aste, N., Del Pero, C., & Leonforte, F. (2017). Active refrigeration technologies for food preservation in humanitarian context—A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 22, 150-160.
- [17] Laughton, C. (2010). *Solar domestic water heating: The earthscan expert handbook for planning, design and installation*. Routledge.
- [18] <https://lesolairepourtous.fr/branchement-serie-ou-parallele/>
- [19] AOUCHICHE NEDJMA ; « Conception d'une commande MPPT optimale à base d'intelligence artificielle d'un système photovoltaïque » ; thèse de doctorat ; université de Bourgogne Franche-Comté ; 2020.
- [20] Thomas Mambrini « Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies » ; thèse de doctorat ; Université PARIS-SUD ; 2014..
- [21] Ram, J. P., Babu, T. S., & Rajasekar, N. (2017). A comprehensive review on solar PV maximum power point tracking techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 826-847
- [22] Elgharbaoui, E., Essadki, A., & Nasser, T. (2014, November). MPPT commands for a photovoltaic generator using the Incremental Conductance Method and the fuzzy logic command. In *2014 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM)* (pp. 1-6). IEEE
- [23] Smith, J., & Johnson, A. (2020). Solar Photovoltaic Systems: Overview and Principles. *Renewable Energy Journal*, 25(3), 45-60.
- [24] Mohamed Redha Rezoug, Rachid Chenni and Djamel Taibi « Fuzzy Logic-Based Perturb and Observe Algorithm with Variable Steps of a Reference Voltage for Solar Permanent Magnet

Synchronouns Motor Drive System Fed by Direct-Connected Photovoltaic Arry » *Renew. Energies*, 2018, 11, 02–15

[25] J. Ferrieux, f. Forest, « alimentations à découpage convertisseurs à résonance : principes composants modélisation ». Paris, france: dunod, 1999

[26] Subudhi, B., & Pradhan, R. (2012). A comparative study on maximum power point tracking techniques for photovoltaic power systems. *IEEE transactions on Sustainable Energy*, 4(1), 89-98.

[27] Havared breysnes Vika « modelling of photovoltaique modulees with battry energy storage in simulink/matlab ».June2014.

[28] Manganiello, P., Balato, M., & Vitelli, M. (2015). A survey on mismatching and aging of PV modules: The closed loop. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(11), 7276-7286.

[29] RUPESH Patel Roll « Design and Implementation of an Isolated Solar photovoltaic power generation system » Memoire Master, Department of Electrical Engineering National Institute of Technology, Rourkela, June 2014.

[30] Arias, M., Vázquez, A., & Sebastián, J. (2012). An overview of the AC-DC and DC-DC converters for LED lighting applications. *automatika*, 53(2), 156-172.

Annexe:

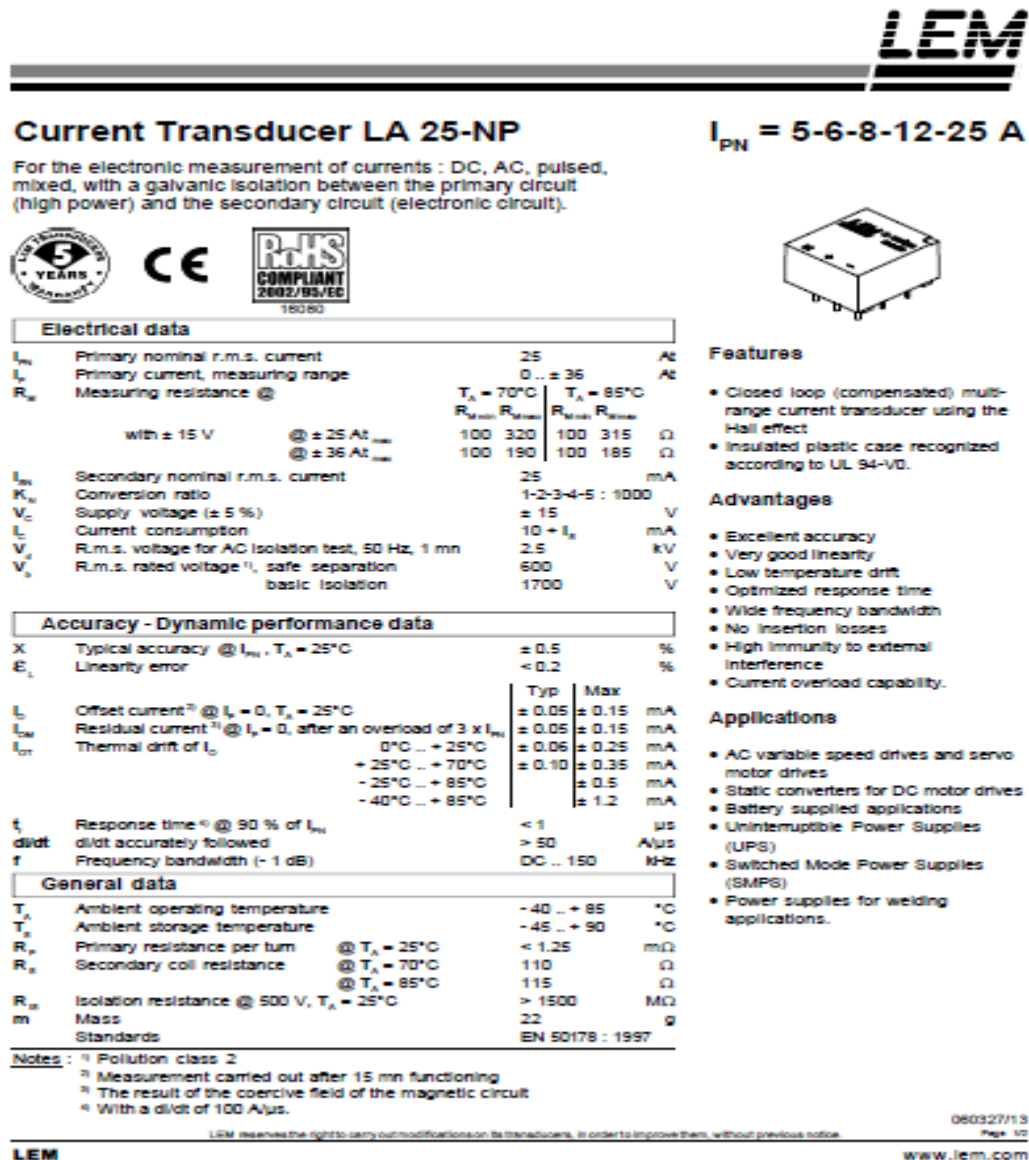


Figure: Datasheet courant transducer

Voltage Transducer LV 25-P

For the electronic measurement of voltages : DC, AC, pulsed....
with a galvanic isolation between the primary circuit (high voltage)
and the secondary circuit (electronic circuit).



$$I_{PN} = 10 \text{ mA}$$

$$V_{PN} = 10 \dots 500 \text{ V}$$



Electrical data

I_{PN}	Primary nominal r.m.s. current	10	mA
I_P	Primary current, measuring range	0 ... ± 14	mA
R_M	Measuring resistance	R_{Mmin} R_{Mmax}	
	with $\pm 12 \text{ V}$	@ $\pm 10 \text{ mA}_{max}$	30 190 Ω
		@ $\pm 14 \text{ mA}_{max}$	30 100 Ω
	with $\pm 15 \text{ V}$	@ $\pm 10 \text{ mA}_{max}$	100 350 Ω
		@ $\pm 14 \text{ mA}_{max}$	100 190 Ω
I_{PS}	Secondary nominal r.m.s. current	25	mA
K_N	Conversion ratio	2500 : 1000	
V_C	Supply voltage ($\pm 5\%$)	$\pm 12 \dots 15$	V
I_C	Current consumption	10 (@ $\pm 15 \text{ V}$) + I_P	mA
V_A	R.m.s. voltage for AC isolation test ¹⁾ , 50 Hz, 1 min	2.5	kV

Accuracy - Dynamic performance data

X_a	Overall Accuracy @ I_{PN} , $T_A = 25^\circ\text{C}$	@ $\pm 12 \dots 15 \text{ V}$	± 0.9	%
		@ $\pm 15 \text{ V}$ ($\pm 5\%$)	± 0.8	%
E_L	Linearity		< 0.2	%
I_0	Offset current @ $I_P = 0$, $T_A = 25^\circ\text{C}$		Typ Max	
I_{0T}	Thermal drift of I_0	$0^\circ\text{C} \dots +25^\circ\text{C}$	± 0.06 ± 0.25	mA
		$+25^\circ\text{C} \dots +70^\circ\text{C}$	± 0.10 ± 0.35	mA
t_r	Response time ²⁾ @ 90 % of V_{max}		40	μs

General data

T_A	Ambient operating temperature	0 ... +70	$^\circ\text{C}$
T_S	Ambient storage temperature	-25 ... +85	$^\circ\text{C}$
R_P	Primary coil resistance @ $T_A = 70^\circ\text{C}$	250	Ω
R_S	Secondary coil resistance @ $T_A = 70^\circ\text{C}$	110	Ω
m	Mass	22	g
	Standards ³⁾	EN 50178	

Notes : ¹⁾ Between primary and secondary

²⁾ $R_L = 25 \text{ k}\Omega$ (L/R constant, produced by the resistance and inductance of the primary circuit)

³⁾ A list of corresponding tests is available

Features

- Closed loop (compensated) voltage transducer using the Hall effect
- Insulated plastic case recognized according to UL 94-V0.

Principle of use

- For voltage measurements, a current proportional to the measured voltage must be passed through an external resistor R_L , which is selected by the user and installed in series with the primary circuit of the transducer.

Advantages

- Excellent accuracy
- Very good linearity
- Low thermal drift
- Low response time
- High bandwidth
- High immunity to external interference
- Low disturbance in common mode.

Applications

- AC variable speed drives and servo motor drives
- Static converters for DC motor drives
- Battery supplied applications
- Uninterruptible Power Supplies (UPS)
- Power supplies for welding applications.

981125/14

LEM Components

Tope Co., Ltd. Tel: (02) 8228-0868 Fax: (02) 8228-0868 <http://www.sencor.com.tw> e-mail: tope@ms1.hinet.net

www.lem.com

Figure: Datasheet tension transducer