

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



Université Echahid Hamma Lakhdar-El Oued
Faculté des Sciences et de Technologies

Faculté de la technologie

Département de Génie Electrique

Mémoire de Fin D'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Spécialité : Réseaux Electrique

Réalisé par : KHECHIBA ABDELDJALIL, HAOUAMED SAAD

Thème

**Implémentation Et Simulation
D'un Contrôleur MPPT Dans
Les Systèmes Photovoltaïques**

DEVANT LE JURY COMPOSE DE :

Dr. TOUILE Sleiman	Université Echahid Hamma Lakhdar	Président
Dr. SHARIF Hakima	Université Echahid Hamma Lakhdar	Examineur
Dr. MAAMIR Madiha	Université Echahid Hamma Lakhdar	Encadreur

Année universitaire:

2023 – 2024

شكر وتقدير

الحمد لله الذي أنار لنا درب العلم والمعرفة وأعاننا على أداء هذا الواجب ووفقنا الى

انجاز هذا العمل

نتوجه بجزيل الشكر والامتنان الى كل من ساعدنا من قريب أو من بعيد على انجاز هذا

العمل وتذليل ما واجهنا من صعوبات، ونخص بالذكر الأستاذة المشرفة

معامير مديحة التي لم تبخل علينا بتوجيهاتها ونصائحها القيمة التي كانت عوننا لنا في

اتمام هذا البحث.

ولا يفوتنا أن نشكر الأستاذة حكيمة جزاها الله عنا كل خير

اهداء

الى من لا يمكن للكلمات أن توفيهما حقهما. الى من لا يمكن للأرقام أن تحصي فضلهما

الى والدي العزيزين أدامهما الله لي

الى اخوتي وأخواتي

الى الأصدقاء وكل من دعمنا معنويا او ماديا

الى كل طلبة ثانية ماستر شبكات كهربائية دفعة 2024/2023

الى كل من سقط من قلبي سهوا

أهدي هذا العمل

الملخص

تتميز الألواح الشمسية الكهروضوئية بعدة خصائص والتي تختلف من نوع لآخر، حيث تمثل نقطة الطاقة الأعظمية أهمها خلال فترة الاشتغال، والتي تتأثر بالتغيرات المناخية على غرار الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة، ولحل هذه المشكلة نقوم بتنصيب جهاز لتتبع نقطة الطاقة القصوى والتحكم لضمان أن لوحنا الكهروضوئي ينتج طاقته القصوى حيث يتم التحكم في هذا التتبع من خلال خوارزميات التحكم.

تم تطوير العديد من الخوارزميات مثل خوارزمية المنطق الضبابي، وخوارزمية سرب الجسيمات PSO، خوارزمية الاضطراب والمراقبة P&O .

هذا العمل نعرض فيه خوارزمية التحكم "تتبع نقطة الطاقة القصوى" باستعمال بطاقة الاردوينو حيث نقوم ببرمجة ومحاكاة وتطبيق العملية باستخدام المبرمجيات الخاصة ولتحقيق هذا الهدف استخدمنا خوارزمية التحكم المشهورة وهي خوارزمية الاضطراب والمراقبة P&O.

Résumé

Les panneaux solaires photovoltaïques ont plusieurs caractéristiques qui varient d'un type à l'autre, où le point d'énergie maximal est le plus important pendant la période de fonctionnement, qui est affecté par les changements climatiques tels que le rayonnement solaire et temperature.to pour résoudre ce problème, nous installons un appareil pour suivre le point d'énergie maximal et contrôlons pour nous assurer que notre panneau photovoltaïque produit son énergie maximale, car ce suivi est contrôlé par des algorithmes de contrôle.

De nombreux algorithmes ont été développés tels que l'algorithme de logique floue, l'algorithme d'essaim de particules PSO, l'algorithme de perturbation et d'observation P&O.

Dans ce travail, nous présentons l'algorithme de contrôle "suivi du point de puissance maximum" à l'aide d'une carte Arduino, où nous programmons, simulons et appliquons le processus à l'aide de programmeurs spéciaux. Pour atteindre cet objectif, nous avons utilisé le célèbre algorithme de contrôle, l'algorithme de perturbation et de contrôle P&O.

Abstract:

Photovoltaic solar panels have several characteristics that vary from one type to another, where the maximum energy point is the most important during the operating period, which is affected by climate changes such as solar radiation and temperature.to to solve this problem, we install a device to track the maximum energy point and control to ensure that our photovoltaic panel produces its maximum energy, because this tracking is controlled by control algorithms.

Many algorithms have been developed such as the fuzzy logic algorithm, the PSO particle swarm algorithm, the P&O perturbation and observation algorithm.

In this work, we present the control algorithm "tracking the maximum power point" using an Arduino board, where we program, simulate and apply the process using special programmers. To achieve this goal, we used the famous control algorithm, the P&O disturbance and control algorithm.

Liste des abréviations

DC : direct coururent.

FF : facteur de forme.

GPV : Générateur photovoltaïque.

MPPT : Maximum Power Point tracking.

PPM : Le point de puissance maximum.

PV : Photovoltaïque.

P&O : Méthode de Perturbation et observation.

I-V : courant-tension.

P-V : puissance-tension.

ICC : Courant de court-circuit.

VCO : Tension à circuit ouvert.

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

I_L: Courant traversant l'inductance L dans le convertisseur DC/DC [A].

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

N_s: Nombre de modules dans le panneau en série.

R_s: Résistance série représentant les diverses résistances des contacts et de connexions[Ω].

Sign: Fonction signe.

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

DC/AC : Conversion continu/alternatif.

DC/DC : Conversion continu/continu.

R: Charge résistive [Ω].

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

E : Eclairement (W/m²).

G : Température de jonction (°K).

Listes Des Figures

Figure I.1 : Composante du rayonnement global sur un plan horizontal.....	6
Figure I.2 : la puissance par unité de surface [3].....	7
Figure I.3 : les différentes valeurs de l'éclairement solaire annuel.....	7
Figure I.4 : Fonctionnement de la cellule photovoltaïque.....	10
Figure. I.5 : Plaque de silicium monocristallin.....	10
Figure. I.6 : Plaque de silicium poly-cristalline.....	11
Figure. I.7 : Plaque de silicium amorphe.....	11
Figure I.8 : Caractéristique courant tension de ns cellule en série.....	12
Figure I.9 : Caractéristique courant tension de np cellule en parallèle.....	13
Figure I.10 : assemblage en série-parallèle des cellules.....	13
Figure I.11 : Puissance maximale idéale et pratique.....	14
Figure I.12 : composent panneau photovoltaïque.....	15
Figure I.13 : montage hybride série/parallèle.....	15
Figure I.14 : Les convertisseurs DC-DC (Les hacheurs).....	16
Figure I.15 : Tensions V_e et V_s dans le convertisseur DC/DC.....	16
Figure I.16 : Schéma électronique de convertisseur abaisseur « Buck ».....	17
Figure I.17 : Convertisseur Buck durant l'état On.....	17
Figure I.18 : Convertisseur Buck durant l'état Off.....	18
Figure I.19 : schéma du convertisseur boost.....	18
Figure I.20 : Schéma équivalent de la phase 1.....	19
Figure I.21 : Circuit équivalent pour Phase 2.....	19
Figure I.22 : schéma du convertisseur buck-boost.....	19
Figure I.23 : Circuit équivalent pour Phase 1.....	20
Figure I.24 : Circuit équivalent pour Phase 2.....	20
Figure I.25 : systeme photovoltaïque avec et sans onduleur.....	22
Figure II.1 : Chaîne de conversion d'énergie solaire.....	25
Figure II.2 : compensant du panneau photovoltaïque.....	25
Figure II.3 : boîte de jonction.....	26
Figure II.4 : Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.....	26
Figure II.5 : Simulation d'un panneau photovoltaïque.....	30
La figure II.6 : représente la caractéristique I-V d'un module photovoltaïque.....	30
La figure II.7 : représente la caractéristique P-V d'un module photovoltaïque.....	31

Figure II .8 : Caractéristique I(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).....	31
Figure II .9 : Caractéristique P(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).....	32
Figure II .10 : Caractéristique I(V) pour différentes températures (G=1000W/m2).....	32
Figure II .11 : Caractéristique P(V) pour différentes températures (G=1000W/m2).....	32
Figure II.12 : Le convertisseur BOOST.....	33
Figure II.13: Schéma d'un hacheur parallèle (boost) raccordé au GPV.....	33
Figure II.14: Formes typiques des ondes du convertisseur boost.....	34
Figure II.15: L'état de l'interrupteur k est fermé.....	35
Figure II.16: L'état de l'interrupteur k est ouvert.....	36
Figure II.17: Schéma block de hacheur Boost.....	37
Figure II.18: Résultat de V_e et V_s de hacheur Boost.....	37
Figure II.19: cas a et b de perturbation.....	38
Figure II.20: cas c de perturbation.....	38
Figure II.21: Caractéristiques de fonctionnement de la méthode de P&O.....	40
Figure II-22 : Organigramme de l'algorithme MPPT de la perturbation & observation.....	41
Figure II.23: Programme et schéma block de la technique PO.....	42
Figure II.24: Schéma block de système photovoltaïque pour un éclairement fixe.....	42
Figure II.25: Courbe d'éclairement fixe.....	43
Figure II.26: Graphe du courant d'éclairement fixe.....	43
Figure II.27: Graphe du Tension d'éclairement fixe.....	44
Figure II.28: Graphe de puissance d'éclairement fixe.....	44
Figure II.29: Schéma block de système photovoltaïque pour un éclairement variable.....	44
Figure II.30: Courbe d'éclairement variable.....	45
Figure II.31: Graphe de courant d'éclairement variable.....	45
Figure II.32: Graphe de Tension d'éclairement variable.....	45
Figure II.33: Graphe de puissance d'éclairement variable.....	46
Figure II.34: PSO Algorithme.....	47
Figure II.35: Schéma block de système photovoltaïque pour un éclairement fixe.....	47
Figure II.36: Courbe d'éclairement fixe.....	48
Figure II.37: Graphe du courant d'éclairement fixe.....	48
Figure II.38: Graphe du Tension d'éclairement fixe.....	48
Figure II.39: Graphe de puissance d'éclairement fixe.....	49
Figure II.40: Schéma block de système photovoltaïque pour un éclairement variable.....	49
Figure II.41: Courbe d'éclairement variable.....	49

Figure II.42: Graphe de courant d'éclairage variable.....	50
Figure II.43: Graphe de Tension d'éclairage variable.....	50
Figure II.44: Graphe de puissance d'éclairage variable.....	50
Figure II.45: Graphe de puissance de deux méthode P&O et PSO d'éclairage variable....	51
Figure II.46: Graphe de puissance de deux méthode P&O et PSO d'éclairage fixe <small>(400W/m²)</small>	51
Figure III-1 : plaque signalétique de Panneau PV 50W.....	54
Figure III-2 : Panneau PV 50W.....	55
Figure III-3 : Capteur de tension LV-28-P.....	55
Figure III-4 Schéma de circuit Capteur de tension LV-28-P.....	56
Figure III-5 : Capteur de tension LA-25-NP.....	56
Figure III-6 : Schéma de circuit Capteur de tension LA-25-NP.....	56
Figure III-7: Amplificateur opérationnel TL 081.....	57
Figure III-8 : schéma de l'hacheur boost.....	57
Figure III-9 : Les autres éléments.....	58
Figure III-10 : La carte Arduino.....	58
Figure III-11 : Composant la carte Arduino.....	59
Figure III-12 : Circuit de filtrage sur porteuse.....	61
Figure III-13 : circuit de filtrage sur laboratoire.....	62
Figure III-14 : circuit de filtrage Pendant la phase d'acidification.....	62
Figure III-15 : circuit de filtrage Pendant la phase de perçage.....	63
Figure III-16 : circuit de filtrage Pendant la phase de Soudure.....	63
Figure III-17 : Le résultat de filtrage.....	63
Figure III-18 : circuit de système PV complet.....	64
Figure III-19 : Rapport cyclique de l'hacheur.....	65
Figure III-20 : Courant de panneau photovoltaïque.....	65
Figure III-21 : Voltage de panneau photovoltaïque.....	65
Figure III-22 : puissance de panneau photovoltaïque.....	66
Figure III-23 : Rapport cyclique de l'hacheur.....	66
Figure III-24 : Courant de panneau photovoltaïque.....	66
Figure III-25 : Voltage de panneau photovoltaïque.....	67
Figure III-26 : puissance de panneau photovoltaïque.....	67

Liste des tableaux

Tableau I-1 : le taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie.....21

Tableau II.1 : Caractéristique électrique de la cellule PV dans les conditions standards<CST>
T=25°C, G=1000W /m².....29

SOMMAIRE

شكر وتقدير

اهداء

Résumé

Liste des abréviations

Listes Des Figures

Liste des tableaux

INTRODUCTION GENERALE.....2

CHAPITRE I: GENERALITE SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUE

I.1.Introduction.....	5
I.2. Rayonnement solaire dans l'espace.....	5
I.3. Les types de rayonnement solaire.....	6
• Le rayonnement direct.....	6
• Le rayonnement diffus.....	6
• Le rayonnement solaire réfléchi.....	6
• Le rayonnement global.....	6
I.4. Le spectre solaire.....	7
I.5. L'énergie solaire.....	7
I.6. Les différents types de l'énergie solaire.....	8
• L'énergie passive.....	8
• L'énergie solaire thermique.....	8
• L'énergie thermodynamique.....	8
• L'énergie photovoltaïque.....	8
I.7. Energie solaire photovoltaïque.....	9
I.7.1. L'effet photovoltaïque.....	9
I.7.2. La cellule photovoltaïque.....	9
I.7.3. Fonctionnement de la cellule photovoltaïque.....	9
I.7.4. Matériaux utilisés dans les cellules PV.....	10
I.7.4.1. Silicium monocristallin.....	10
I.7.4.2. le silicium polycristallin (multicristallin).....	10
I.7.4.3 le silicium amorpha.....	11
I.8. Les modules photovoltaïques.....	12
I.8.1. Assemblage des cellules photovoltaïques.....	12
I.9. Paramètres des cellules photovoltaïques.....	13
I.9.1. Courant de court-circuit I_{sc}	13
I.9.2.Tension à circuit ouvert V_{oc}	13
I.9.3 Puissance maximale d'une cellule PV.....	14
I.9.4. Rendement énergétique.....	14
I.9.5. Facteur de forme ff	14

I.10. Système photovoltaïque.....	15
I.10.1. Panneau photovoltaïque.....	15
I.10.2. Les convertisseurs DC-DC (Les hacheurs).....	16
I.10.2.1 Convertisseurs DC-DC pour les systèmes d'énergie solaire.....	16
I.10.2.2. Les type des convertisseurs DC-DC.....	17
❖ Convertisseur BUCK.....	17
❖ Convertisseur BOOST.....	18
❖ Convertisseur BUCK-BOOST	19
I.10.3 Avantages et inconvénients d'énergie photovoltaïque.....	20
I.10.3.1. Les avantages.....	20
I.10.3.2. Les inconvénients.....	21
I.11. L'énergie solaire photovoltaïque en Algérie.....	21
I.12. L'installation de systeme photovoltaïque avec et sans onduleur.....	22
I.13. Conclusion.....	23

CHAPITRE II: MODELISATION D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

II.1 Introduction.....	25
II.2. Le module photovoltaïque.....	25
II.3. Modélisation du système photovoltaïque.....	26
II.3.1 Modélisation d'une cellule photovoltaïque.....	26
a- La résistance série.....	26
b- La résistance shunt.....	26
II.3.2. Les différentes équations des cellules PV	28
a. Le photo-courant I_{ph}	28
b. Le courant de saturation I_0	28
c. Le courant de saturation inverse de la diode (courant de fuite) I_{rs}	28
d. Le courant de résistance shunt.....	29
e. Le courant du panneau.....	29
II.4. Caractéristiques d'un module du Panneau photovoltaïque.....	29
II.5. Simulation d'un panneau photovoltaïque sous Matlab-Simulink.....	30
II.6. Effets Climatiques sur la cellule PV.....	31
II.6.1. Influence de L'éclairement sur la cellule.....	31
II.6.2. Influence de la température sur la cellule.....	32
II.7. Modèle de le hacheur Survolteur (ou Boost).....	33
II.7.1. Modélisation du circuit.....	35
II.7.2. Représentation d'état.....	35
II.8. Simulation d'un hacheur Boost sous Matlab-Simulink.....	37
II.8.1. Résultat de Simulation.....	37
II.9. Commandes MPPT.....	37
II.9.1. Principe de la Recherche du PPM.....	38
II.9.2. Techniques de commande de l'MPPT.....	39
II.9.3. Différentes techniques d'MPPT.....	39
II.9.3.1. Méthode Perturbation & Observation (P&O).....	39

a- Définition.....	39
b- b. Le fonctionnement de l’algorithme P&O.....	39
II.10. Simulation d'un système photovoltaïque sous Matlab-Simulink méthode P&O	42
II.10.1. Simulation pour un éclairage fixe.....	42
II.10.2. Résultat de simulation.....	43
II.10.3. Simulation pour un éclairage variable.....	44
II.10.4. Résultat de simulation.....	44
II.11. Méthode Particle Swarm Optimisation (PSO).....	46
II.12. Simulation d'un système photovoltaïque sous Matlab-Simulink méthode PSO.....	47
II.12.1. Simulation pour un éclairage fixe.....	47
II.12.2. Simulation pour un éclairage variable.....	49
II.13. Comparaison Inter Deux Méthode P&O Et PSO.....	51
II .14. Conclusion.....	52

CHAPITRE III : Implémentation de la commande MPPT sur Arduino

III.1.Introduction.....	54
III.2. Les composantes utilisées.....	54
III.2.1. Panneau PV 50W.....	54
III.2.2. Capteur de Tension.....	55
III.2.3. Capteur de courant.....	56
III.2.4. L’amplificateur TL081	56
III.5.4. Le convertisseur DC-DC BOOST.....	57
III.6. Les autres éléments réalisés sur circuit.....	58
III.2. La carte Arduino.....	58
III.3. Composant la carte Arduino.....	59
III.4. Implémentation de la commande MPPT sur une carte Arduino.....	59
III.4.1. La Commande P&O Sur Arduino UNO.....	60
III.4.2. Pourquoi Arduino UNO.....	60
III.7. Réalisation du circuit électronique.....	60
III.7.1 Réalisation un circuit de filtrage sur porteuse.....	61
III.7.2. Imprimer un circuit de filtrage sur laboratoire.....	62
III.7.3. Étape d'acidification.....	62
III.7.4. Étape de perçage.....	63
III.7.5. Soudure des composants électroniques.....	63
III.7.6. Le résultat de filtrage.....	63
III.7.7. Montage du système complet.....	63
III.8. Résultats pratique le système complet et l’MPPT méthode P&O.....	64
III.8.1 Résultats pratiques sans changement d’éclairage.....	64
III.8.2. Résultats Pratiques Avec Changement D’éclairage.....	66
III.8. Conclusion.....	67
Conclusion Générale.....	68
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE.....	69
ANNEXE.....	72

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La plus grande partie de l'énergie consommée actuellement provient de l'utilisation des combustibles fossiles comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou encore l'énergie nucléaire. Ces ressources deviennent de plus en plus rares, pendant que les demandes énergétiques du monde s'élèvent continuellement. Il est estimé que les réserves mondiales seront épuisées vers 2030 si la consommation n'est pas radicalement modifiée, et au maximum vers 2100 si des efforts sont produits sur la production et la consommation [43].

Etant donné que cette forme d'énergie couvre une grosse partie de la production énergétique actuelle, il s'avère nécessaire de trouver une autre solution pour prendre le relais, la contrainte imposée est d'utiliser une source d'énergie économique et peu polluante car la protection de l'environnement est devenue un point important.

Aujourd'hui, les énergies renouvelables deviennent progressivement des énergies à part entière, rivalisant avec des énergies fossiles, du point de vue coût et performances de production. Cependant, leur système de conversion de l'énergie en électricité souffre souvent d'un manque d'optimisation qui en fait encore des systèmes trop chers, et présentant des déficiences importantes en rendement et en fiabilité. Pour cela, bien qu'il existe, de plus en plus de travaux de recherches prouvant la fiabilité de sources comme, par exemple, l'énergie photovoltaïque (PV) ou l'énergie éolienne.

De nouvelles énergies dites « énergies renouvelables », ont été développées tel que : l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse, l'énergie géothermique et l'énergie solaire. La plupart de ces énergies proviennent directement ou indirectement du soleil.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par l'ensemble de cellules dites photovoltaïques (PV), basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque, qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière (une énergie suffisante).

Pour augmenter le rendement en puissance d'un module PV ou d'un champ de modules PV, un contrôleur électronique est incorporé entre le générateur PV et la charge, dont le rôle principal est de maximiser la puissance délivrée par le panneau photovoltaïques en poursuivant continuellement le point de puissance maximale, cette technique est appelée communément MPPT (Maximum Power Point Tracking).

La commande MPPT est une commande essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque. Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le panneau PV.

Cette mémoire comporte trois chapitres :

Dans le premier chapitre nous présenterons une généralité sur les systèmes photovoltaïques. En présentant le générateur photovoltaïque et le principe de la conversion photovoltaïque, et nous avons étudié les performances de trois types de convertisseurs : élévateur (Boost), abaisseur (Buck) et élévateur-abaisseur (Buck-Boost).

Dans la deuxième chapitre sera effectuée une étude sur l'énergie solaire photovoltaïque. Nous présenterons la description et la modélisation de la cellule photovoltaïque, les courbes des caractéristiques courant et puissance en fonction de la tension sous l'effet de l'éclairement et de la température, leurs équations caractéristiques, les différents modes de groupement des cellules photovoltaïques et on a la modélisation des convertisseurs DC-DC (hacheurs) et on simule le convertisseur (DC-DC) survolteur (Boost), Et dans cette étude, nous simulerons le système PV en utilisant Matlab / Simulink avec MPPT par les méthodes P&O et PSO.

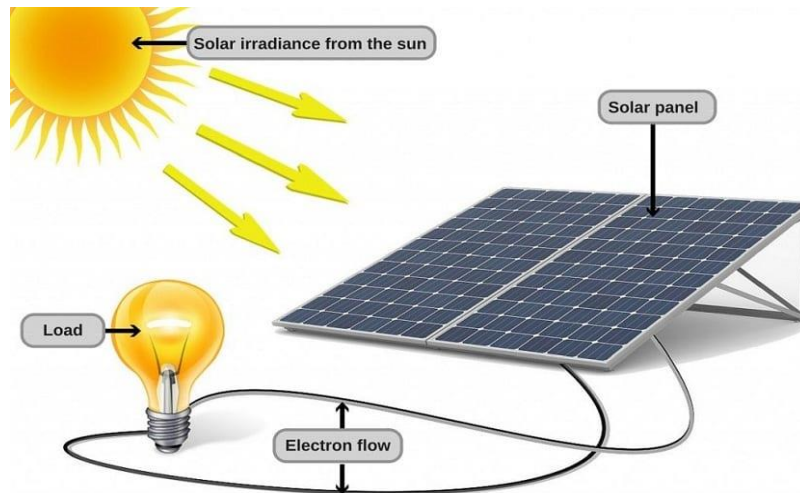
Dans le dernier chapitre on a présenté une étude pratique pour suivre le point de la puissance maximal, et on à réaliser un programme de méthode P&O pour un système photovoltaïque à l'aide d'une carte Arduino.

Enfin, nous terminons cette étude par une conclusion générale qui résume les travaux réalisés

CHAPITRE I
GENERALITE SUR LES
SYSTEMES
PHOTOVOLTAÏQUE

I.1. Introduction

L'énergie solaire est la source d'énergie la plus prometteuse et la plus abondante parmi les énergies renouvelables ; son potentiel énorme représente plusieurs fois la consommation énergétique mondiale. L'énergie lumineuse reçue dépend du climat du site considéré, elle est aussi fonction de la disposition du module. Le développement, l'optimisation et la conception des systèmes photovoltaïques impliquent une certaine connaissance de la source d'énergie utilisée. Le soleil. Il est souhaitable de connaître le rayonnement solaire par ses différents aspects. On détermine, d'abord, l'énergie totale que le soleil envoie à la limite de l'atmosphère terrestre. Il faut, ensuite, connaître la répartition spectrale en fonction de la longueur d'onde, car les cellules photovoltaïques, disponibles actuellement, sont sélectives. Enfin, on doit tenir compte de l'absorption atmosphérique. L'ensemble de ces points, ainsi que l'optimisation de l'orientation et de l'inclinaison des générateurs photovoltaïques, sont succinctement traités dans ce chapitre. Dans les formules développées plus bas tous les angles sont donnés en degrés [1].



I.2. Rayonnement Solaire Dans L'espace :

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus depuis que Lavoisier et Laplace, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance.

Il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène-hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium; la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius.

Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement [2].

- Sa lumière, à une vitesse de 300000 km/s.
- Met environ 8 minutes pour parvenir à la terre.
- Distance moyenne soleil-terre est de 150 millions Kilomètres.

- Sa distribution spectrale de l'atmosphère présente un maximum pour une longueur d'onde d'environ 0.5 m.
- La température de corps noir à la surface du soleil est d'environ 5780°k [3].
- Diamètre de soleil $D=1,39.10^9$ m.
- Diamètre de la terre $D=1,27. 10^7$ m .

I.3. Les Types De Rayonnement Solaire :

- **Le Rayonnement Direct** : est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs. Il peut être mesuré par un pyrhéliomètre [1].
- **Le Rayonnement Diffus** : est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). La diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. Dans le ciel, ce sont à la fois les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuages) et les poussières qui produisent cet (éclatement) des rayons du soleil. Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques [1].
- **Le Rayonnement Solaire Réfléchi** : ou l'albédo du sol est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige) [1].
- **Le Rayonnement Global** : est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyranomètre ou un solarimètre sans écran.

Les stations météorologiques généralement mesurer le rayonnement global horizontal par un pyranomètre placé horizontalement à l'endroit requis [1].

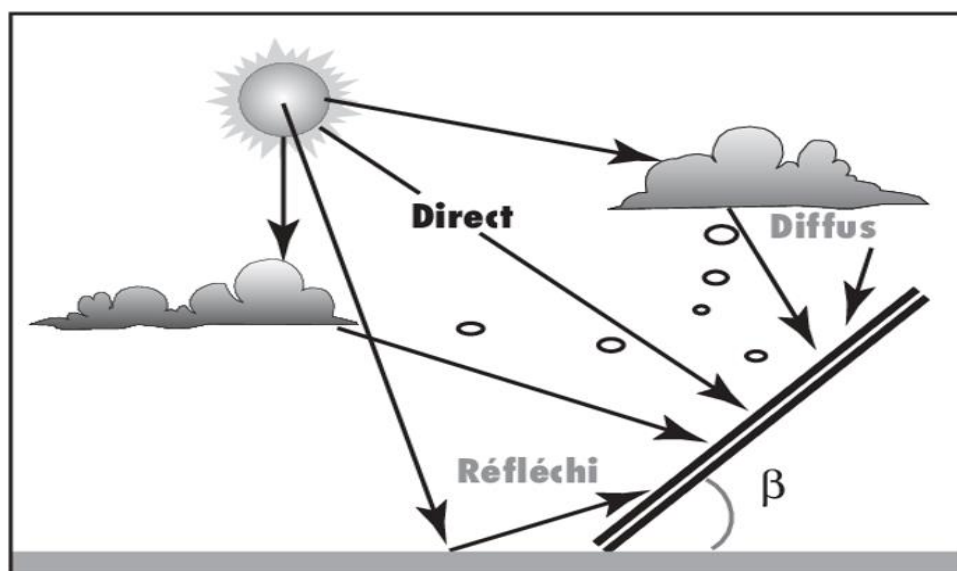


Figure (I.1) : Composante du rayonnement global sur un plan horizontal

I.4. Le Spectre Solaire :

Le soleil émet une énergie sous forme de rayonnements électromagnétiques dont l'ensemble forme le rayonnement solaire ; mesuré en (W/m²) et présente la puissance par unité de surface.

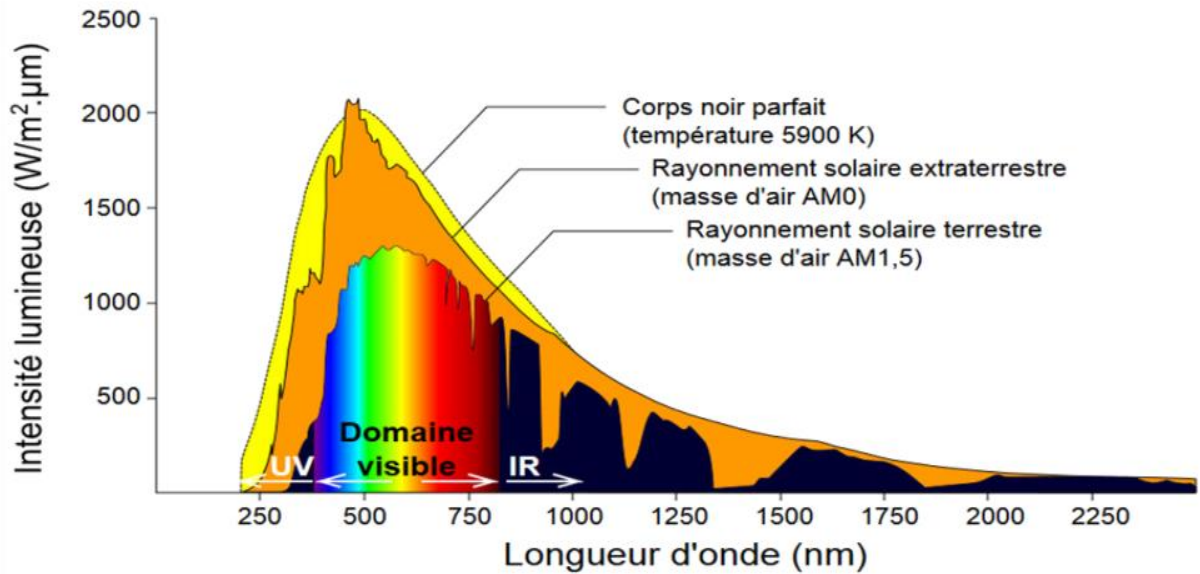


Figure (I.2) : la puissance par unité de surface [3].

I.5. L'énergie Solaire :

La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au soleil. La valeur de l'éclairement est communément prise égale à 1360W/m². Au niveau du sol, la densité d'énergie solaire est réduite à 1000 W/m² à cause de l'absorption dans l'atmosphère.

La figure I.2 montre les différentes valeurs de l'éclairement dans le monde.

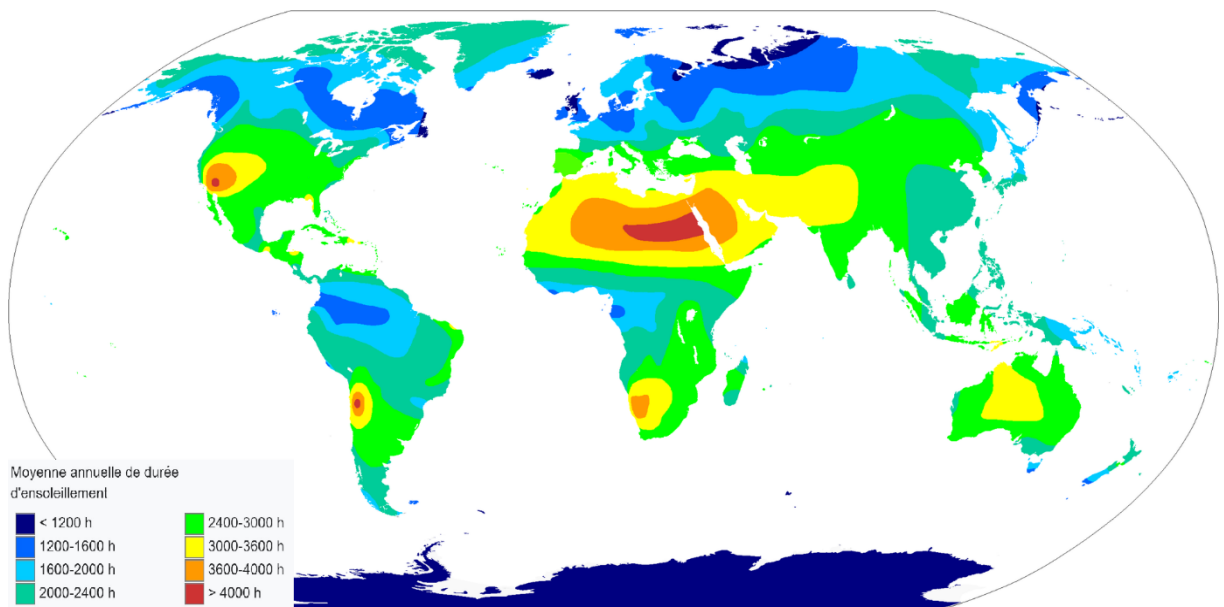


Figure I.3 : les différentes valeurs de l'éclairement solaire annuel

Albert Einstein à découvert en travaillant sur l'effet photoélectrique que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie est portée par des particules, les photons. L'énergie d'un photon étant donnée par la relation :

$$E = \frac{h.c}{\lambda} = h. \nu \quad (I.1)$$

h : la constante de Planck [$j. s^{-1}$].

c : la vitesse de la lumière [$m. s^{-1}$].

λ : la longueur d'onde [m].

ν : la fréquence [s^{-1}].

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande [4]. Une façon commode d'exprimer cette énergie est :

$$E = \frac{1.25}{\lambda} \quad (I.2)$$

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique figure I.2 compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10 microns (μm) [5].

L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

- 9 % dans la bande des ultraviolets ($<0,4\mu m$).
- 47 % dans la bande visible ($0,4$ à $0,8 \mu m$).
- 44 % dans la bande des infrarouges ($>0,8\mu m$) [6].

I.6. Les Différents Types De L'énergie Solaire :

Le soleil est la source d'énergie la plus puissante et cette énergie est gratuite, il n'y a qu'à l'exploiter Sur Terre, il existe différents types d'énergies solaires [5-6] :

- **L'énergie Passive** : Ce type d'énergie va être utilisé pour le chauffage, l'éclairage naturel et la climatisation des locaux. Il consiste à laisser entrer le rayonnement solaire naturellement dans une construction par l'intermédiaire de surface vitrées et/ou par la mise en œuvre de façade du type double-peau ou encore mur trombe. Prévu dès la conception architecturale, le solaire passif n'engendre que de faibles surcoûts.
- **L'énergie Solaire Thermique** : Cette énergie est la transformation des rayons du soleil en énergie thermique (chaleur). Cette énergie peut être utilisée directement soit pour le chauffage ou pour obtenir de l'eau chaude. Le principe général est de concentrer les rayons solaires en un seul endroit. Ceux-ci sont alors piégés par des capteurs solaires thermiques vitrés qui transmettent l'énergie solaire à des absorbeurs métalliques.
- **L'énergie Thermodynamique** : Cette énergie est l'un des modes de valorisation du rayonnement solaire direct. Cette technologie consiste à concentrer le rayonnement solaire à l'aide de collecteurs pour chauffer un fluide à haute température qui va produire de vapeur à haute pression qui est ensuite turbinée.
- **L'énergie Photovoltaïque** : Énergie solaire photovoltaïque Désigne l'énergie récupérée et transformée directement en électricité à partir de la lumière du soleil par des panneaux photovoltaïques. Elle résulte de la conversion directe dans un semi-conducteur d'un photon en électron.

I.7. Energie Solaire Photovoltaïque :

Si l'énergie solaire thermique est obtenue par la chaleur du soleil, l'énergie solaire photovoltaïque l'est par l'énergie même du rayonnement solaire. Autrement dit, les panneaux photovoltaïques, souvent installés sur le toit, recueillent les photons du soleil et les transforment en électricité. Ces panneaux photovoltaïques sont composés d'une superposition de couches de cellules dont l'une est chargée négativement et l'autre positivement. Dès qu'un photon traverse ces couches, il produit une tension électrique. L'énergie solaire photovoltaïque fonctionne comme une pile.

I.7.1. L'effet Photovoltaïque :

Cet effet PV, qui était le principe de production d'électricité à partir du rayonnement solaire, a été observé pour la première fois en 1839 par Alexandre Edmond Becquerel, un scientifique français Edmund Becquerel. L'effet PV est un processus qui, lorsque les rayons du soleil frappent la couche limite des matériaux semi-conducteurs, un courant électrique peut être généré. Depuis lors, de nombreux scientifiques ont tenté de développer des technologies de production d'électricité basées sur cet effet. En 1870, l'effet PV a été étudié dans le sélénium et les résultats ont indiqué que l'efficacité énergétique du sélénium solide n'était que de 1% à 2%, ce qui était bien en deçà de la valeur acceptable pour les convertisseurs d'énergie potentiels.

En 1950, le silicium cristallin de haute pureté a été développé ; en 1954, une cellule photovoltaïque au silicium avec un rendement de conversion de 4 % a été développée dans les Bell Labs ; plus tard, l'efficacité a été encore améliorée à 11%. À cette époque, l'effet PV a créé une nouvelle manière de production d'énergie solaire.

I.7.2. La Cellule Photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique, qui exposé à la lumière (photons), génère une tension. Le courant obtenu est un courant continu (CC), les semiconducteurs qui constituent les cellules photovoltaïques sont à base de silicium (Si), de sulfure de cadmium (CdS) ou de tellure de cadmium (CdTe). Elles se présentent sous la forme de deux fines plaques en contact étroit. Ce semi-conducteur est pris en sandwich entre deux électrodes métalliques et le tout est protégé par une vitre [7].

I.7.3. Fonctionnement De La Cellule Photovoltaïque :

En fait, la photopile est composée de matériaux semi-conducteurs dopés P (manque d'électrons) et N (excès d'électrons) dont la jonction de type P-N permet aux électrons excédentaires de la zone N de traverser la jonction et d'occuper les trous de la zone P. Ainsi, lorsque la lumière frappe la surface (dopée N) d'une cellule photovoltaïque, les photons constituant cette lumière communiquent leur énergie aux atomes du matériau en libérant les électrons des atomes qui génèrent ainsi des charges N (les électrons) et des charges P (les trous). Or le déplacement d'électrons (créé par l'énergie des photons) est synonyme de production d'électricité. Pour une photopile, la production d'électricité est liée à la production d'électrons (et de trous) par les photons de la lumière qui éclaire le dispositif. Plus de photons frappent la cellule, plus la quantité d'électricité produite est importante. Pour un éclairage donné, cette quantité dépend du rendement de conversion de la photopile (énergie produite/énergie reçue) [7].

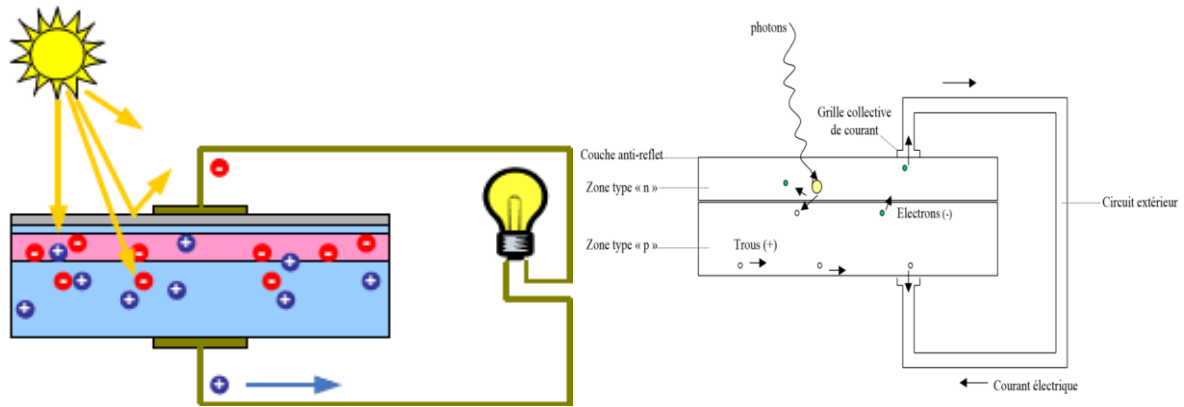


Figure I.4 : Fonctionnement de la cellule photovoltaïque

I.7.4. Matériaux Utilisés Dans Les Cellules PV :

Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques.

I.7.4.1. Silicium Monocristallin :

Les cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal [8]. Il est rare d'obtenir parce qu'il nécessite un haut degré de pureté, ce qui nécessite de nombreuses opérations de désinfection [8]. L'efficacité du silicium monocristallin est la plus élevée, elle est de 12-20% pour les cellules industrielles. Son coût élevé est désormais un frein et la silicone Le monocristallin perd du terrain face au silicium poly cristallin [9]. La figure I-5 montre une plaque de silicium monocristallin.

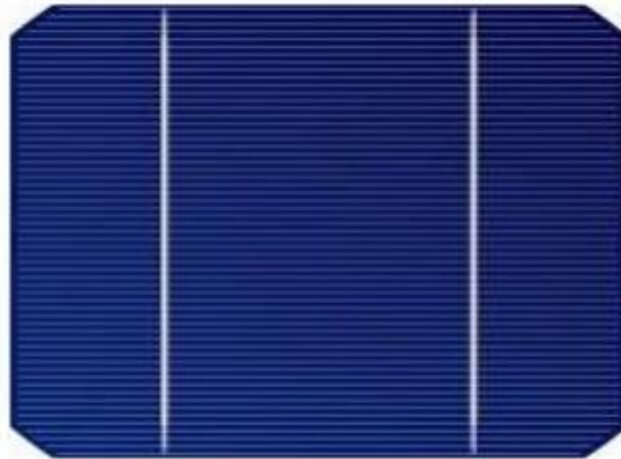


Figure. I.5 : Plaque de silicium monocristallin.

I.7.4.2. Le Silicium Polycristallin (Multicristallin):

Le silicium multi-cristallin (Poly-cristallin) est la technologie la plus utilisée aujourd'hui. Elle représente à elle seule près de 50 % du marché. Les cellules sont obtenues par le procédé de coulage de cristaux de silicium, ce qui rend leur structure hétérogène. Sa quantité est légèrement inférieure à celle du silicium monocristallin, elle est comprise entre 10 et 14% selon les fabricants. Par contre, on peut dire que sa fabrication est beaucoup plus simple, et les

coûts de production sont si faibles [9]. La figure I-6 montre une plaque de silicium poly-cristallin.

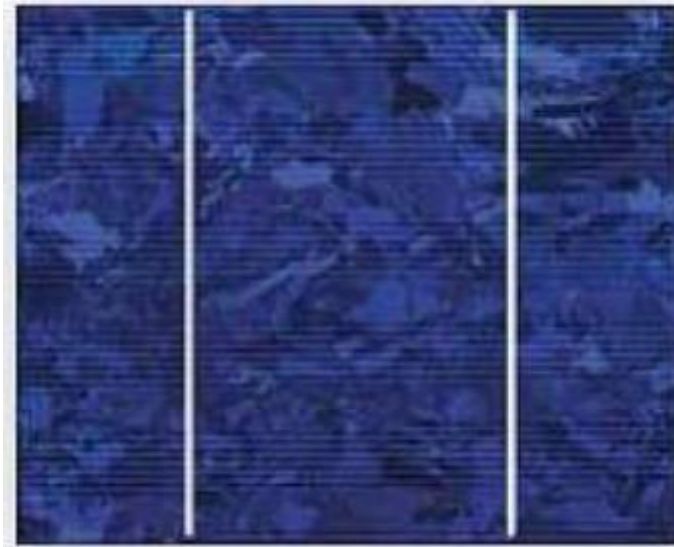


Figure. I.6 : Plaque de silicium poly-cristalline.

I.7.4.3. Le Silicium Amorphe :

Le silicium est déposé en couche mince sur une plaque de verre ou un autre support souple. Il a des atomes irréguliers, c'est pourquoi il a une mauvaise conductivité et se caractérise par un coefficient d'absorption élevé. Il est utilisé là où beaucoup d'énergie électrique n'est pas nécessaire, par exemple, des montres, des calculatrices, etc...[10].

La figure I-7 montre la structure d'une cellule photovoltaïque à base de silicium amorphe.



Figure. I.7 : Plaque de silicium amorphe

Les modules photovoltaïques amorphes ont un coût de production bien plus bas, mais malheureusement leur rendement n'est que 6 à 8% actuellement [11].

I.8. Les Modules Photovoltaïques :

Les modules photovoltaïques sont un groupe de cellules photovoltaïques connectées les unes aux autres, qui sont assemblées en série ou en parallèle afin de générer plus de puissance en fonction des besoins des applications cibles [12].

I.8.1. Assemblage Des Cellules Photovoltaïques :

La cellule photovoltaïque unique produit une puissance très faible (1 à 3 W) avec une tension de moins d'un volt, qui n'est pas suffisante pour répondre aux besoins des équipements électriques, elle est donc assemblée pour donner la puissance souhaitée. Il existe trois types d'assemblage [12].

- **Assemblage En Série :**

L'assemblage en série permet d'augmenter la tension en collectant la tension de chaque cellule, mais le courant reste la même pour une cellule [12].

Avec la relation :

$$V_{CO_{ns}} = n_s \cdot V_{CO} \tag{I.3}$$

$$I_{CC_{ns}} = I_{CC} \tag{I.4}$$

V_{SCO} : Somme des tensions en circuit ouvert en série.

I_{SCC} : Courant de court-circuit des cellules en série.

n_s : Nombre des cellules en série.

La figure I-8 représente la caractéristique courant tension de n_s cellule en série

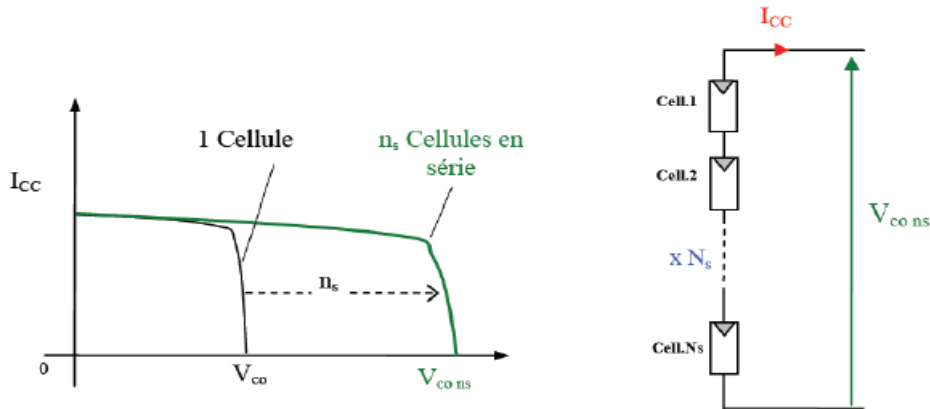


Figure I.8 : Caractéristique courant tension de ns cellule en série.

- **Assemblage En Parallèle :**

L'assemblage en parallèle permet d'augmenter le courant en collectant le courant de chaque cellule, mais la tension reste la même pour une cellule [12].

Avec la relation :

$$I_{CCnp} = np \cdot I_{CC} \tag{I.5}$$

$$V_{CO} = V_{CONP} \tag{I.6}$$

I_{CCnp} : Sommes des courants en court-circuit en parallèle.

V_{comp} : Tension de circuit ouvert des cellules en parallèle.

n_p : Nombre des cellules en parallèle.

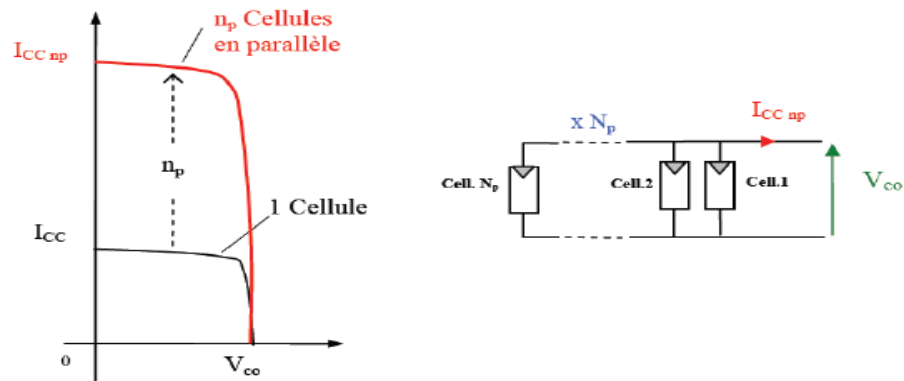


Figure I.9 : Caractéristique courant tension de n_p cellule en parallèle

• **Assemblage En Série-Parallèle :**

Pour augmenter la tension et le courant ensemble, les cellules doivent être assemblées en série-parallèle [13]. La figure représente l'assemblage série-parallèle des cellules.

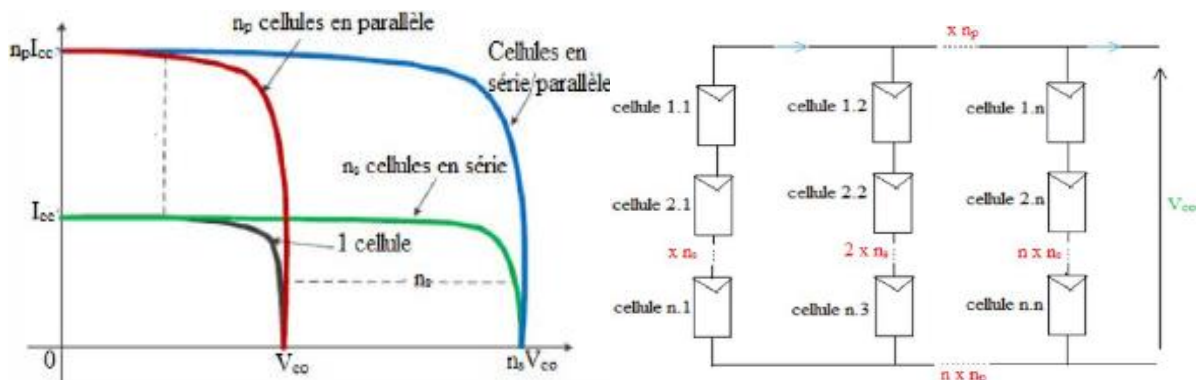


Figure I.10 : assemblage en série-parallèle des cellules.

I.9. Paramètres Des Cellules Photovoltaïques :

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique. Les plus usuels sont les suivantes :

I.9.1. Courant De Court-Circuit I_{sc} :

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nul. Dans le cas idéal (R_s nulle et R_{sh} infinie), ce courant se confond avec le photo-courant.

$$I_{cc} = I_{ph} \tag{I-7}$$

I.9.2. Tension A Circuit Ouvert V_{oc} :

C'est la tension pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).

$$V_{co} = VT \cdot \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_{sat}} + 1 \right) \tag{I-8}$$

1.9.3. Puissance Maximale D'une Cellule PV :

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximale P_{max} correspondrait donc à la tension de circuit ouvert V_{co} multipliée par le courant de court-circuit I_{cc} :

$$P_{max} = V_{co} \cdot I_{cc} \quad (I. 9)$$

Avec :

P_{max} (W) : Puissance fournie par la cellule PV.

V_{co} (V) : Tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule PV.

I_{cc} (A) : L'intensité de court-circuit débitée par la cellule PV.

En pratique, la courbe caractéristique d'une cellule PV est plus "arrondie" Figure I-11, et la tension au point de puissance maximale V_{Pmax} est inférieure à la tension de circuit ouvert V_{co} , de même que le courant fourni I_{Pmax} est inférieur, pour cette même tension, au courant de court-circuit.

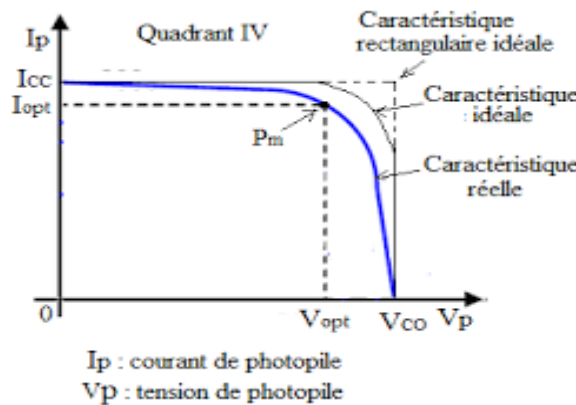


Figure I.11: Puissance maximale idéale et pratique

L'expression de la puissance en ce point est donnée par :

$$P_{max} = V_{pmax} \cdot I_{pmax} \quad (I.10)$$

1.9.4. Rendement Energétique :

C'est le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule P_{max} (I_{opt} , V_{opt}) et la puissance solaire incidente. Il est donné par :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{V_{opt} \cdot I_{opt}}{P_{inc}} \quad (I-11)$$

Avec P_{inc} est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles. Ce paramètre reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

1.9.5. Facteur De Forme ff :

C'est le rapport entre la puissance maximale P_{max} fournie par la cellule ou générateur et la puissance optimale. Il représente la mesure de la qualité de la cellule ou d'un générateur, il est défini par la relation

$$ff = \frac{P_{max}}{I_{cc} \cdot V_{co}} = \frac{V_{opt} \cdot I_{opt}}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad (I-12)$$

Ce paramètre compris entre 0 et 1, on l'exprime en %, généralement le facteur de forme prend des valeurs entre 0.6 et 0.85. [14]

I.10. Système Photovoltaïque :

Depuis 1958, les cellules PV alimentent seulement le système énergétique des satellites. Les premières applications terrestres sont arrivées au début des années 70.

Aujourd'hui, grâce à leur fiabilité, le PV prend une place prépondérante. Il associe plusieurs composants afin de former un système PV.

Les systèmes photovoltaïques les plus couramment utilisés selon les exigences sont de trois types : autonome, raccordé au réseau et hybride [15].

I.10.1. Panneau Photovoltaïque :

Le panneau se compose de plusieurs modules PV interconnectés en série et/ou en parallèle, dans le but d'augmenter la puissance. Pour la même température avec un éclairage homogène, l'association des cellules PV en série c'est de l'augmentation de la tension, ainsi que la tension résultante est la somme de tension de chaque cellule. Contrairement, le courant augmente, à l'association en parallèle.

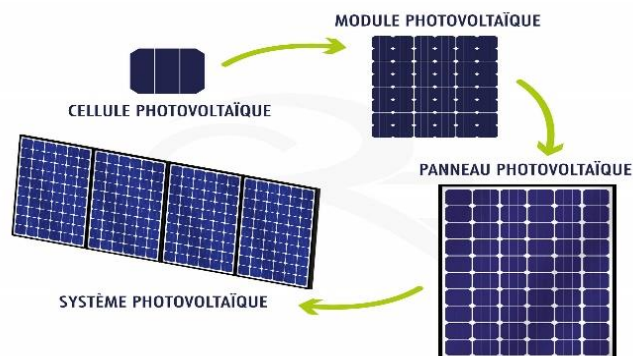


Figure I.12 : composent panneau photovoltaïque

La figure suivante montre une association de 4 branches en parallèle ayant chacune 3 cellules en série :

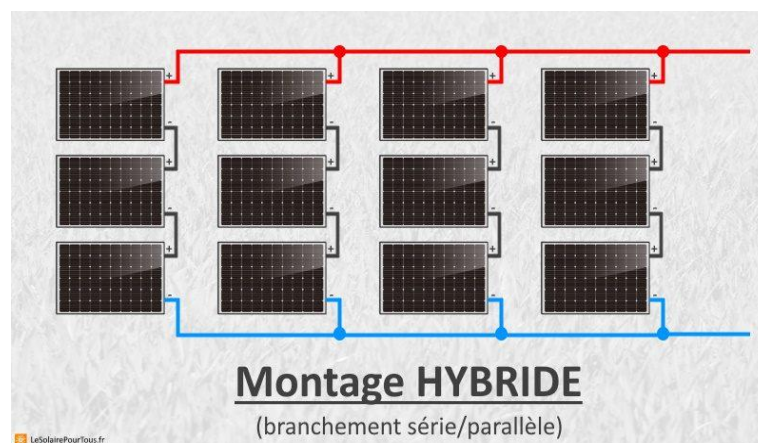


Figure I.13: montage hybride série/parallèle

I.10.2. Les Convertisseurs DC-DC (Les Hacheurs) :

On peut définir les hacheurs comme étant les convertisseurs statiques qui permettent le transfert de l'énergie électrique d'une source continue vers une autre source continue. Autrement dit, un hacheur permet d'obtenir une tension continue de valeur moyenne réglable à partir d'une source de tension continue.

Le cas où l'entrée et la sortie sont de natures dynamiques différentes, on parle d'hacheur à liaison directe, on peut alors les relier directement. Lorsqu'elles sont de même nature dynamique, dans ce cas on parle d'hacheur à accumulation, et il faut faire appel alors à un élément de stockage momentané.

Enfin dans le cas où l'isolation galvanique de la sortie avec l'entrée est une nécessité, on réalise des hacheurs dits isolés.

Suivant le degré de réversibilité que l'on désire, la structure du montage diffère, et suivant la puissance nominale du système, la technologie des composants ne sera pas la même [16].

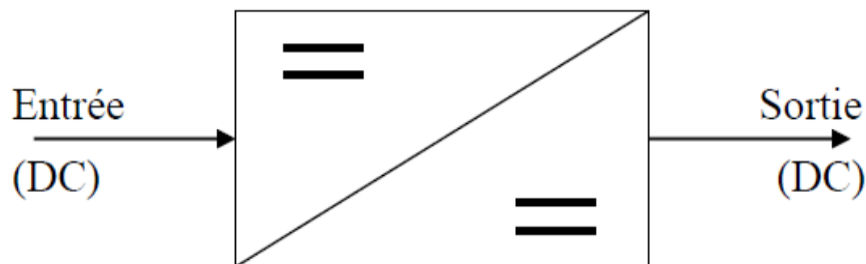


Figure I.14 : Les convertisseurs DC-DC (Les hacheurs)

I.10.2.1. Convertisseurs DC-DC Pour Les Systèmes D'énergie Solaire :

Un hacheur peut être réalisé à l'aide d'interrupteur électronique commandé (un transistor de puissance qui fonctionne en commutation : 0,1) à l'ouverture et à la fermeture tels que les thyristors GTO ou les transistors bipolaires ou à effet de champ à grille isolée fonctionnant en régime de commutation (tout ou rien). Le principe de l'hacheur consiste à établir puis interrompre périodiquement la liaison source- charge à l'aide de l'interrupteur électronique. Celui-ci doit pouvoir être fermé ou ouvert à volonté afin d'avoir une tension de sortie continue réglable. Pour cela les convertisseurs DC-DC (ou hacheurs) sont utilisés dans les systèmes d'énergie solaire pour adapter la source DC variable (panneau PV) à la charge qui demande en général une tension DC constante [17].

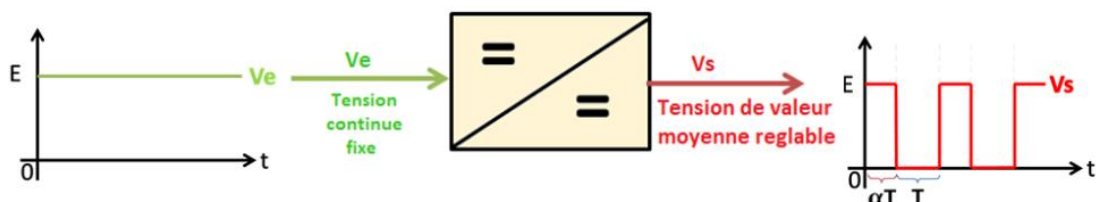


Figure I.15: Tensions V_e et V_s dans le convertisseur DC/DC

I.10.2.2. Les type des convertisseurs DC-DC

Les convertisseurs DC-DC (ou hacheurs) sont utilisés dans les systèmes d'énergie solaire pour adapter la source continue à amplitude variable (panneau PV) à la charge qui demande en général une tension DC constante. Les trois configurations de base sont [18].

- Convertisseur dévolteur ((hacheur série ou Buck).
- Convertisseur survolteur (hacheur parallèle ou Boost).
- Convertisseur dévolteur- survolteur (hacheur série-parallèle ou Buck-Boost).

❖ Convertisseur BUCK :

Le convertisseur dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur Buck ou hacheur série ou encore hacheur abaisseur. C'est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur. Le schéma d'un hacheur abaisseur est indiqué à la figure I-16. Le commutateur K peut être un transistor MOSFET ou un IGBT qui peut se commuter sur deux positions, marche ou arrêt rapidement [19]. La tension de la source V_e doit être plus grande que la tension aux bornes de la charge V_s .

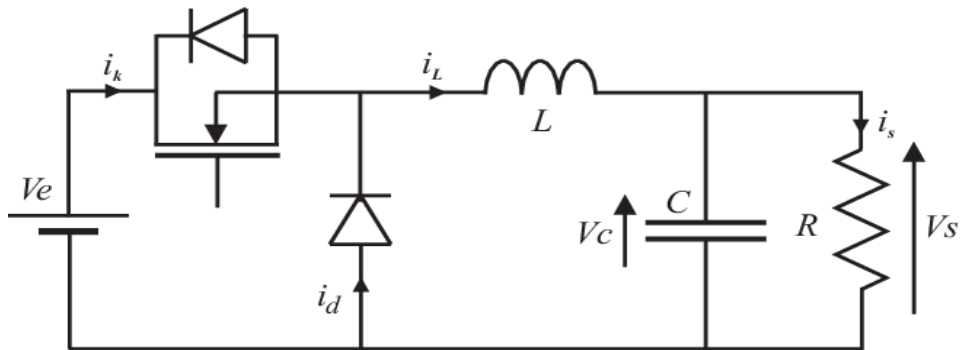


Figure I.16 : Schéma électronique de convertisseur abaisseur « Buck »

Ce convertisseur a deux phases de fonctionnement :

Phase 1, K fermé : Si le commutateur K est activé à l'instant t_0 , le courant traverse le circuit mais ne traverse pas la diode à polarité inversée D. Le courant I_L augmente linéairement avec un taux d'augmentation dicté par l'inductance L plutôt qu'immédiatement.

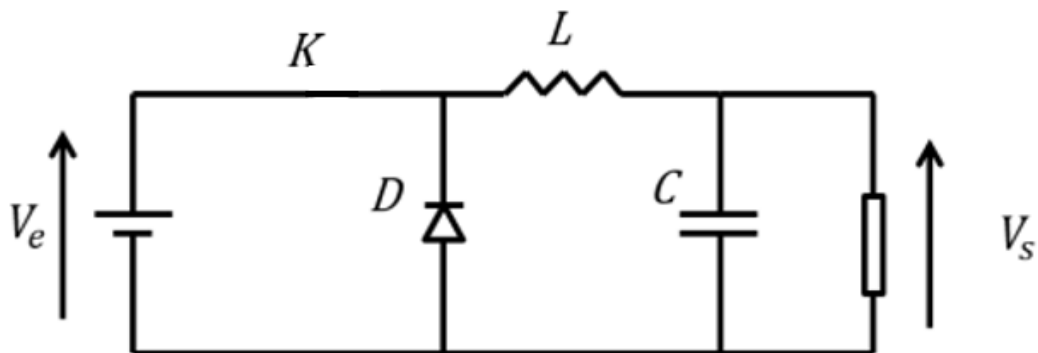


Figure I.17 : Convertisseur Buck durant l'état On

Phase 2, K ouvert : Si Q est désactivé à $t = t_1$, la charge est déconnectée de son alimentation. Le courant est toutefois maintenu par l'énergie stockée dans l'inductance L et circule à travers la diode D appelée diode de roue libre. Cette dernière permet d'évacuer l'énergie emmagasinée dans l'inductance à l'ouverture du commutateur sans créer de surtension [20].

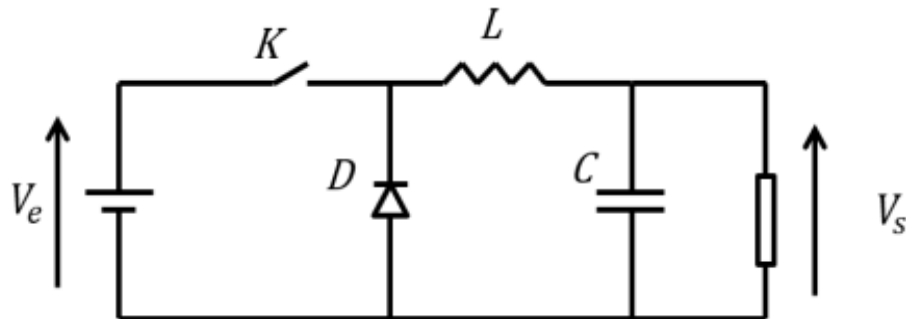


Figure I.18 : Convertisseur Buck durant l'état Off

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

❖ Convertisseur BOOST

Le convertisseur boost est connu par le nom d'élévateur de tension peut être représenté par le circuit de la figure I-19. C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage).

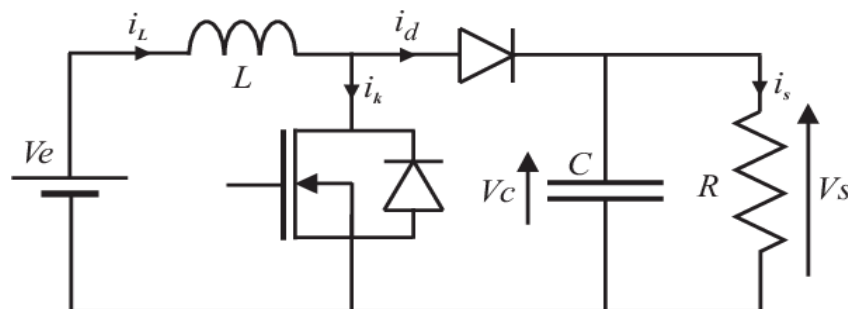


Figure I.19 : schéma du convertisseur boost

Le convertisseur survolteur est le plus populaire des convertisseurs pour les régulateurs de correction du facteur de puissance, il est caractérisé par le fait que de la tension de sortie est supérieure à la tension d'entrée.

Ce convertisseur a deux phases de fonctionnement :

Phase 1, K fermé : (période d'accumulation d'énergie), figure I-20 Lorsque l'interrupteur K est fermé ($K=1$), le courant dans l'inductance augmente, entraînant le stockage d'une certaine quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique. La diode D est ainsi désactivée, et la charge est alors déconnectée de la source d'alimentation.

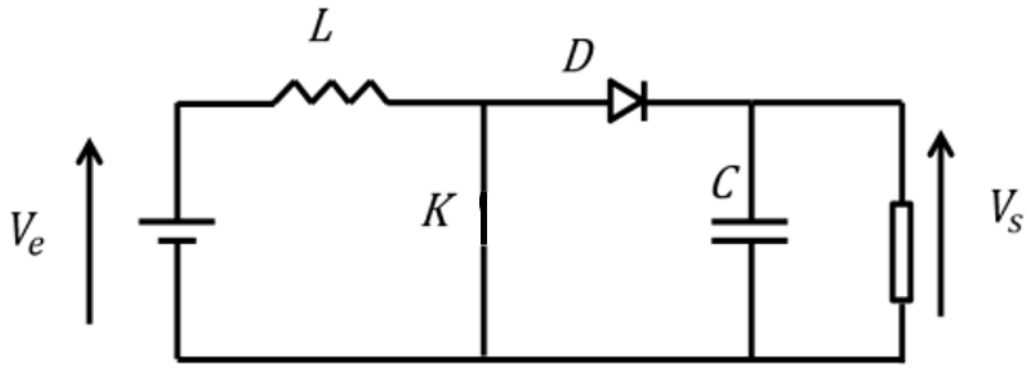


Figure I.20: Schéma équivalent de la phase 1

Phase 2, K ouvert : Lorsque l'interrupteur \$K\$ est activé, l'inductance est en série avec le générateur et sa f.é.m. s'ajoute à celle du générateur (entraînant un effet de surtension). La diode, le condensateur et la charge sont tous passés par le courant après son passage à travers l'inductance. En conséquence, l'énergie qui s'est accumulée dans l'inductance est transférée à la capacité.

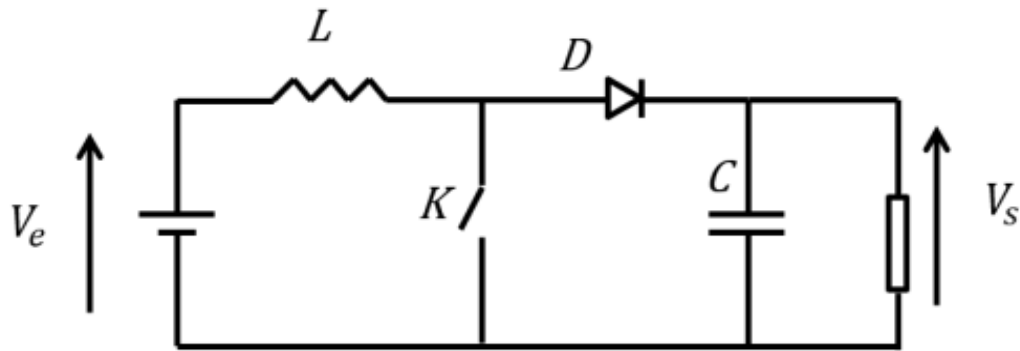


Figure I.21 : Circuit équivalent pour Phase 2

❖ **Convertisseur BUCK-BOOST :**

Le convertisseur buck-boost est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de valeur plus faible ou plus grande, mais de polarité inverse. Le schéma de principe d'un convertisseur buck-boost est représenté par la figure I-22 [22].

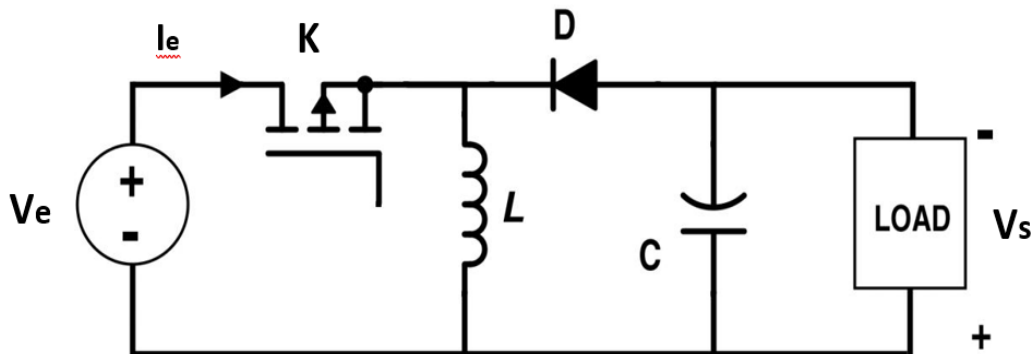


Figure I.22 : schéma du convertisseur buck-boost

Ce convertisseur a deux phases de fonctionnement :

Phase 1 (K fermé) : l'interrupteur K est conducteur pendant le temps αT , l'énergie est stockée dans L et la tension de sortie est négative par rapport au point commun : la diode D est alors bloquée.

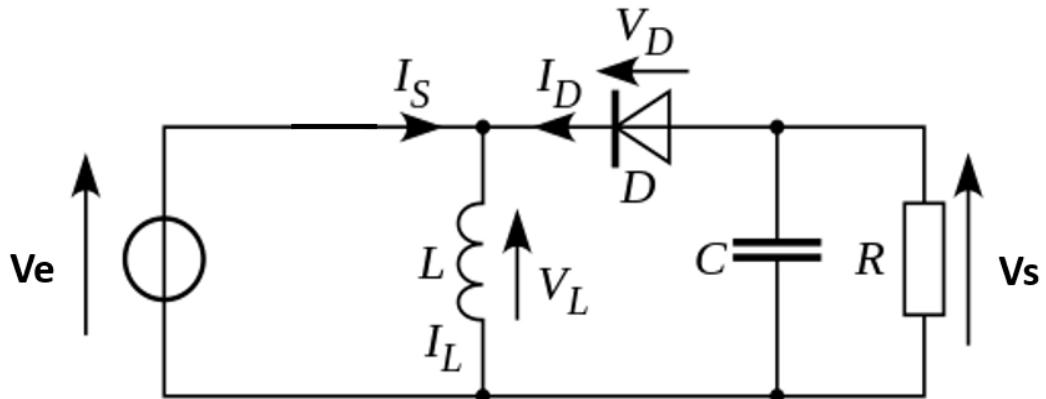


Figure I.23 : Circuit équivalent pour Phase 2

Phase 2 (K ouvert) : le blocage de l'interrupteur K provoque la décharge de l'inductance dans la charge R et le condensateur C. Cette décharge peut être totale ou partielle.

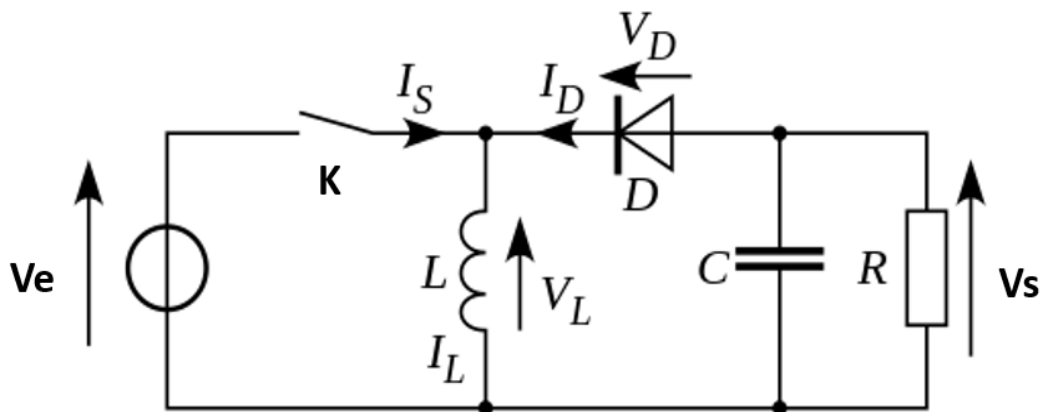


Figure I.24 : Circuit équivalent pour Phase 2

I.10.3. Avantages Et Inconvénients D'énergie Photovoltaïque :

Les systèmes photovoltaïques offrent de nombreux avantages tout en ayant quelques inconvénients. [23-24]:

I.10.3.1. Les Avantages :

- La haute fiabilité.
- Son potentiel illimité. 5% de la surface des déserts suffiraient pour alimenter la planète entière.
- le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu.

- L'utilisation de l'énergie solaire permet d'éviter l'utilisation d'énergies fossiles ou nucléaires pour fabriquer la même quantité d'électricité et donc de diminuer d'autant les émissions de gaz à effet de serre ou la production de déchets nucléaires.

I.10.3.2. Les Inconvénients :

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%).
- Beaucoup d'appareils vendus dans le marché fonctionnent au 220 à 230 V alternatif. Or, l'énergie issue du générateur PV est unidirectionnelle et de faible voltage (<30V), elle doit donc être transformée par l'intermédiaire d'un onduleur.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis.
- La puissance est réduite lorsque les conditions climatiques sont défavorables (nuages)

I.11. L'énergie Solaire Photovoltaïque En Algérie :

La durée d'insolation sur la quasi-totalité territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (haut plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5K Wh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700KWh/m²/an au nord et 2263KWh/m²/an Au sud du pays. Au Sahara, ce potentiel peut constituer un facteur important de développement durable s'il est exploité de manière économique [25].

Le tableau I-1 indique le taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahar a
Superficies	4%	10%	86%
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures=an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m ² /an)	1700	1900	2650

I.12. L'installation De Systeme Photovoltaïque Avec Et Sans Onduleur :

Les systèmes photovoltaïques avec et sans onduleur présentent tous deux des avantages et des inconvénients. Le meilleur type de système pour vous dépend de vos besoins et de votre budget.

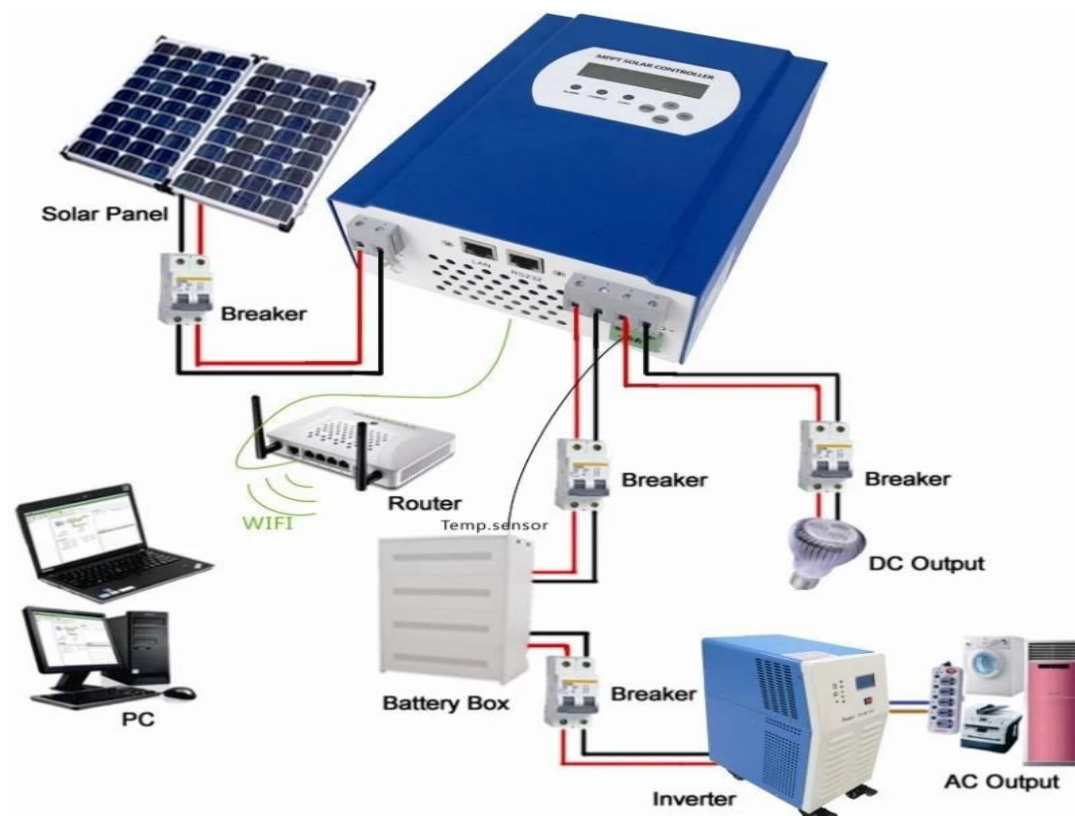


Figure I.25 : systeme photovoltaïque avec et sans onduleur

I.13. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire, l'énergie solaire et l'énergie photovoltaïque. Nous avons ensuite expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales ainsi que leur type avec à la fin un aperçu de cette énergie en Algérie.

CHAPITRE II
MODELISATION D'UN
SYSTEME
PHOTOVOLTAÏQUE

II.1 Introduction :

Un système photovoltaïque se compose de plusieurs éléments interconnectés destinés à réaliser une tâche bien déterminée, qui peut être fournir de l'électricité au réseau public de distribution, pomper de l'eau d'un puits, alimenter une petite calculatrice ou l'une des nombreuses utilisations possibles de l'électricité solaire. Il est généralement constitué d'un module photovoltaïque, d'un régulateur, d'une batterie, d'un récepteur « courant continu » et d'un onduleur si il existe un récepteur « courant alternatif ». La figure suivante décrit le système qui nous sera utilisé dans notre travail.

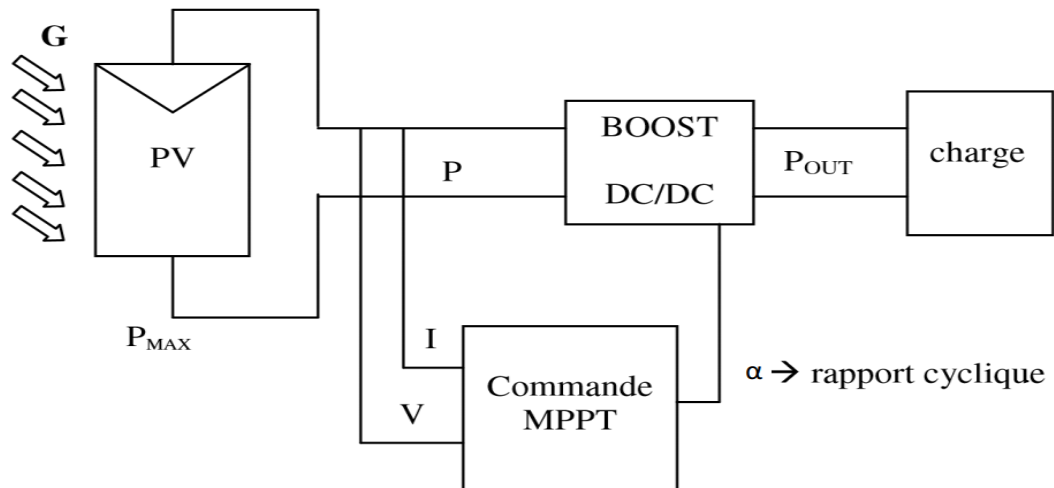


Figure II.1: Chaîne de conversion d'énergie solaire.

II.2. Le Module Photovoltaïque :

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module Figure (II.2). Les connexions en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (Ethylène -Vynil-Acétate) et protégé sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière d'une ou de polyéthylène [26].

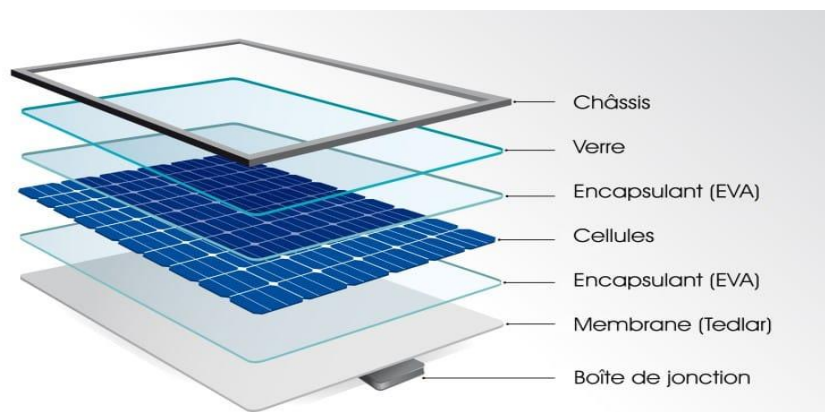


Figure II.2 : composants du panneau photovoltaïque

Les modules sont généralement entourés d'un cadre rigide en aluminium anodisé comprenant des trous de fixation. A l'arrière de chaque module se trouve une boîte de jonction contenant 2 diodes antiparallèles Figure (II.3). Ces diodes antiparallèles permettent d'éviter qu'un module au soleil ne se décharge dans un module à l'ombre [27].

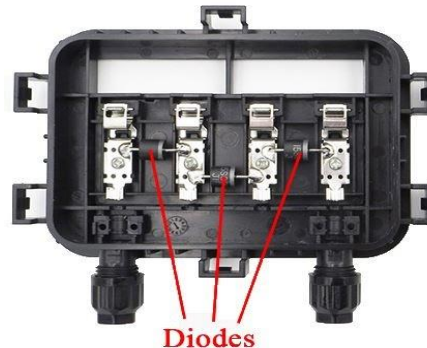


Figure II.3 : boîte de jonction

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

- Protection des cellules contre les agents atmosphériques.
- Protection mécanique et support.
- Connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur [26].

La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin, le courant de sortie, et la puissance seront proportionnels à la surface du module. Ils ont une efficacité de conversion (énergie électrique produite/énergie solaire incidente) de l'ordre de 10 à 20% [28].

II.3. Modélisation Du Système Photovoltaïque :

II.3.1. Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque :

La photopile présentée comporte en réalité une résistance série (R_s) et une résistance Shunt (R_{sh}). Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique $I=f(V)$:

- La Résistance Série** : elle représente la résistance interne de la cellule, elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles. [28]
- La Résistance Shunt** : elle est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée. [29]

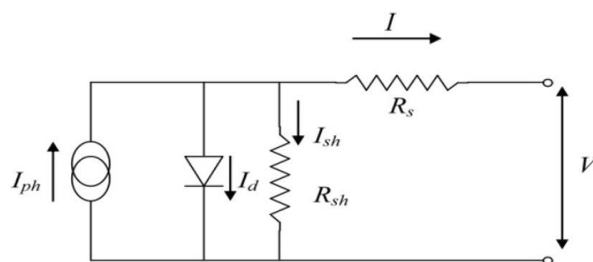


Figure II.4 : Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque

Ce modèle fait intervenir un générateur de courant pour modéliser le flux lumineux incident, Une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule et deux résistances (série et shunt) pour les pertes. [29]

Ce modèle est dit à quatre paramètres, ces paramètres sont :

- Le photo-courant (I_{ph}).
- le facteur d'idéalité de la jonction (n).
- la Résistance série (R_s).
- la résistance shunt (R_{sh}).

Si on néglige l'effet de la résistance shunt R_{sh} , en le considérant infini, on retrouve le modèle à quatre paramètres qui est très utilisé.

Le choix du modèle se fait en fonction des besoins de l'étude même le modèle a cinq paramètres offre un bon compromis entre simplicité et précision. [29]

Ces équations permettent de décrire la caractéristique I-V de la cellule et du module en donnant les expressions des différents courants :

L'étude physique d'une photopile nous permet d'obtenir l'équation de courant de la charge

$$I_{cell} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \tag{II.1}$$

Avec :

I_{cell} : Courant délivré par la photopile.

I_{ph} : Photo courant.

I_d : Courant de la diode.

I_{sh} : Le courant traversant la résistance shunt.

$$I_{sh} = \frac{V_d}{R_{sh}} \tag{II.2}$$

$$I_d = I_{rs} \cdot (e^{\frac{V_d}{V_{th}}} - 1) \tag{II.3}$$

$$V_d = V_{cell} + R_s \cdot I_{cell} \tag{II.4}$$

Avec :

I_{rs} : Courant de saturation de la diode [A]

V_d : Tension aux bornes de la diode [V]

V_{th} : Potentiel thermique [V], donné par : $V_{th} = \frac{n \cdot k \cdot T}{q}$

$$I_{cell} = I_{ph} - I_{rs} \cdot \left(e^{\frac{V_{cell} + R_s \cdot I_{cell}}{V_{th}}} - 1 \right) - \frac{V_{cell} + R_s \cdot I_{cell}}{R_{sh}} \tag{II.5}$$

On a la résistance (R_{sh}) plus élevée donc on peut négliger le courant R_{sh} donc l'équation s'écrit :

$$I_{\text{cell}} = I_{\text{ph}} - I_{\text{d}} \quad (\text{II.6})$$

II.3.2. Les Différentes Equations Des Cellules PV :

a. Le Photo-Courant I_{ph} :

C'est le courant généré par une cellule, il est proportionnel à l'irradiation solaire et est légèrement influencé par la température selon l'équation suivante :

$$I_{\text{ph}} = [I_{\text{sc}} + k_i(T - T_{\text{ref}})] \frac{G}{1000} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

I_{cc} [A] : Courant de court-circuit du panneau (donné par le constructeur).

k_i [A/K] : Courant de court-circuit divisé par le coefficient de température du panneau.

T [K] : Température ambiante.

G [W/m²] : Irradiation sur la surface de la cellule.

T_{ref} [K] : Température de référence (298 K).

b. Le Courant De Saturation I_0 :

Ce courant varie avec la température et est donné :

$$I_0 = I_{\text{rs}} \cdot \left(\frac{T}{T_n}\right)^3 \cdot \exp\left[\frac{q \cdot E_{g0} \cdot \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T}\right)}{n \cdot k}\right] \quad (\text{II.8})$$

Avec :

E_g [eV] : Énergie de gap du semi-conducteur (eV pour le silicium poly cristallin à 25°C).

c. Le Courant De Saturation Inverse De La Diode (Courant De Fuite) I_{rs} :

Son expression est donnée par l'équation :

$$I_{\text{rs}} = \frac{I_{\text{sc}}}{\exp\left(\frac{q \cdot V_{\text{oc}}}{n \cdot N_s \cdot k \cdot T}\right) - 1} \quad (\text{II.9})$$

Où :

V_{oc} [V] : Tension de circuit ouvert du module (donnée par le constructeur).

q [°C] : Charge de l'électron ($1.602 \cdot 10^{-19}$ °C).

N_s : Nombre de cellules connectées en série.

n : Constante d'idéalité de la jonction ($1 < n < 2$).

k [J/K] : Constante de Boltzmann ($1.3805 \cdot 10^{-23}$ J/K).

d. Le Courant De Résistance Shunt :

$$I_{\text{sh}} = \left(\frac{V + I R_s}{R_{\text{sh}}}\right) \quad (\text{II.10})$$

e. Le Courant Du Panneau :

Les équations décrites précédemment ne peuvent représenter la caractéristique I-V d'un module PV puisqu'elles sont propres à une seule cellule PV qui représente l'élément de base du panneau, on introduit donc l'équation spécifique à un module :

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left[\exp \left(\frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{n \cdot k \cdot N_s \cdot T} \right) - 1 \right] - I_{sh} \tag{II.11}$$

Où :

N_s : Nombre de cellules connectées en série dans un module.

N_p : Nombre de cellules connectées en parallèle dans un module. [29]

II.4. Caractéristiques D'un Module Du Panneau Photovoltaïque :

Les modules sont généralement des parallélépipèdes rectangles rigides minces (quelques centimètres d'épaisseur), dont les caractéristiques suivantes :

- La puissance de crête, P_c : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans Les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m^2).
- La caractéristique $I = f(V)$: Courbe représentant le courant I débité par le module en Fonction de la tension aux bornes de celui-ci.
- Tension à vide, V_{co} : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un Eclairage " plein soleil ".
- Courant de court-circuit, I_{cc} : Courant débité par un module en court-circuit pour un Eclairage " plein soleil "
- Point de fonctionnement optimum, $P_m (V_m, I_m)$: Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil, $P_m = V_m \cdot I_m$
- Rendement : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.

L'importance de la courbe $I(V)$ et $P(V)$ est qu'elle décrit la capacité de conversion d'énergie de la cellule solaire, c'est-à-dire la conversion de l'énergie de rayonnement qui lui tombe dessus en énergie électrique, sous une quantité spécifique de rayonnement solaire incident à une certaine température.

Tableau II.1 : Caractéristique électrique de la cellule PV dans les conditions standards<CST> $T=25^\circ\text{C}$, $G=1000\text{W /m}^2$.

Puissance nominal	200 W
Tension a puissance maximal	26.4 V
Courant a puissance maximal	7.58 A
Tension de circuit ouvert	32.9 V
Courant de court-circuit	8.21 A
Nombre des cellules en série N_s	54
Nombre des cellules en parallèle N_p	1

II.5. Simulation D'un Panneau Photovoltaïque Sous Matlab-Simulink :

Le bloc du panneau solaire est modélisé par équations électriques. Ayant comme entrées la température T et l'irradiation G, et les courant I et tension V comme sortie.

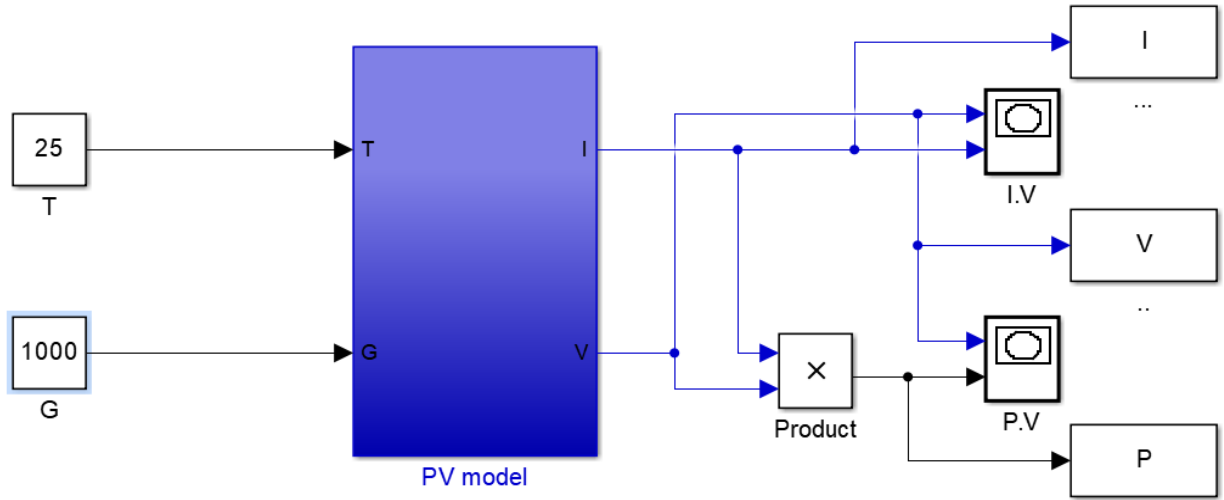
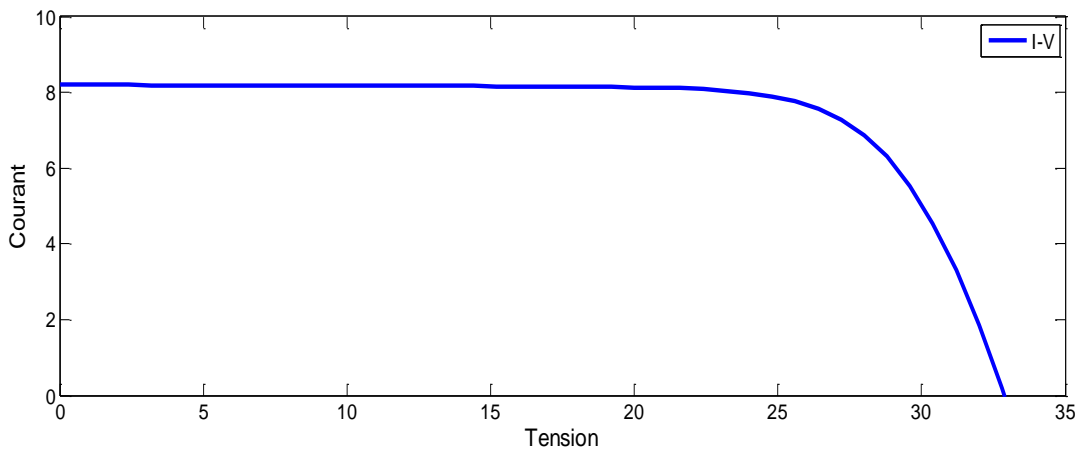


Figure II.5 : Simulation d'un panneau photovoltaïque

Les résultats obtenus de la simulation (programmation en utilisant le logiciel MATLAB) d'un Caractéristiques courant -tension I(V) et puissance -tension P(V) de la cellule photovoltaïque Dans les conditions standards (T=25°C, E=1000 W/m²) sont représentés dans les figures suivant :

La figure II.6 représente la caractéristique courant - tension d'une cellule solaire dans les Conditions de E=1000 W/m² et à T=25°C.

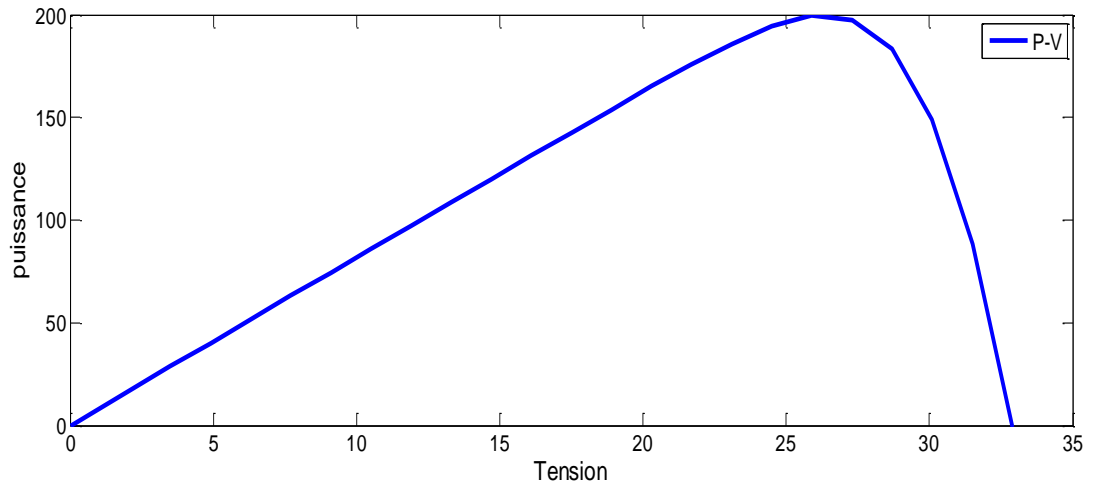
Le courant de court-circuit est égal 8.2A et la tension de circuit ouvert est 33V.



La figure II.6 : représente la caractéristique I-V d'un module photovoltaïque

La figure II.7 représente la caractéristique puissance - tension d'une cellule solaire dans les conditions de E=1000 W/m² et T=25°C. La puissance maximale est P max=200W.

On remarque que, quand la tension augmente la puissance augmente jusqu'à atteindre la valeur optimale (P max) ensuite elle décroît.



La figure II.7 : représente la caractéristique P-V d'un module photovoltaïque

II.6. Effets Climatiques Sur La Cellule PV :

II.6.1. Influence De L'éclairement Sur La Cellule :

Les variations du courant et de la puissance en fonction de la tension pour différents niveaux d'éclairements à température maintenue constante 25°C, figure II.8 et figure II.9, montrent clairement l'existence de maxima sur les courbes de puissance correspondant aux Points de Puissance Maximale P_{max} . Lorsque l'irradiation varie pour une température donnée, le courant de court-circuit I_{cc} varie proportionnellement à l'irradiation. Dans un même temps, la tension de circuit ouvert V_{co} (à vide) varie très peu.

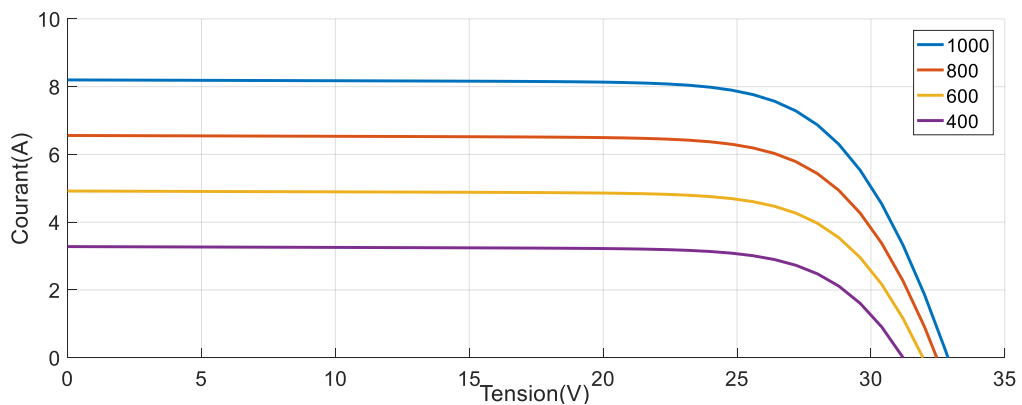


Figure II .8 : Caractéristique I(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).

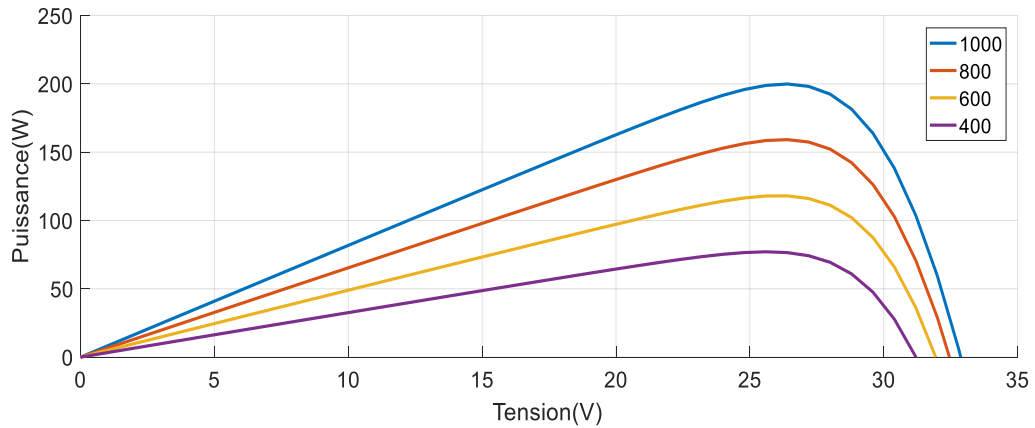


Figure II .9 : Caractéristique P(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).

II.6.2. Influence De La Température Sur La Cellule :

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules solaires. La température a également une influence sur la caractéristique d'un générateur PV. La figure II.10 et figure II.11 présente la variation des caractéristiques d'une cellule PV en fonction de la température à un éclairement donné. L'éclairement est ici fixé à 1000W.m².

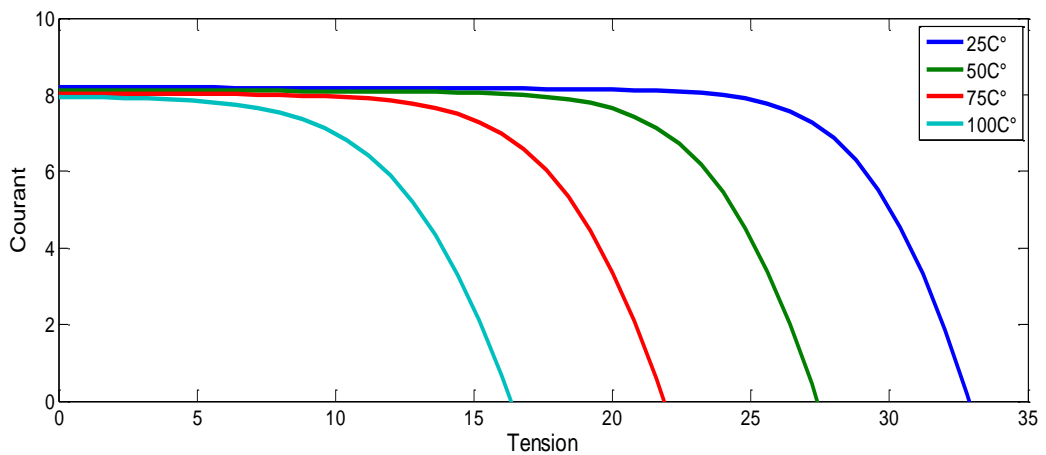


Figure II .10 : Caractéristique I(V) pour différentes températures (G=1000W/m²).

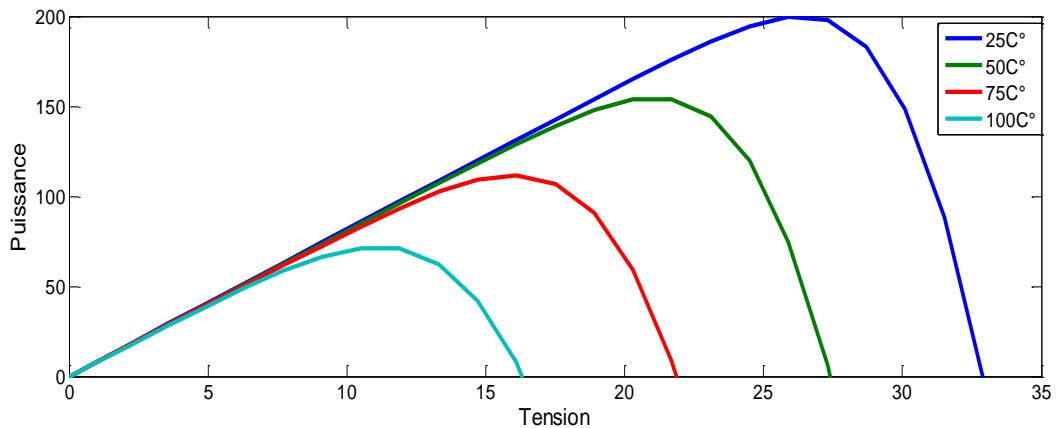


Figure II .11 : Caractéristique P(V) pour différentes températures (G=1000W/m²).

On peut donc tirer la conclusion suivante : les cellules PV ont de meilleure performance dans Un environnement froid avec ciel dégagé.

II.7. Modèle De Le Hacheur Survolteur (ou Boost) :

Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie V_s est supérieure à celle de l'entrée V_e Cette structure demande un interrupteur commandé et en parallèle avec la source, voir (Figure II. 12).

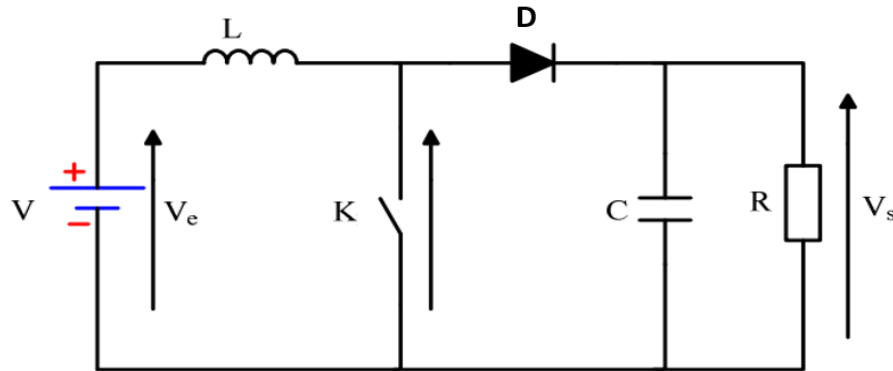


Figure II.12 : Le convertisseur BOOST

Ce hacheur comporte trois composants essentiels : Une inductance L, une capacité C et un interrupteur qui peut prendre deux états, $k=1$ et $k=0$ [30].

Pour un rapport cyclique « α » donné, et en régime de conduction continu, la tension moyenne et le courant à la sortie sont donnés par [30].

$$V_s = \frac{V_e}{1-\alpha} \tag{II.12}$$

$$I_s = (1 - \alpha)I_e \tag{II.13}$$

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

Dans le cas de notre étude on utilise ce hacheur, la tension d'entrée du hacheur boost représente la tension du module photovoltaïque (la Figure II. 13)

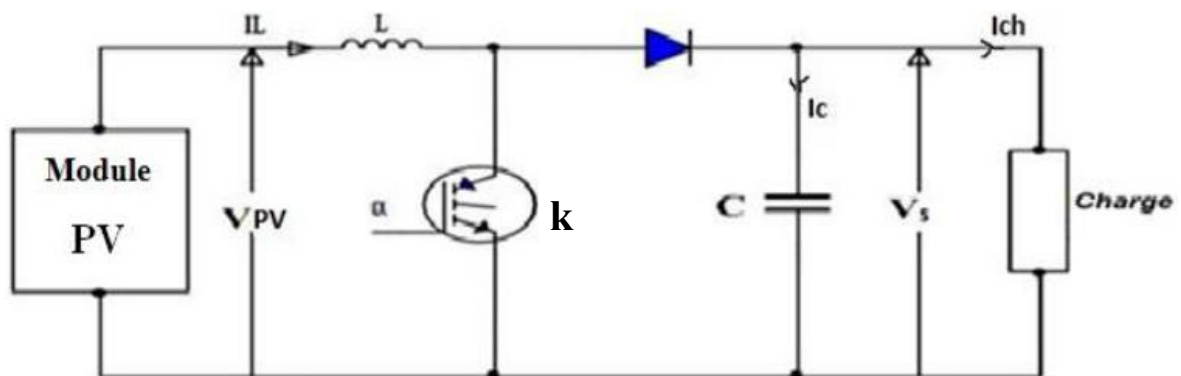


Figure II.13: Schéma d'un hacheur parallèle (boost) raccordé au GPV

L'étude qui suit est basée sur les hypothèses suivantes [30]:

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

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

$$R_{ch} = \frac{R_{pv}}{(1-\alpha)^2} \tag{II.14}$$

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

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

$$\alpha = 1 - \sqrt{\frac{R_{pv}}{R_{ch}}} \tag{II.15}$$

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

Les différents signaux des grandeurs de convertisseur boost sont illustrés dans la figure (II.14)

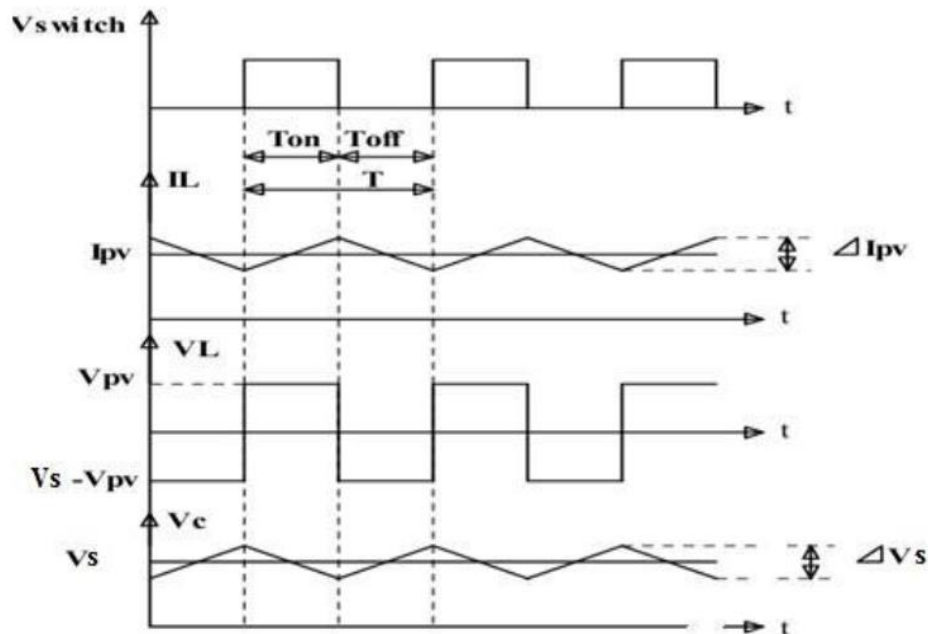


Figure II.14: Formes typiques des ondes du convertisseur boost

Pendant le fonctionnement du hacheur, le transistor sera commuté à une fréquence constante f_s avec un temps de fermeture $ton = \alpha Ts$ et un temps d'ouvertures $toff = (1-\alpha) Ts$, où:

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

II.7.1. Modélisation Du Circuit :

$$\begin{aligned}
 E &= \frac{1}{2} \cdot LI_L^2 \\
 \Delta I_{L_{on}} + \Delta I_{L_{off}} &= 0 \\
 \Delta I_{L_{on}} + \Delta I_{L_{off}} &= \frac{V_s \cdot \alpha T}{L} + \frac{(V_s + V_0)(1 - \alpha)T}{L} = 0 \\
 R &= \frac{V_c}{I_0}
 \end{aligned}
 \tag{II.16}$$

II.7.2. Représentation D'état :

$$\begin{cases}
 \dot{X} = A_2 X + B_2 u \\
 Y = C_2 X
 \end{cases}$$

Avec :

$$X = \begin{bmatrix} I_0 \\ V_0 \end{bmatrix}$$

La modélisation de ce convertisseur passe par l'analyse des différentes séquences de fonctionnement que nous supposons de durées fixées par la commande α . Selon l'état de l'interrupteur k, on peut distinguer deux séquences de fonctionnement :

- **Première Séquence De Conduction [0 à αT_s] :** lorsque l'interrupteur k est fermé et la diode est polarisée en inverse ($V_{diode} = -V_s$). Durant cette séquence, le courant traversant l'inductance L va augmenter linéairement et une énergie stockée dans l'inductance. La charge est totalement isolée du module PV.

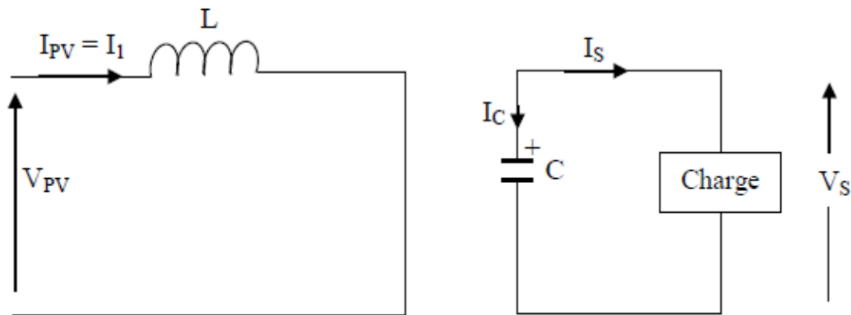


Figure II.15: L'état de l'interrupteur k est fermé

Les deux équations qui régissent le fonctionnement du hacheur sur l'intervalle [0 à αT_s] sont données par le système d'équations :

$$\begin{cases}
 V_0 - L \frac{dI_0}{dt} - RI_0 = 0 \\
 V_c = \frac{1}{C} \cdot \frac{V_c}{R}
 \end{cases}
 \tag{II-17}$$

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{RC} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_0$$

- **Deuxième Séquence De Conduction** [αT_s à T_s] : lorsque l'interrupteur k est ouvert et la diode est fermée. Durant cette séquence, la charge est reliée directement au module PV à travers de l'inductance L.

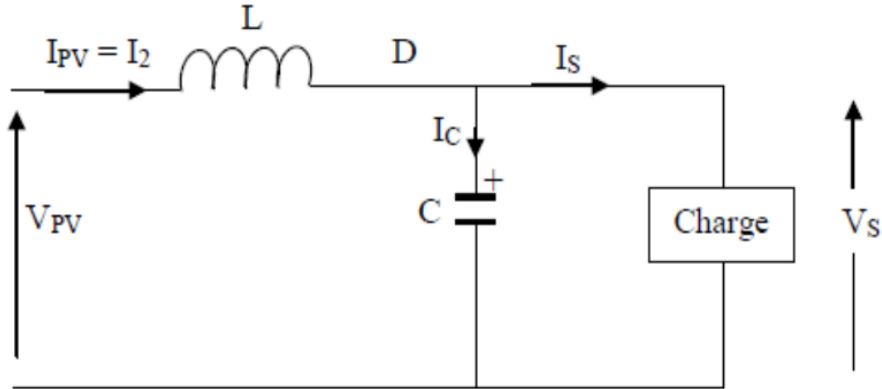


Figure II.16: L'état de l'interrupteur k est ouvert

Dans ce cas, le fonctionnement peut être décrit par le système d'équation (II-18):

$$\begin{cases} V_0 - L \frac{di_0}{dt} - RI_0 - V_C = 0 \\ C \frac{dV_C}{dt} = I_0 \frac{V_C}{R} \end{cases} \quad (II-18)$$

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_0$$

Donc le système sous forme matricielle devient :

$$\begin{cases} X = (A_1 X + B_1 \cdot V_0)\alpha + (A_2 X + B_2 \cdot V_0)(1 - \alpha) \\ V_0 = C_1 \cdot \alpha + C_2(1 - \alpha)X \end{cases} \quad (II-19)$$

$$\begin{cases} X_1 = \frac{1-\alpha}{L} X_2 + \frac{1}{L} V_0 \\ X_2 = \frac{1-\alpha}{L} X_1 + \frac{1}{RC} X_2 \end{cases} \quad (II-20)$$

Alors: le module globale

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1-\alpha}{L} \\ \frac{1-\alpha}{L} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_0$$

A partir des équations, on peut écrire l'équation suivante :

$$(V_S)\alpha T_s = (V_0 + V_S) \cdot (1 - \alpha) \cdot T_s \quad (II.21)$$

II.8. Simulation D'un Hacheur Boost Sous Matlab-Simulink :

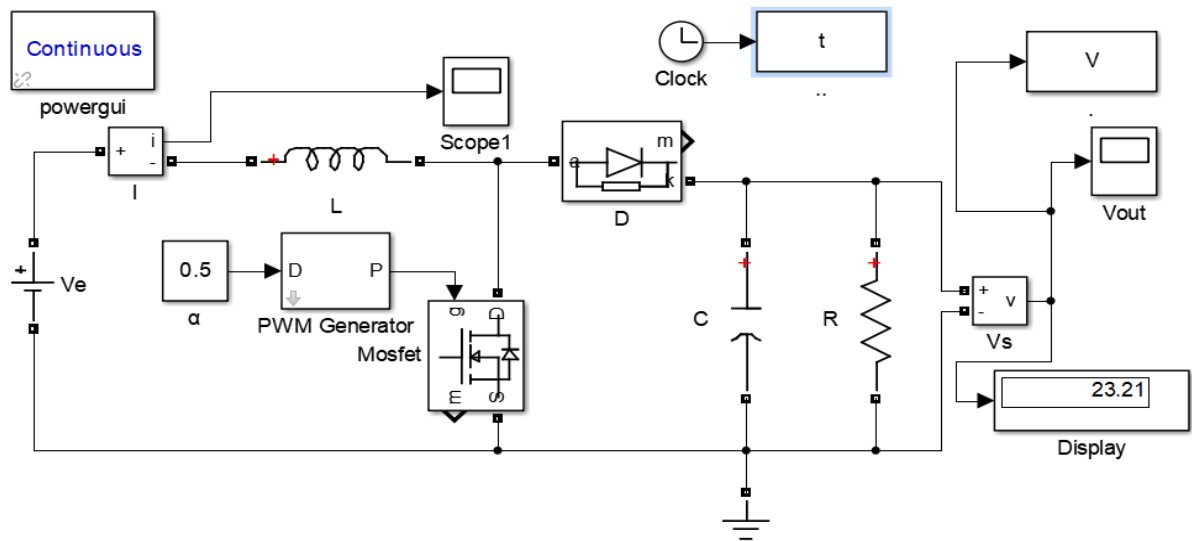


Figure II.17: Schéma block de hacheur Boost.

II.8.1. Résultat De Simulation :

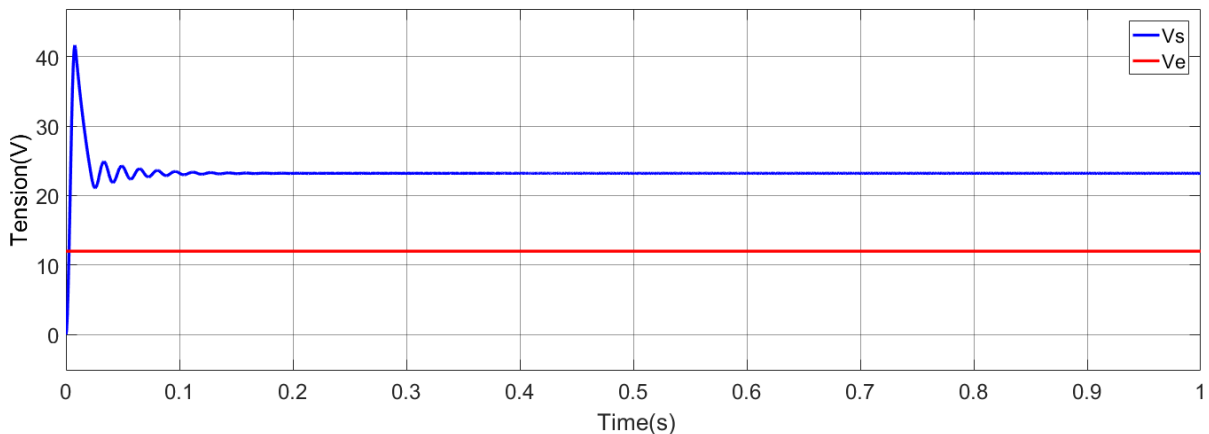


Figure II.18: Résultat de V_e et V_s de hacheur Boost

II.9. Commandes MPPT :

Les cellules photovoltaïques sont utilisées pour fournir de l'énergie dans de nombreuses applications électriques. Pour obtenir la puissance maximale du panneau solaire, un suiveur du point de puissance maximum (MPPT : Maximum Power Point Tracking) est utilisé pour la commande de l'hacheur [32]

La technique de suivi du point de puissance maximal (MPPT : Maximum Power Point Tracking) a été développée depuis 1968, cette commande est essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque [33].

Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le panneau photovoltaïque

II.9.1. Principe De La Recherche Du PPM

Ce principe assure que le système sera toujours amené à son optimum de puissance est décrit schématiquement par la (figure II.19 et figure II.20)

Les (figure II.19 et II.20) illustre trois cas de perturbation. Suivant le type de perturbation, Le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum.

Dans ces cas, pour une variation d'ensoleillement il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2.

Dans le cas II.19(b) pour une variation de charge on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimal grâce à l'action d'une commande.

Enfin dans le dernier cas II.20 la variation du point de fonctionnement peut se produire lié à la variation de température de fonctionnement du GPV, bien qu'il faut également agir au niveau de la commande.

Dans le cas réel, cette variation est due aux trois cas précédents en même temps.

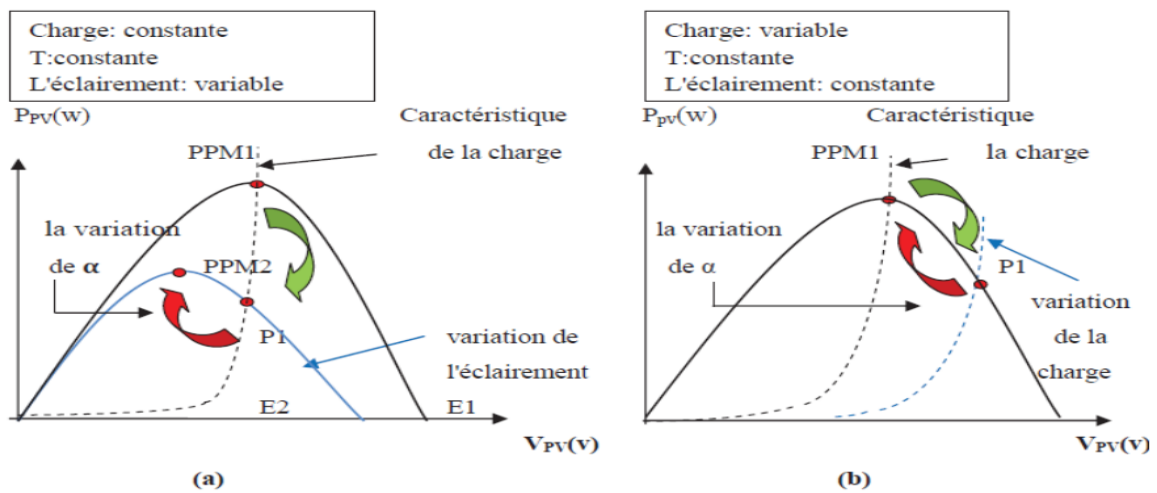


figure II.19

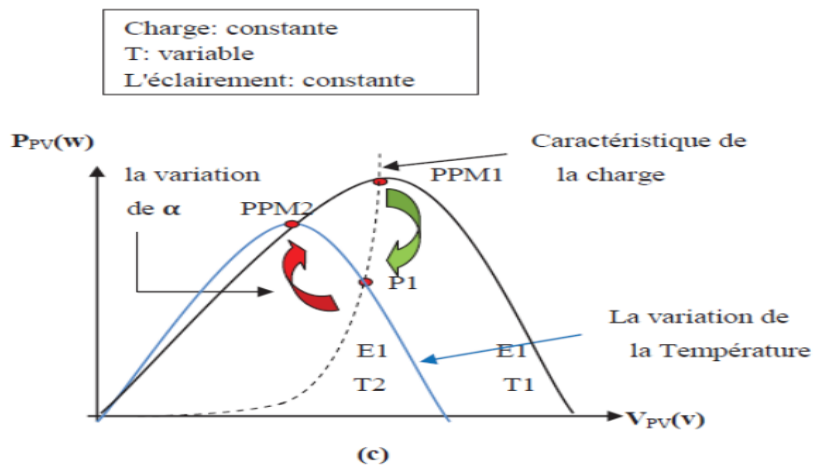


Figure II.20

La comparaison des P_a et P_b mesurées respectivement aux instants $(t-1)$ et (t) permet de chercher le point de la puissance maximale, (figure II.20) en incrémentant ou décrémentant le rapport cyclique α . Si la dérivée est positive ($P_a < P_b$), cela signifie que nous nous rapprochons du PPM en incrémentant α , et si la dérivée de la puissance est négative ($P_a > P_b$), cela veut dire que nous l'avons dépassé PPM nous devons décrémenter α .

Une fois α modifié, on prend sa valeur et on effectue une nouvelle mesure de I_{pv} , V_{pv} pour calculer la nouvelle puissance

II.9.2. Techniques De Commande De l'MPPT

Dans un système photovoltaïque comprenant une source photovoltaïque et une charge, la recherche du point de fonctionnement optimal par des techniques d'optimisation représente une étape importante. Cette technique de commande est souvent nommée dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum » (Maximum Power Point Tracking, MPPT) [31]. Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quelque soient les conditions météorologiques (température et irradiation), et quelle que soit la tension de la batterie, la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum.

II.9.3. Différentes Techniques D'MPPT

Afin d'extraire le maximum de puissance d'un panneau solaire, on peut raisonner sur plusieurs et différentes méthodes de commandes MPPT existent et font appel à des algorithmes plus ou moins complexes en fonction des critères de précision et de rapidité exigés. Certains systèmes sont précis mais peu rapides, d'autres sont plus rapides mais moins efficaces. Les différentes méthodes de maximisation de puissance sont classées en deux catégories : les méthodes indirectes et les méthodes directes [34]

Dans notre travail, on se limite à la méthode de Perturbation et observation (P&O), qui est facile, très simple à implanter, et de bon rendement.

II.9.3.1. Méthode Perturbation & Observation (P&O) :

a. Définition :

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

b. Le Fonctionnement De L'algorithme P&O :

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

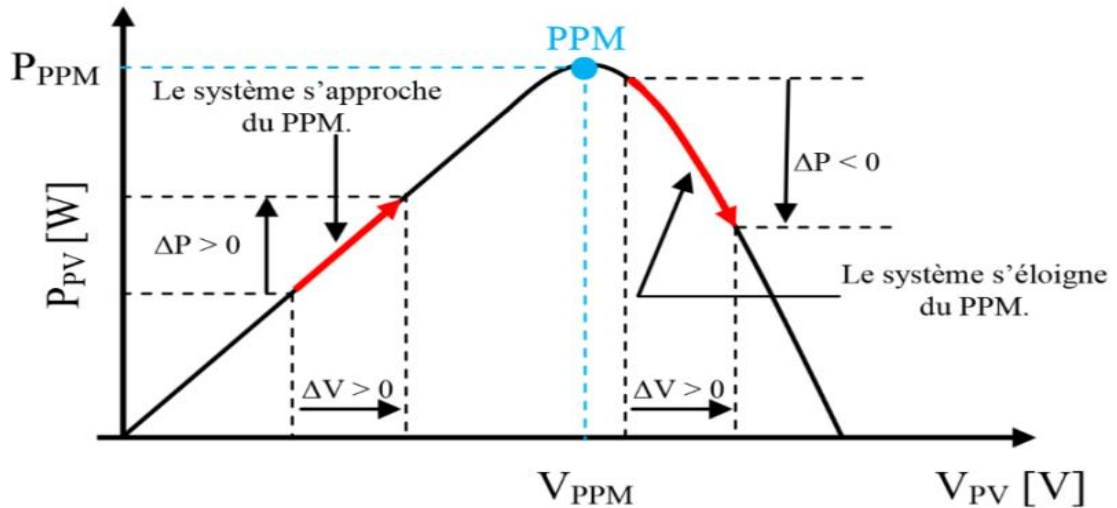


Figure II.21: Caractéristiques de fonctionnement de la méthode de P&O

Ainsi, comme l'illustre la figure (II.21) pour différentes zones de fonctionnement, on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre un accroissement de la puissance P_{pv} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du MPP. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le MPP. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au MPP, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande [35]. On résume cette figure dans quatre cas:

❖ **Premier Cas :** $\Delta P_{pv} > 0$ et $\Delta V_{pv} > 0$

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

$$(k) = \alpha (k - 1) - \Delta\alpha$$

❖ **Deuxième Cas :** $\Delta P_{pv} > 0$ et $\Delta V_{pv} < 0$

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

$$(k) = \alpha (k - 1) + \Delta\alpha$$

❖ **Troisième Cas :** $\Delta P_{pv} < 0$ et $\Delta V_{pv} < 0$

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

$$(k) = \alpha (k - 1) - \Delta\alpha$$

❖ Quatrième Cas : $\Delta P_{pv} < 0$ et $\Delta V_{pv} > 0$

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

$$\alpha(k) = \alpha(k - 1) + \Delta\alpha$$

L'algorithme peut être représenté mathématiquement par l'expression :

$$V(K) = V(K - 1) + \Delta V \cdot \text{Sign}\left(\frac{dP}{dV}\bigg|_{V=V_{n-1}}\right)$$

La figure (II.22) représente l'algorithme de la commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du champ PV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du champ PV à chaque instant. Avec cet algorithme la tension de fonctionnement V_{pv} est perturbée à chaque cycle du MPPT. Dès que le MPP sera atteint, V_{pv} oscillera autour de la tension idéale V_{mpp} de fonctionnement. Ceci cause une perte de puissance qui dépend de la largeur du pas d'une perturbation simple [36]

L'organigramme mis en œuvre pour le contrôleur P&O est présenté par la Figure suivante :

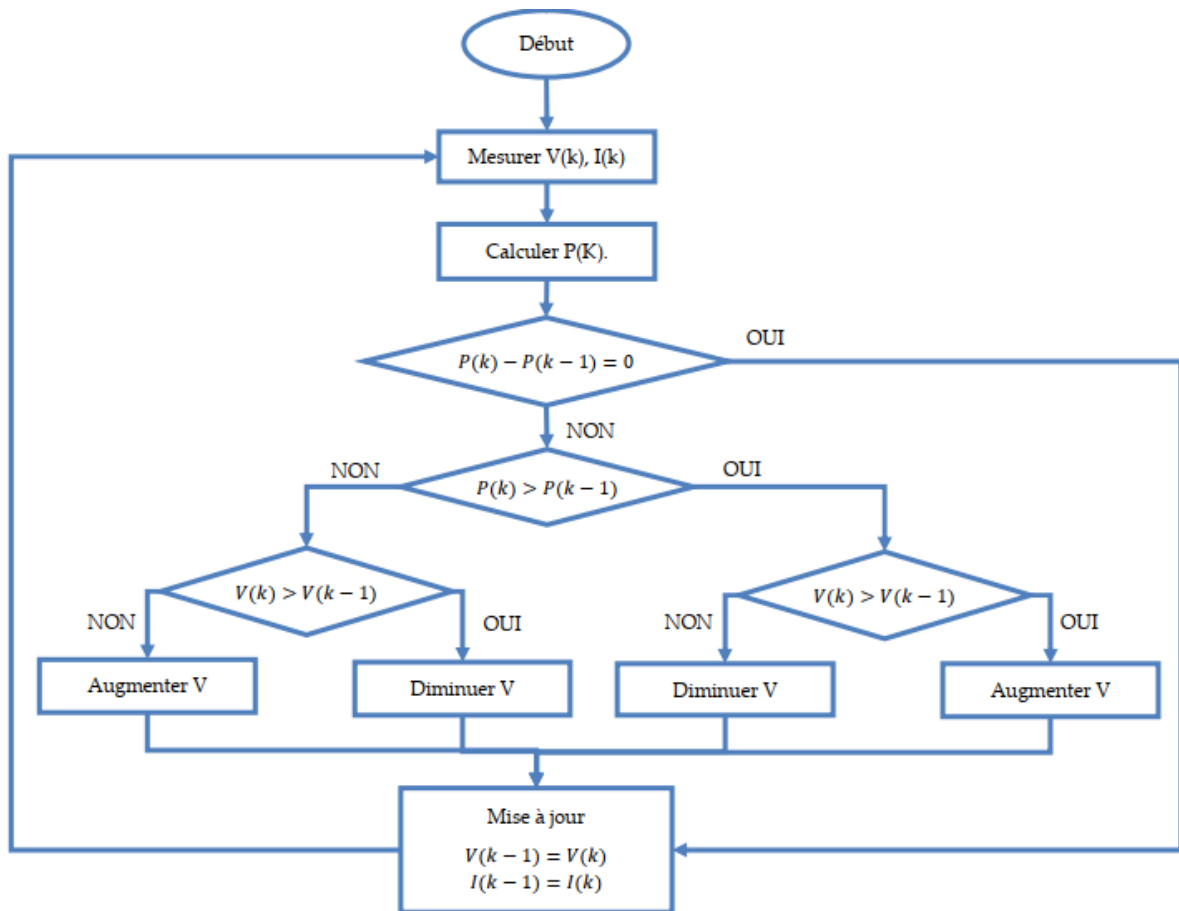


Figure II-22 : Organigramme de l'algorithme MPPT de la perturbation & observation

II.10.2. Résultat De Simulation :

Les figures II.26-26-28 suivantes montrent les résultats de simulation de la puissance, courant et tension respectivement de la technique P&O appliqué un générateur pour un éclairement fixe 1000 W/m^2 .

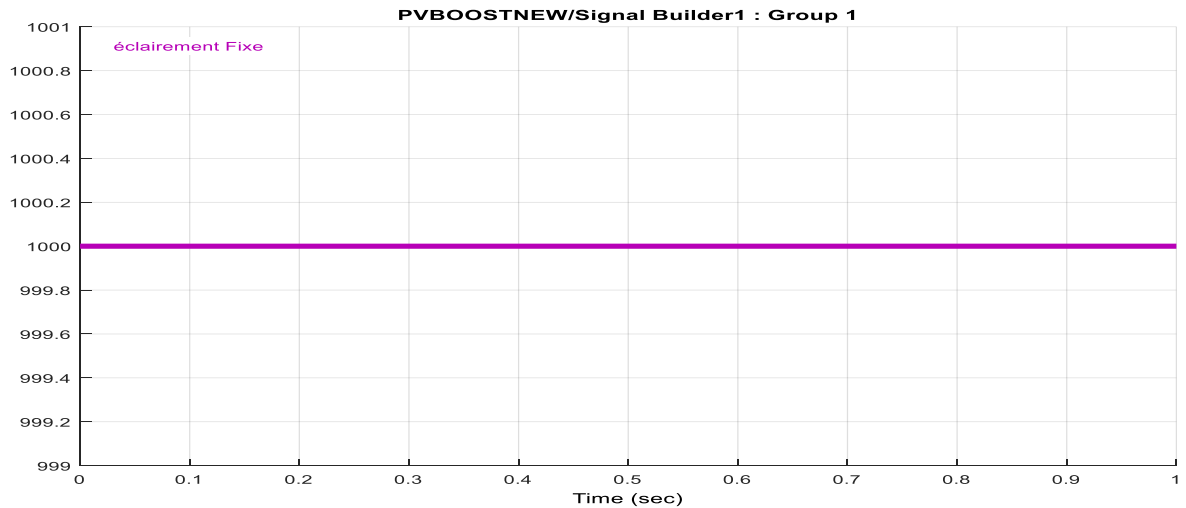


Figure II.25: Courbe d'éclairement fixe

De ces graphes, le contrôleur MPPT par la méthode P&O extrait la puissance optimale pendant toute l'intervalle de temps, ce qui prouve par conséquent l'efficacité de l'algorithme P&O.

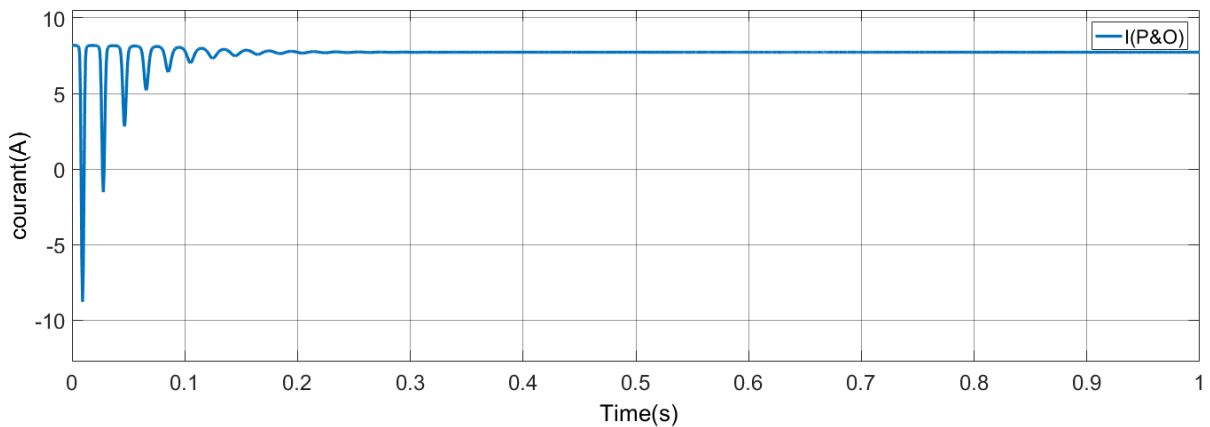


Figure II.26: Graphe du courant d'éclairement fixe

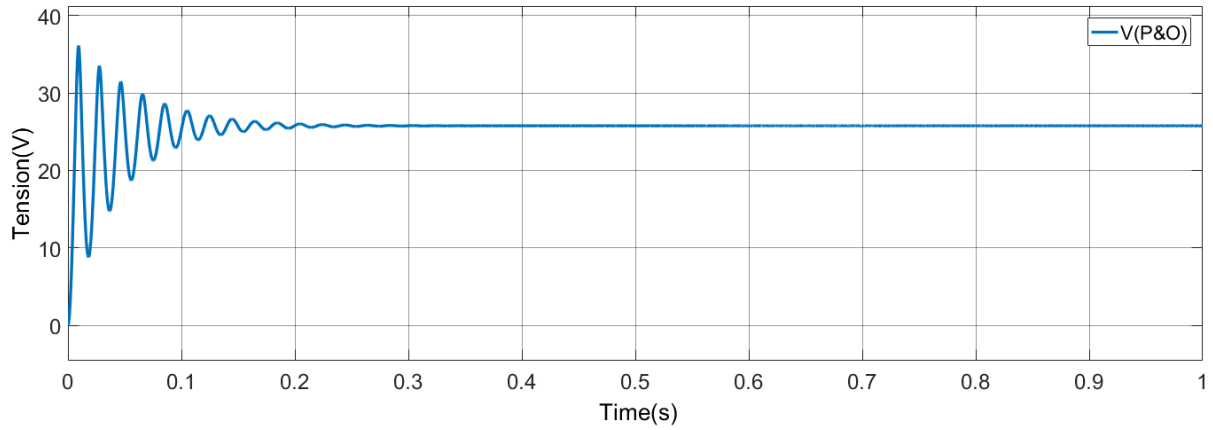


Figure II.27: Graphe du Tension d'éclairment fixe

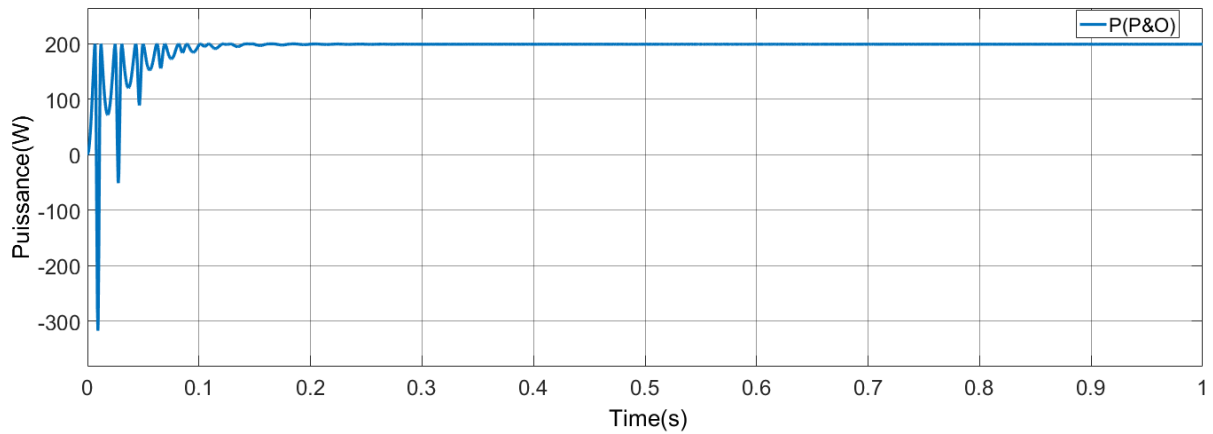


Figure II.28: Graphe de puissance d'éclairment fixe

II.10.3. Simulation Pour Un Eclairment Variable :

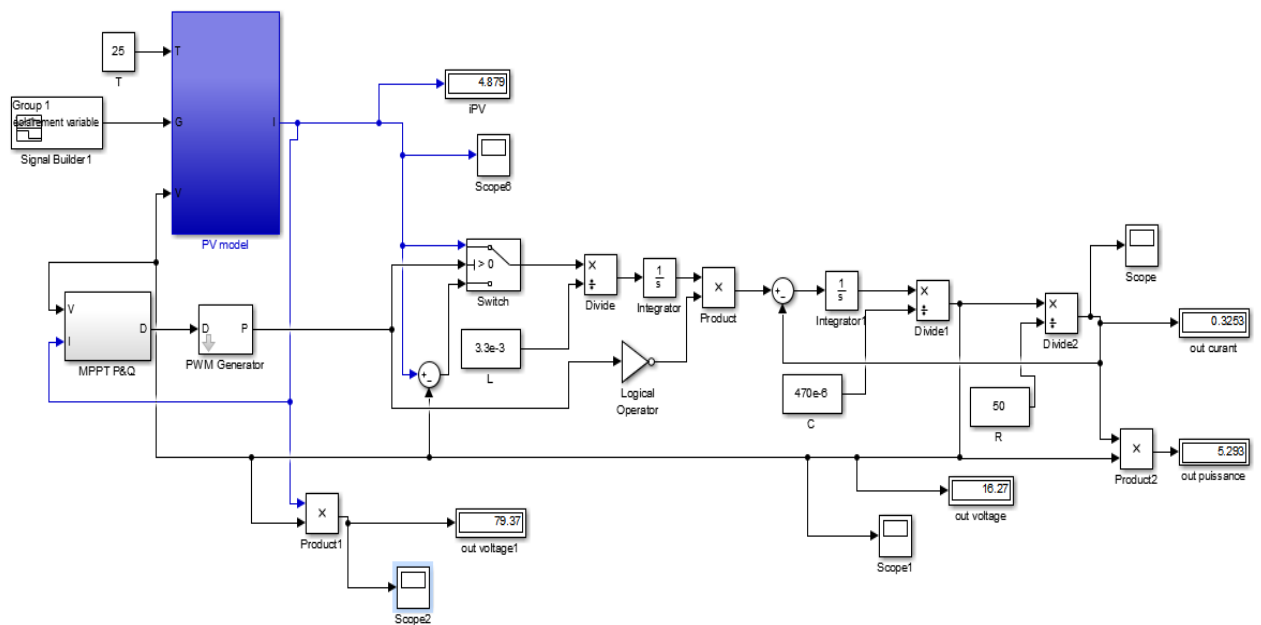


Figure II.29: Schéma block de système photovoltaïque pour un éclairment variable

II.10.4. Résultat De Simulation :

Les figures II.31-32-33 suivantes montrent les résultats de simulation de la puissance, courant et tension respectivement de la technique P&O appliqué un générateur pour un éclairement variable (1000-800-600 W/m²).

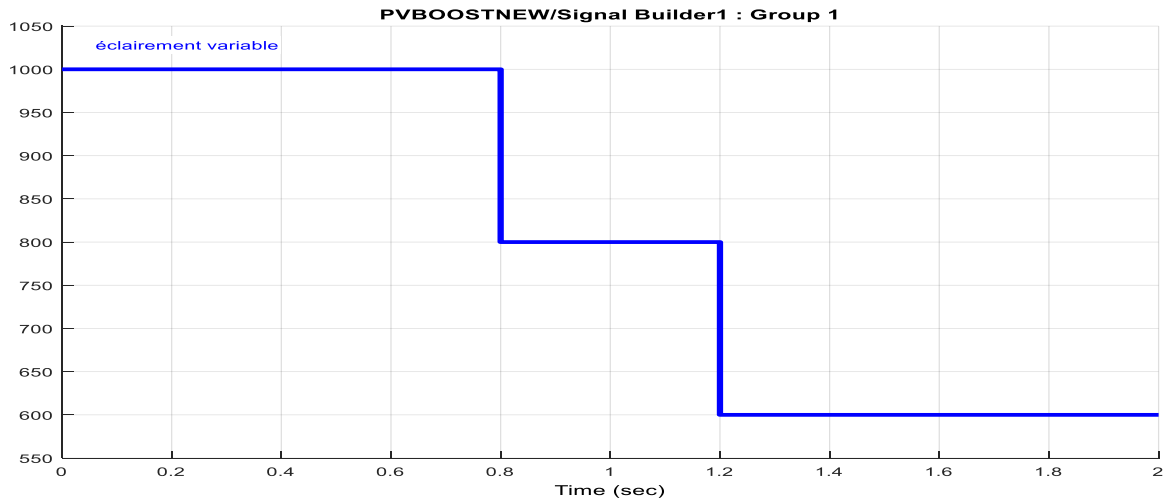


Figure II.30: Courbe d'éclairement variable

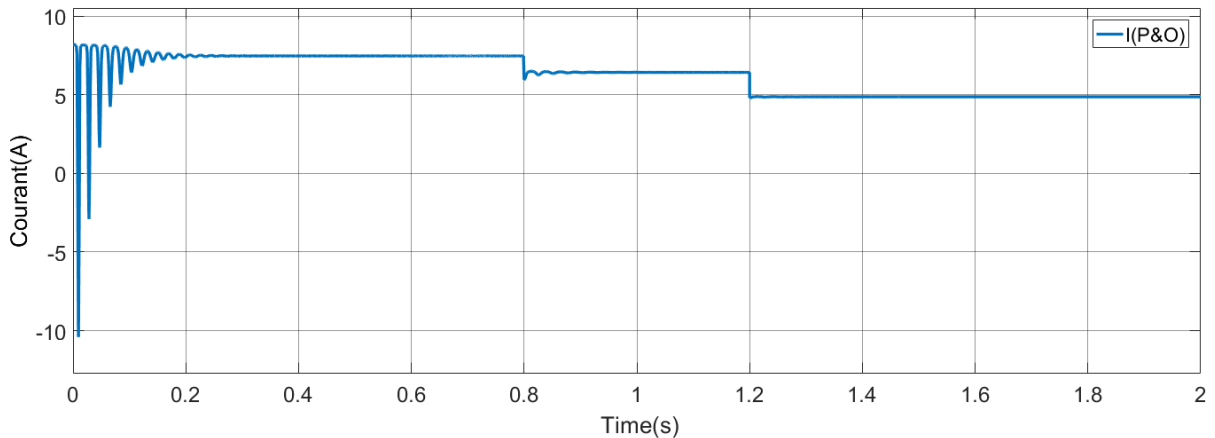


Figure II.31: Graphe de courant d'éclairement variable

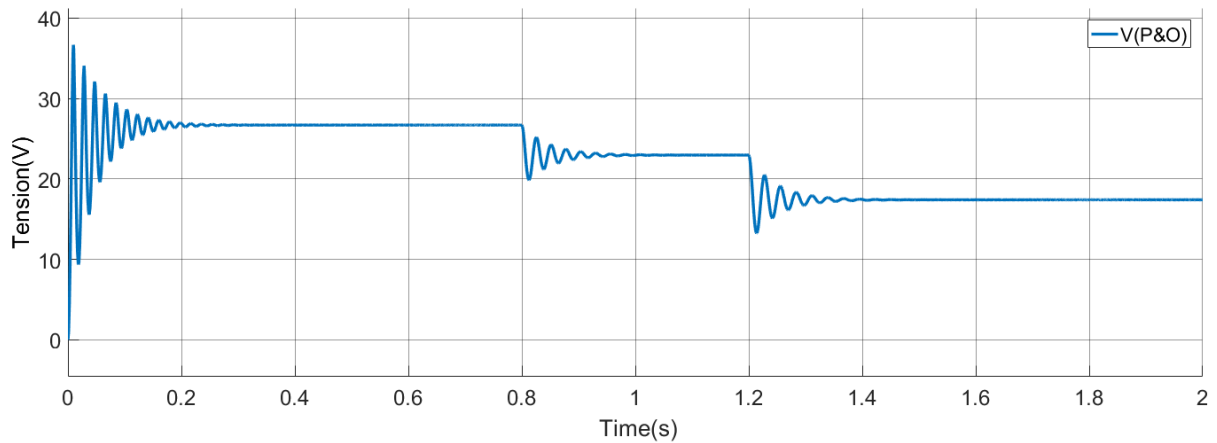


Figure II.32: Graphe de Tension d'éclairage variable

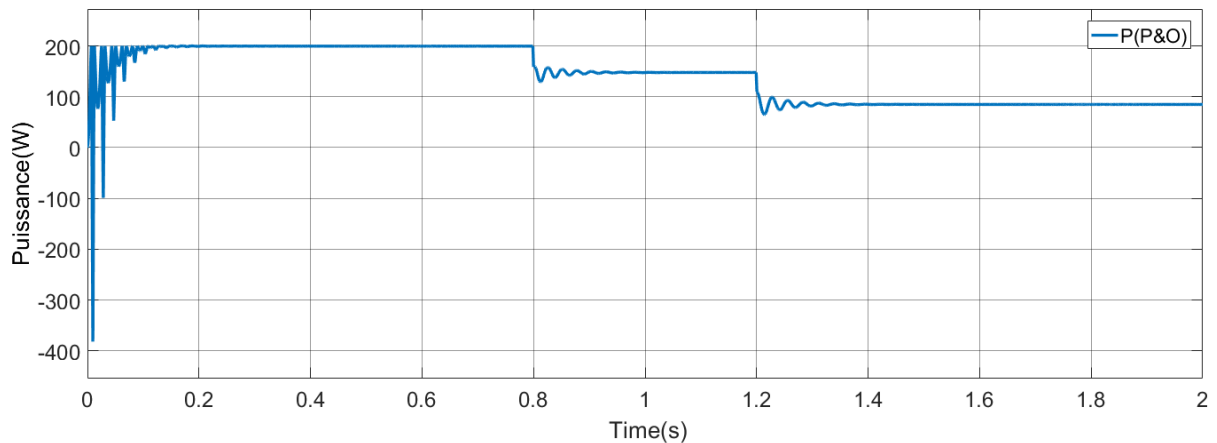


Figure II.33: Graphe de puissance d'éclairage variable

II.11. Méthode Particle Swarm Optimisation(PSO)

L'algorithme PSO est l'un des algorithmes EA. Il est largement utilisé en raison de son processus simple, de sa facilité de mise en œuvre et de sa rapidité de calcul. Certains chercheurs constatent que parce que l'optimisation de l'essaim de particules est basée sur l'optimisation de la recherche, il doit être capable de trouver le maximum de power point quels que soient les changements d'environnement. Le processus de l'algorithme PSO, essentiellement, est un processus itératif. À chaque itération, suivez la meilleure valeur d'aptitude, la particule se déplace vers la meilleure. Après plusieurs itérations, la vitesse devient très faible ou égale à zéro, puis le power point maximum est trouvé. Dans cet article, la fonction objective est définie comme la mesure de la puissance de sortie du réseau PV et la position de la particule représente la tension de sortie du réseau PV.

L'algorithme d'optimisation des essaims de particules (PSO) est une méthode d'optimisation métaheuristique influencée par le flocage des oiseaux ou des poissons éduquer le comportement social pour trouver leurs objectifs dans l'espace de recherche. Chaque particule changera sa position en fonction du temps. L'algorithme est dirigé par expérience locale ou personnelle (P_{best}) et autre particule ou expérience globale (G_{best}) et décision de la particule de rechercher suivant recherche suivante position dans l'espace de recherche

multidimensionnel. Ainsi, l'algorithme PSO mélange la méthode de recherche locale et de recherche globale [38], [39]

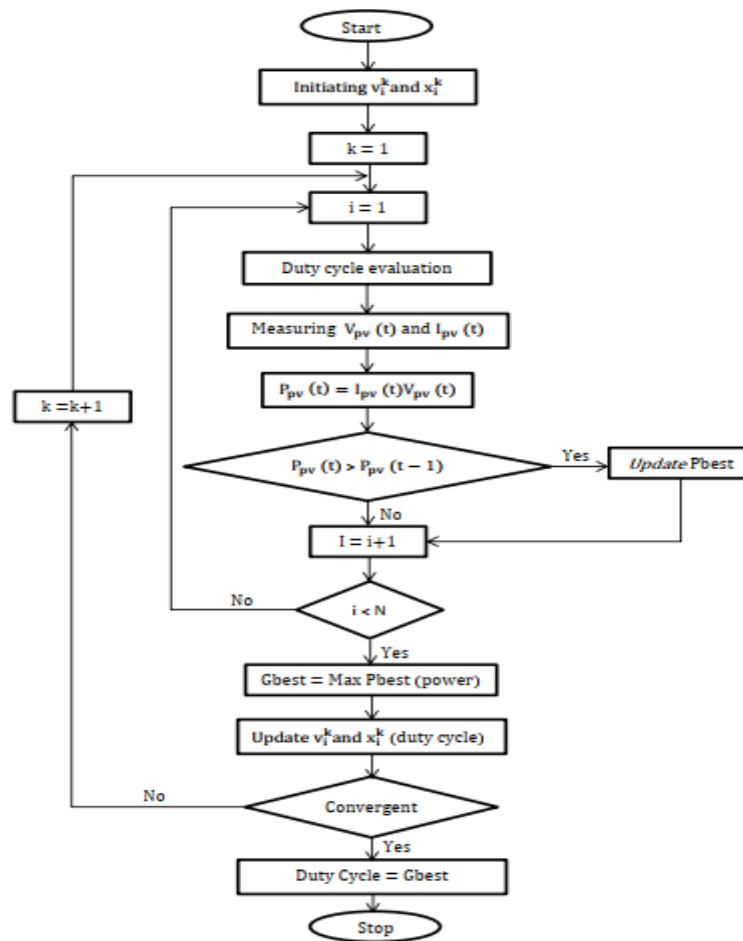


Figure II.34: PSO Algorithme

II.12. Simulation D'un Système Photovoltaïque Sous Matlab-Simulink Méthode PSO :

II.12.1. Simulation pour un éclairement fixe

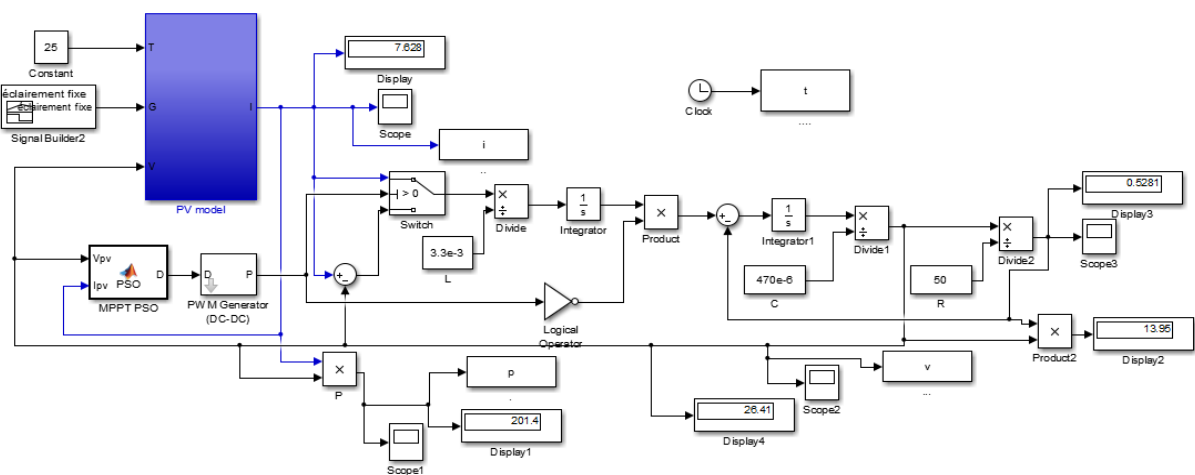


Figure II.35: Schéma block de système photovoltaïque pour un éclairement fixe

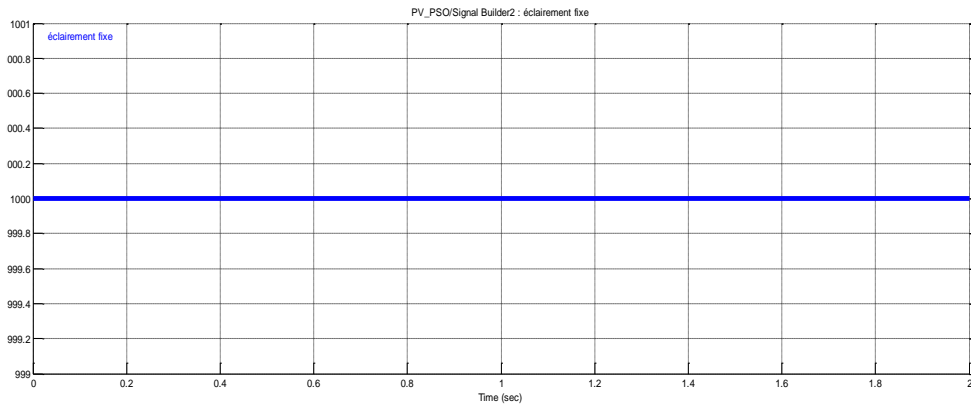


Figure II.36: Courbe d'éclairément fixe

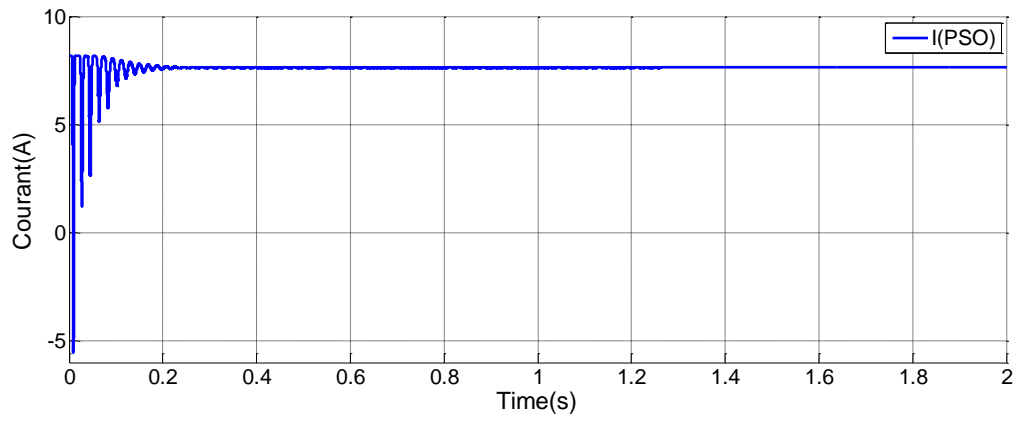


Figure II.37: Graphe du courant d'éclairément fixe

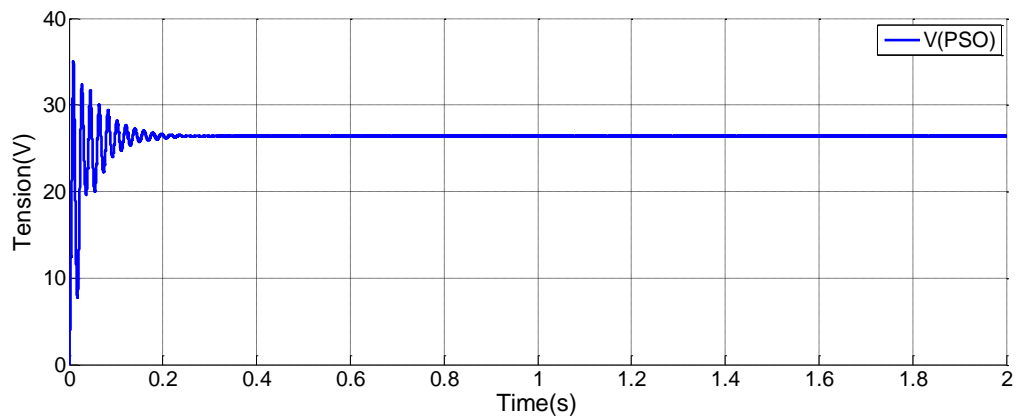


Figure II.38: Graphe du Tension d'éclairément fixe

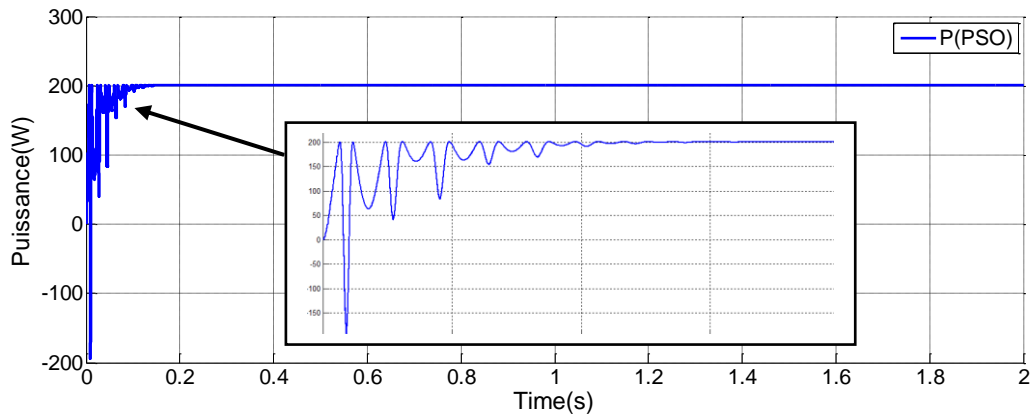


Figure II.39: Graphe de puissance d'éclairement fixe

II.12.2. Simulation pour un éclairement variable

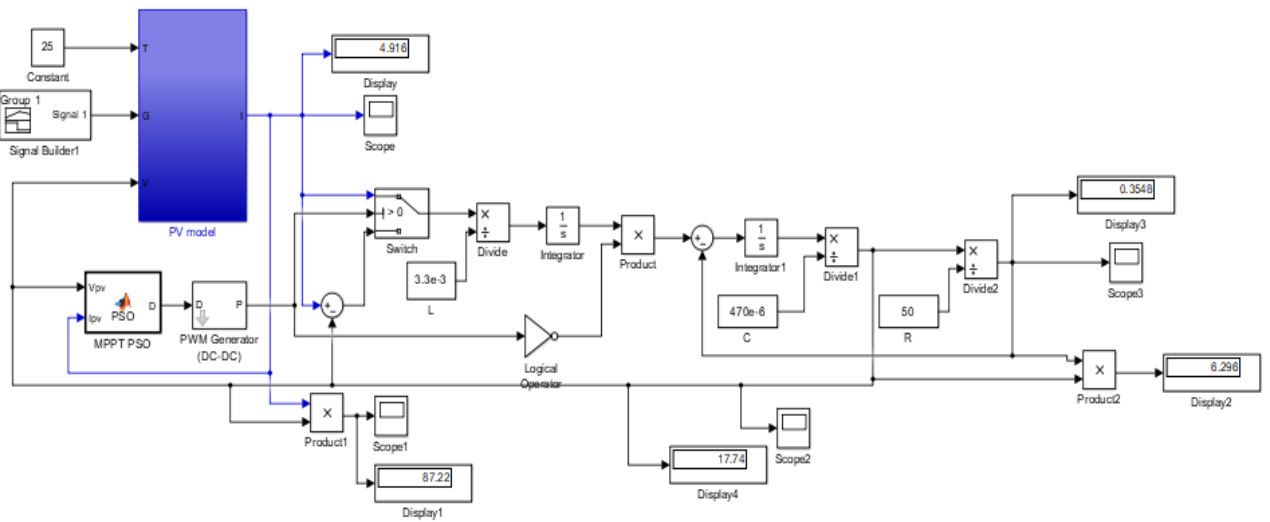


Figure II.40: Schéma block de système photovoltaïque pour un éclairement variable

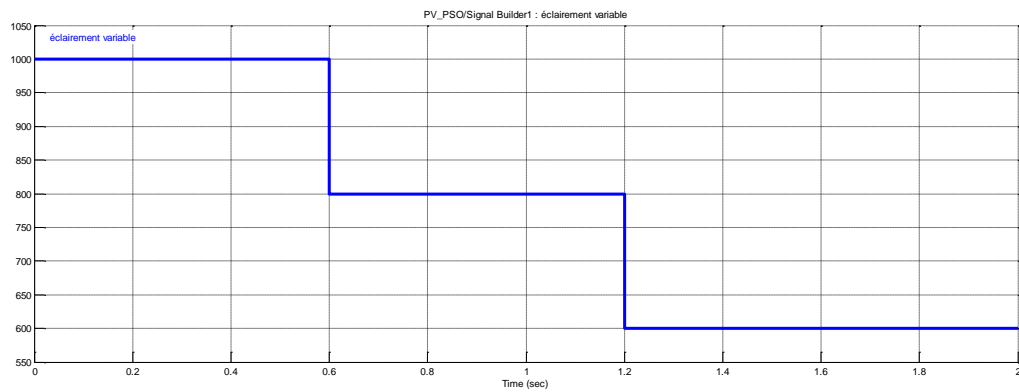


Figure II.41: Courbe d'éclairement variable

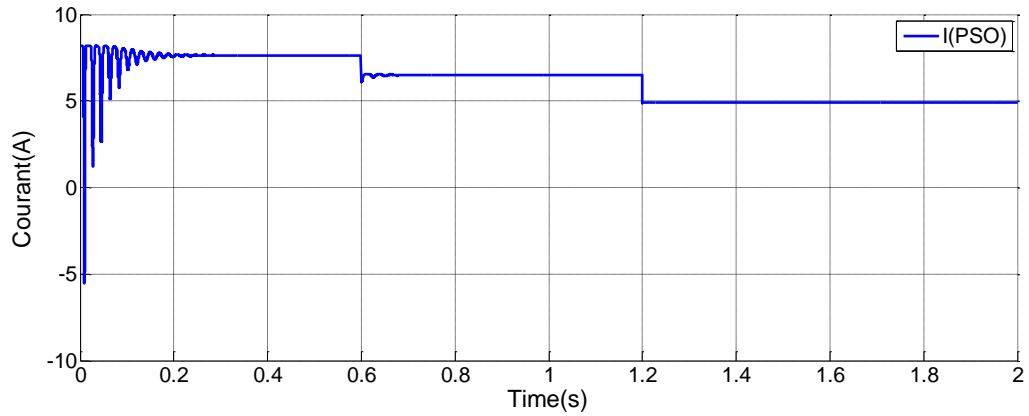


Figure II.42: Graphe de courant d'éclairéement variable

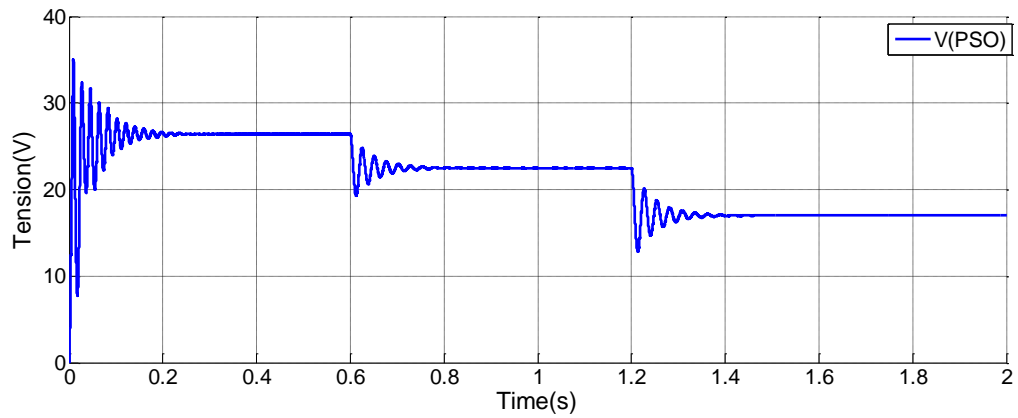


Figure II.43: Graphe de Tension d'éclairéement variable

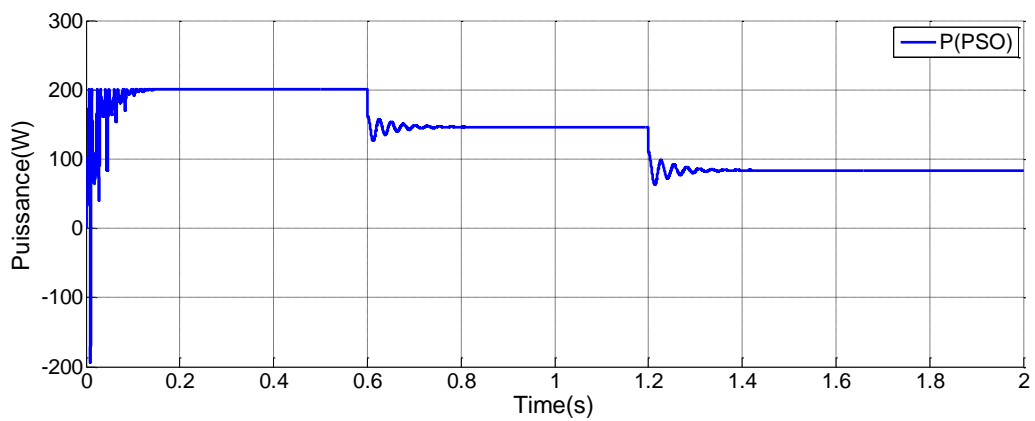


Figure II.44: Graphe de puissance d'éclairéement variable

II.13. Comparaison Inter Deux Méthode P&O Et PSO :

Étant donné que les caractéristiques de sortie du système photovoltaïque (PV) dépendent du rayonnement solaire, de la température ambiante et notamment de l'impédance de charge, sa puissance maximale (MPP) n'est pas constante. Par conséquent, la recherche d'un maximum de suivi power point MPPT est essentielle pour extraire la puissance maximale délivrée par les panneaux photovoltaïques. Il existe dans la littérature plusieurs techniques et algorithmes permettant cette extraction. Parmi eux, la technique P & O conventionnelle pour perturber et perturber et la technique PSO non conventionnelle pour l'optimisation des essais de particules. Dans cet article, une comparaison entre les deux techniques mentionnées ci-dessus a été effectuée en les comparant sur les trois points suivants : vitesse de suivi, précision et performance. Ces algorithmes sont implémentés sur un convertisseur élévateur DC-DC et pour réaliser cette analyse, MATLAB/SIMULINK est utilisé.

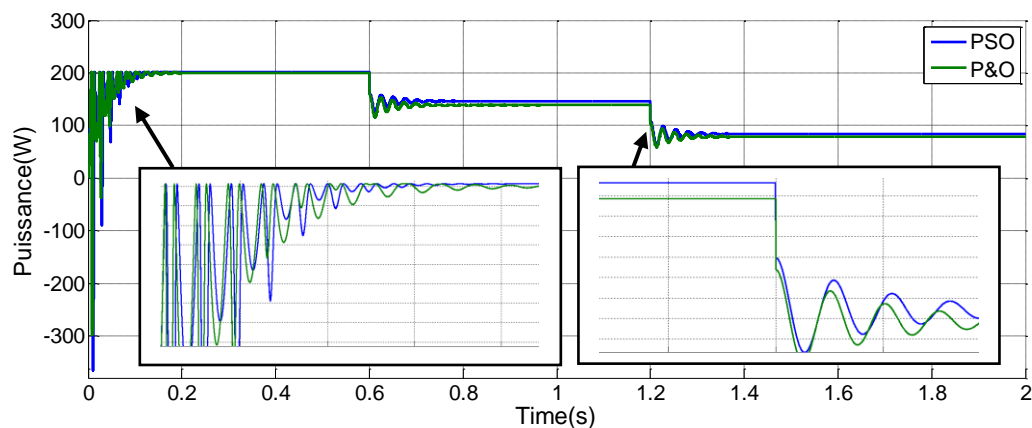


Figure II.45: Graphe de puissance de deux méthode P&O et PSO d'éclairement variable

D'après la Figure II.45 on peut voir que le maximum théorique la valeur de puissance est de 200 W, et elle est de 201.4 W, par le PSO MPPT algorithme de contrôle. De plus, le temps d'optimisation de PSO est court et à une vitesse de convergence très rapide qui prouve la précision du PSO-MPPT proposé. Pendant le suivi L'efficacité de la méthode P&O était la plus faible 199.2 W par rapport à PSO méthode. En raison de son indépendance par rapport au rayonnement solaire niveau. Ainsi, cet algorithme est généralement utilisé à haute et rapide variations d'éclat.

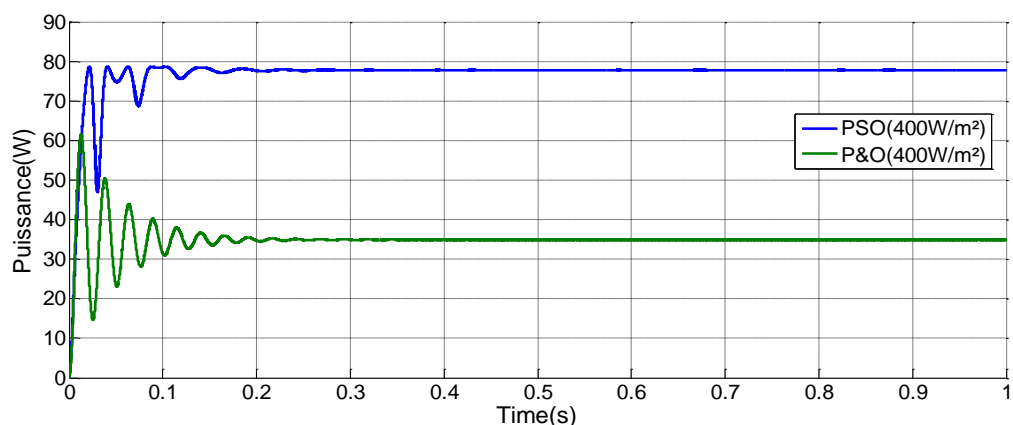


Figure II.46: Graphe de puissance de deux méthode P&O et PSO d'éclairement fixe(400W/m²)

D'après le résultat de autre condition Figure II.46 sous faible ensoleillement rayonnement ($G=400\text{W/m}^2$, $T = 25^\circ\text{C}$), l'efficacité P & O est plus faible que les méthode PSO et il n'a pas été en mesure de converger vers le MPP. À cette époque, et son l'efficacité est supérieure à P & O. Cependant, l'algorithme PSO était la meilleure méthode de contrôle tout au long des résultats de simulation, car elle a été rapidement et avec succès suivi le MPP du module dans les deux conditions.

On fin cette étude nous présentant la simulation du MPPT du système PHOTOVOLTAÏQUE en utilisant les techniques P&O, PSO en termes de leur suivi de l'efficacité, de la vitesse de convergence, des coûts et des performances. Selon les résultats de la simulation, la méthode PSO a pu pour suivre le MPP correctement dans toutes les conditions, et il a avantages par rapport à d'autres techniques telles qu'un suivi très élevé efficacité, structure simple, mise en œuvre facile, et a une vitesse de convergence très rapide vers la solution souhaitée. Cependant, le choix de ses paramètres a quelques impacts sur la optimisation des performances.

II .14. Conclusion

Ce chapitre, présente la modélisation et la simulation de l'ensemble composé de : panneau photovoltaïque, hacheurs (survolteur) et les commandes MPPT par méthode P&O. D'après les résultats obtenus durant la simulation, nous avons pu comparer les deux algorithmes MPPT P&O et PSO. On remarque que la commande PSO permet de suivre le point de puissance maximal plus rapidement que l'algorithme P&O, ainsi qu'il donne des oscillations réduites par rapport à la méthode P&O quand il y un changement d'irradiation. La méthode P&O présente des oscillations plus que l'PSO. On peut dire que la méthode PSO est plus performante que la méthode P&O, mais elle est plus complexe que la méthode de P&O.

CHAPITRE III
IMPLEMENTATION DE LA
COMMANDE MPPT SUR
ARDUINO

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons commencer par la présentation du principe de la commande MPPT (en générale) type P&O ainsi que son implémentation sur le logiciel MATLAB/SIMULINK. Enfin, une étude sur l'implémentation de cette technique sur une carte ARDUINO sera présentée via le logiciel de simulation des microcontrôleurs PROTEUS.

III.2. Les Composantes Utilisées :

III.2.1. Panneau PV 50W :

Dans notre réalisation, nous utilisons un module PV du type photovoltaïque 50W. Ce module PV est en silicium monocristallin et constitué de 36 cellules PV élémentaires.

Il peut délivrer dans les conditions standards de test (CST) une puissance de 50 Wc, un courant de 2.52A sous une tension optimale de 19.8V.

Les caractéristiques électriques de ce module PV sont :

- Puissance maximale (Pmax) : 50Wc.
- Tolérance de puissance : $\pm 3\%$.
- Courant à (Iop) : 2.52 A.
- Tension à (Vop) : 19.8 V.
- Courant en court-circuit (Icc) : 2.77 A.
- Tension en circuit ouvert (Voc) : 23.7 V.

Et la plaque signalétique suivent :

50W Solar Module	
Maximum Power (Pmax)	50 W
Open Circuit Voltage (Voc)	23.7V
Short Circuit Current (Isc)	2.77A
Maximum Power Voltage (Vmp)	19.8V
Maximum Power Current (Imp)	2.52A
Maximum System Voltage	700 VDC
Size	820*370*3MM
No:	201010250
STC:Irradiance 1000W/m ² , Temperature 25°C, AM=1.5	
Made in China	

Figure III-1 : plaque signalétique de Panneau PV 50W



Figure III-2 : Panneau PV 50W

III.2.2. Capteur De Tension :

Pour mesurer la tension aux bornes d'une charge, nous avons utilisé le capteur de tension à effet Hall de type LEM LV 28-P



Figure III-3 : Capteur de tension LV-28-P

Ce capteur de tension pour qu'il puisse fonctionner doit être alimenté en ($\pm 12V$ ou $\pm 15V$). Une résistance R_{in} est placée à l'entrée de ce capteur de telle sorte que sa valeur dépend de la valeur de la tension à mesurer de sorte que le courant circulant dans les enroulements primaires ne dépasse pas les 10 mA. Une autre résistance R_m est placée à la sortie du capteur. Il a pour rôle de fixer la tension de sortie du capteur à la valeur souhaité.[40]

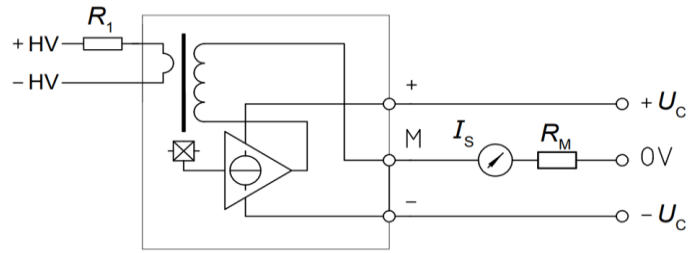


Figure III-4 Schéma de circuit Capteur de tension LV-28-P

III.2.3. Capteur De Courant :

Pour capter le courant, on utilise un capteur a effet hall du type LA25-NP (, le principe de ce capteur est le même que celui du capteur de tension. Le courant à mesurer crée une tension de sortie qui lui est proportionnelle, il ne nécessite pas de résistance pour limiter le courant d’entrée comme le capteur précédent.



Figure III-5 : Capteur de tension LA-25-NP

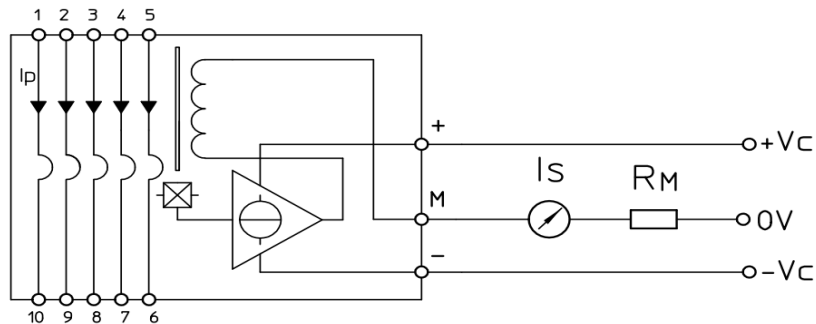


Figure III-6 : Schéma de circuit Capteur de tension LA-25-NP

III.2.4. L’amplificateur TL081 :

Le circuit TL081 est un amplificateur opérationnel qui se présente sous cette forme, Chaque broche est repérée par un numéro et un nom selon le brochage suivant, Les broches 1 et 5 permettent de compenser des tensions de décalage interne.

Ce dernier a une large bande passante et il permet le réglage de la tension d’offset. Le brochage de TL081 est donné par la figure III-7

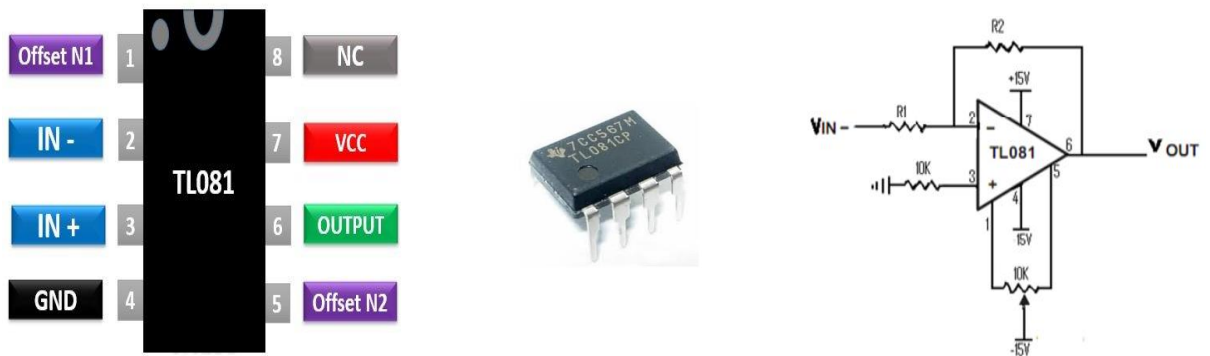


Figure III-7: Amplificateur opérationnel TL 081

III.5.4. Le Convertisseur DC-DC BOOST :

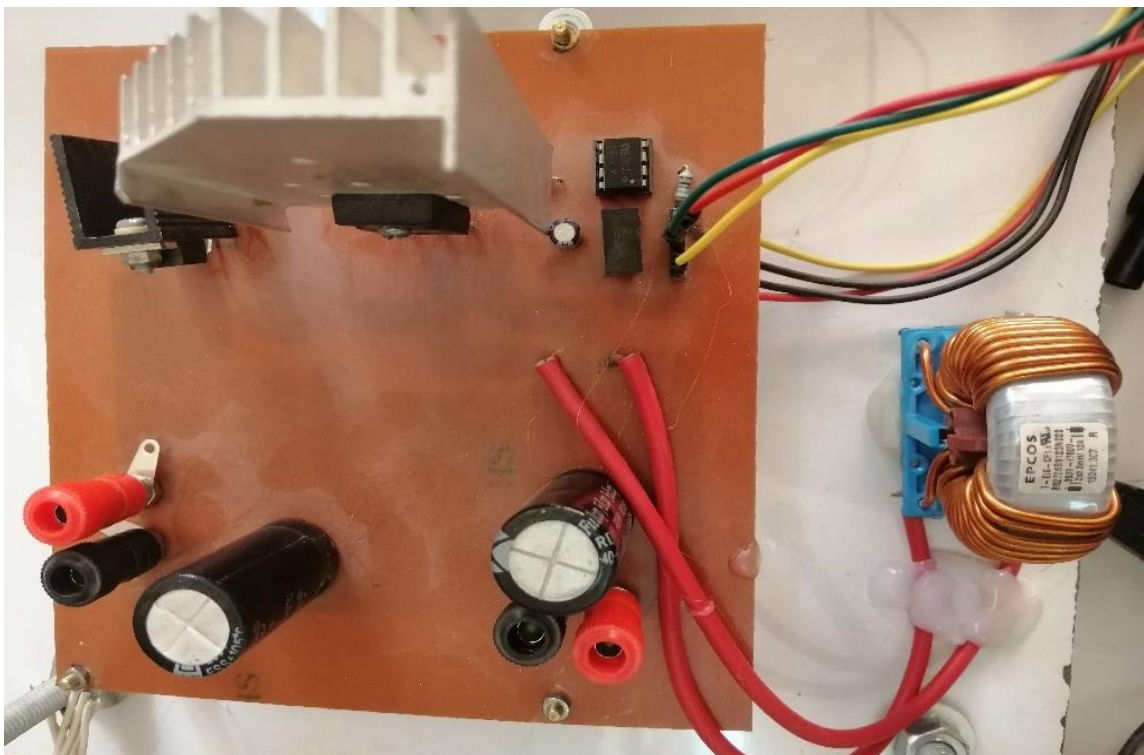


Figure III-8 : schéma de l'hacheur boost

III.6. Les Autres Eléments Réalisent Sur Circuit










	Resistance 22 k ohm 4pcs
	Resistance 47 k ohm 2pcs
	Resistance 1 M ohm 1pcs
	Capacite 1 micro Farad 4pcs
	Capacite 1 nano Farad 2pcs
	Capacite 2 nano Farad 2pcs
	Resistance 100 ohm 2pcs
	Resistance 33k ohm 1W 1pcs
	Charge variable

Figure III-9 : Les autres éléments

III.2. La Carte Arduino

C'est une carte microcontrôleur basée sur l'ATmega328P (fiche technique). Elle dispose de 14 broches d'entrée / sortie numériques (dont 6 peuvent être utilisées comme sorties PWM), 6 entrées analogiques, un résonateur céramique 16 MHz (CSTCE16M0V53- R0), une connexion USB, une prise d'alimentation, un connecteur ICSP et un bouton de réinitialisation. Il contient tout le nécessaire pour prendre en charge le microcontrôleur ; connectez-le simplement à un ordinateur avec un câble USB ou alimentez-le avec un adaptateur AC-DC ou une batterie pour commencer. [41]

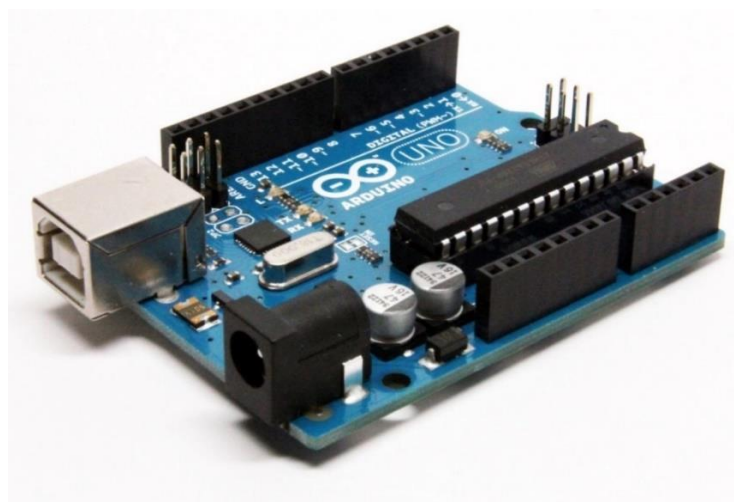


Figure III-10 : La carte Arduino

III.3. Composant La Carte Arduino

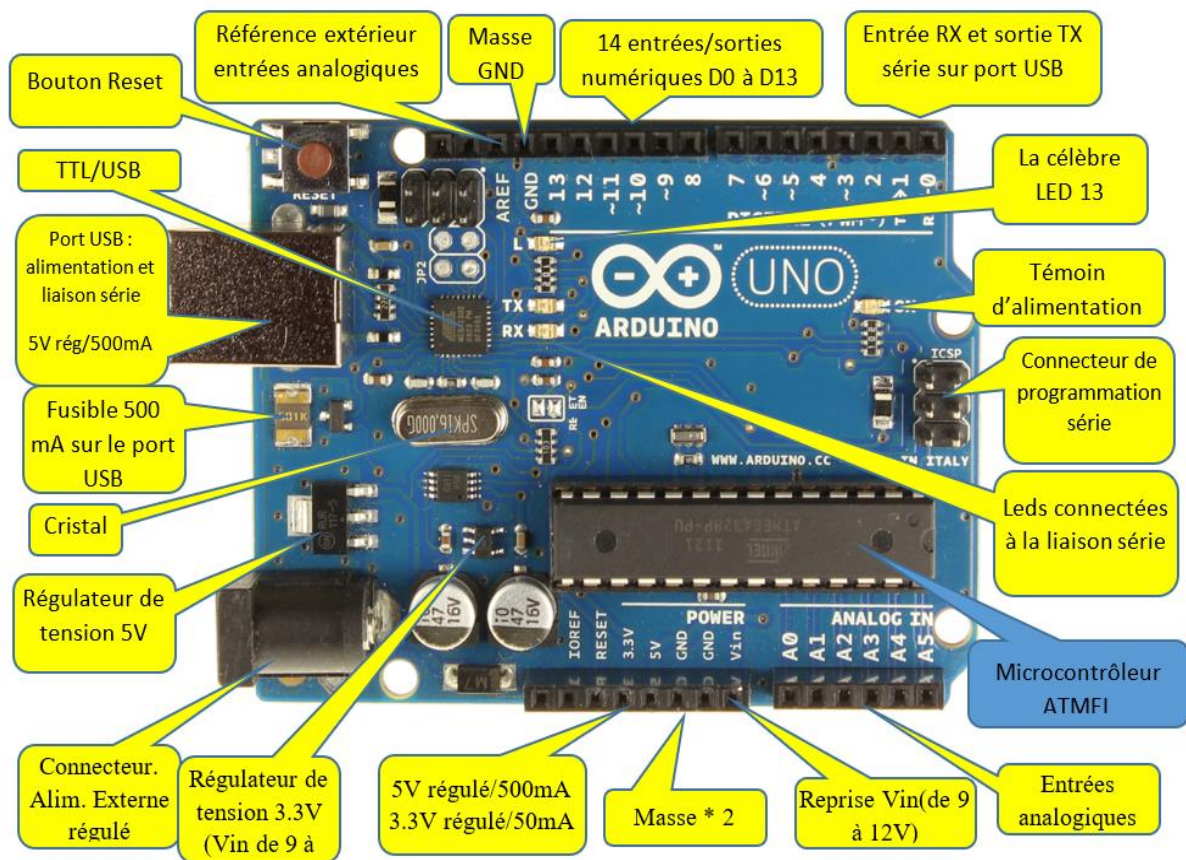


Figure III-11 : Composant la carte Arduino

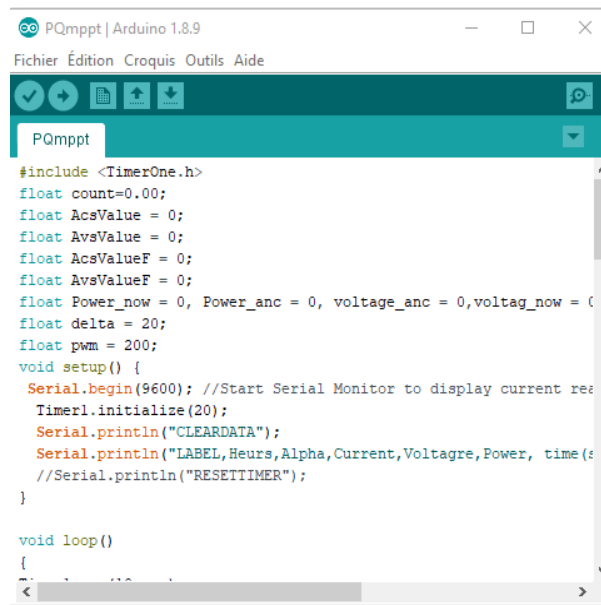
III.4. Implémentation De La Commande MPPT Sur Une Carte Arduino

Après la validation de l'algorithme P&O par MATLAB, nous allons présenter une étude en vue de l'implémentation de cette commande dans une carte Arduino.

Pour bien mener cette étude, nous allons utiliser le logiciel PROTEUS qui permet la simulation précise des montages électroniques contenant des microcontrôleurs (PIC, ARDUINO, etc.).

Pour tester la commande P&O sur PROTEUS, on doit d'abord modéliser le panneau solaire et réaliser le schéma électronique du convertisseur Boost. Enfin, il faut compléter le montage par des capteurs de tension et de courant et l'insertion d'une carte Arduino, qui nécessite l'installation d'une bibliothèque dédiée. L'utilisation d'un afficheur LCD est généralement recommandée pour afficher les grandeurs (courant, tension, puissance, etc.) instantanées.

III.4.1. La Commande P&O Sur Arduino UNO



```
Arduino 1.8.9
Fichier Édition Croquis Outils Aide
PQmppt

#include <TimerOne.h>
float count=0.00;
float AcsValue = 0;
float AvsValue = 0;
float AcsValueF = 0;
float AvsValueF = 0;
float Power_now = 0, Power_anc = 0, voltage_anc = 0, voltage_now = 0;
float delta = 20;
float pwm = 200;
void setup() {
  Serial.begin(9600); //Start Serial Monitor to display current readings
  Timer1.initialize(20);
  Serial.println("CLEARDATA");
  Serial.println("LABEL,Heurs,Alpha,Current,Voltage,Power, time(s)");
  //Serial.println("RESETTIMER");
}

void loop()
{
  //Serial.println("RESETTIMER");
}
```

III.4.2. Pourquoi Arduino UNO

Il y a de nombreuses cartes électroniques qui possèdent des plateformes basées sur des microcontrôleurs disponibles pour l'électronique programmée. Tous ces outils prennent en charge les détails compliqués de la programmation et les intègrent dans une présentation facile à utiliser. De la même façon, le système Arduino simplifie la façon de travailler avec les microcontrôleurs tout en offrant à personnes intéressées plusieurs avantages cités comme suit:

- Le prix (réduits).
- Multi plateforme.
- Un environnement de programmation clair et simple.
- Logiciel Open Source et extensible.
- Matériel Open source et extensible. [42]

III.7. Réalisation Du Circuit Electronique

La figure III.12 représente le système PV réalisé avec ses différents composants qui sont représentés dans le tableau III.9. Ce travail est réalisé dans le Laboratoire N° 20 du Département de Génie électrique de l'Université ECHAHIDE HAMMA LAKHDAR D'ELOUED.

Pour la réalisation de ce système PV, nous avons passé par les étapes suivantes :

III.7.1 Réalisation Un Circuit De Filtrage Sur Porteuse :

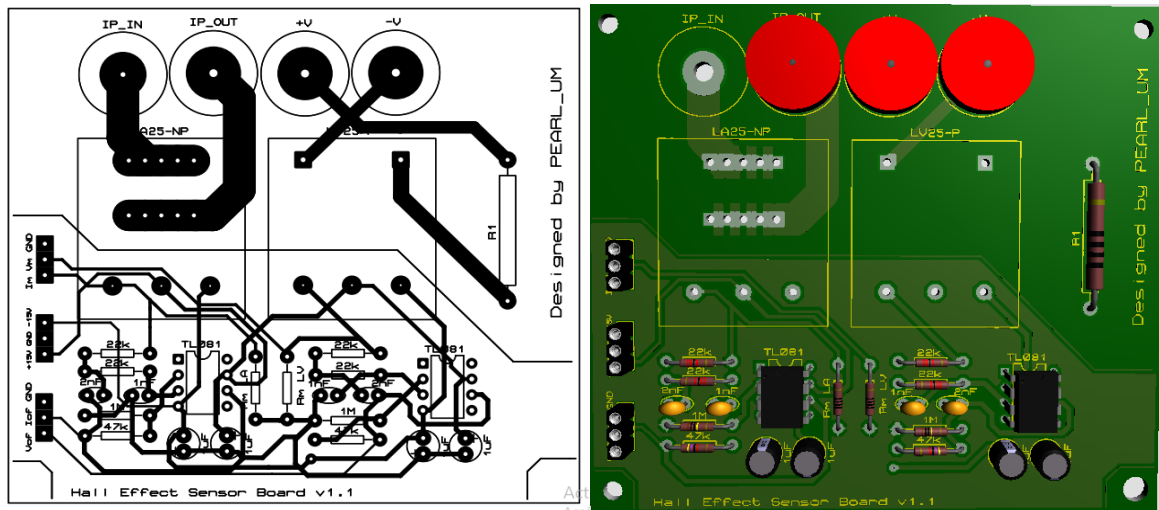
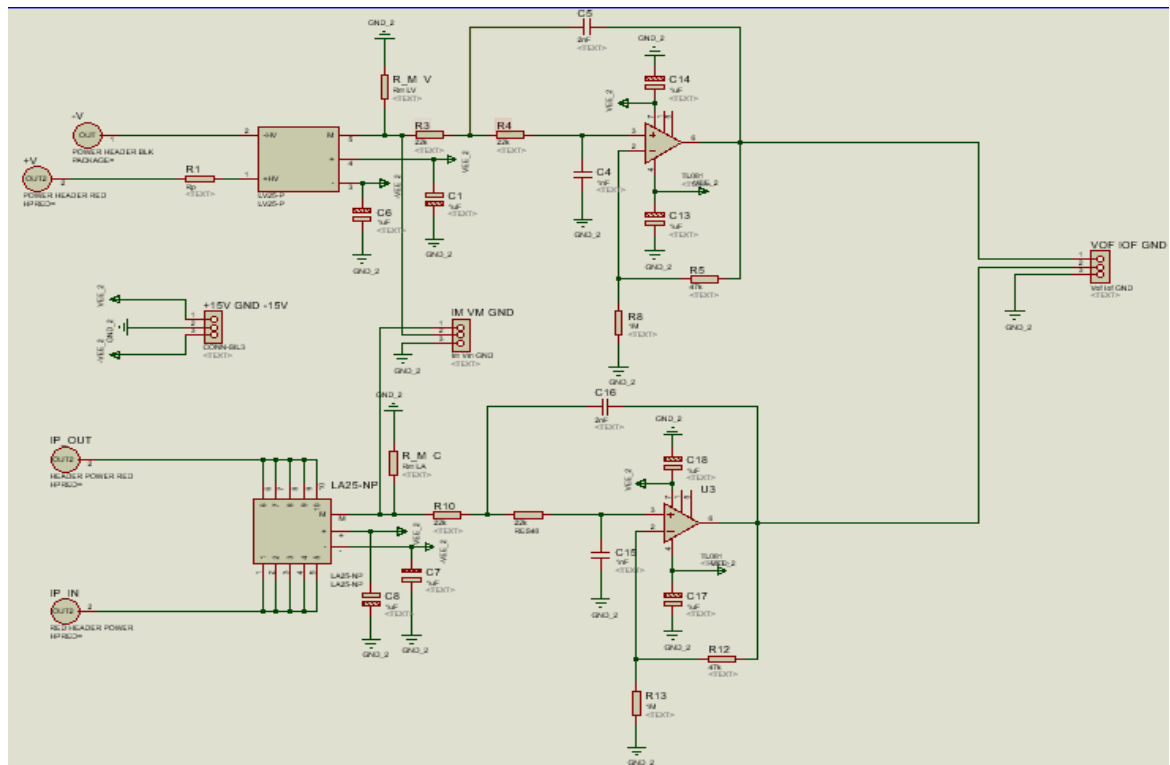


Figure III-12 : Circuit de filtrage sur porteuse

III.7.2. Imprimer Un Circuit De Filtrage Sur Laboratoire

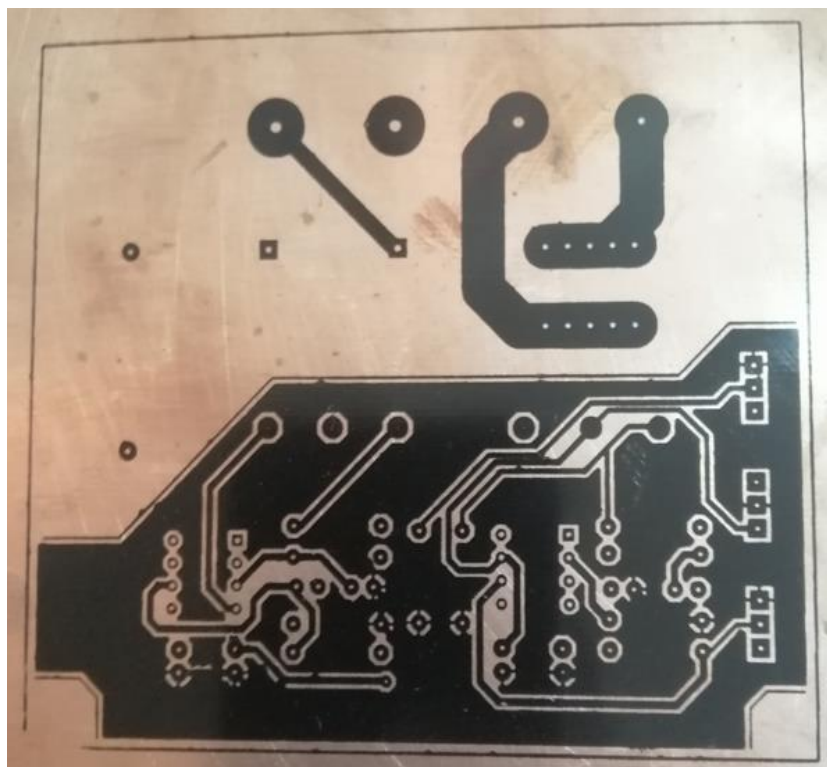


Figure III-13 : circuit de filtrage sur laboratoire

III.7.3. Étape D'acidification :

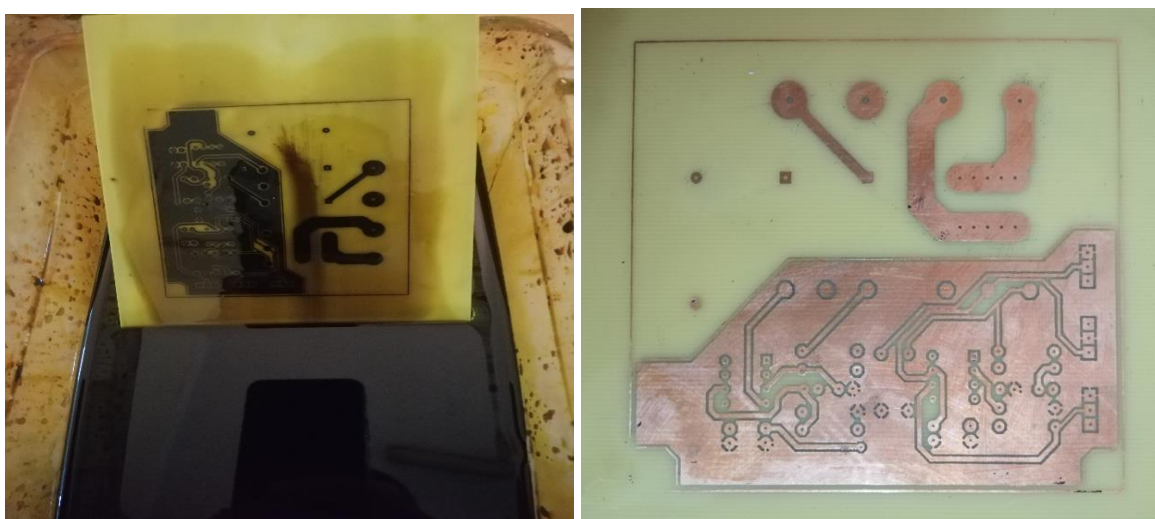


Figure III-14 : circuit de filtrage Pendant la phase d'acidification

III.7.4. Étape De Perçage :

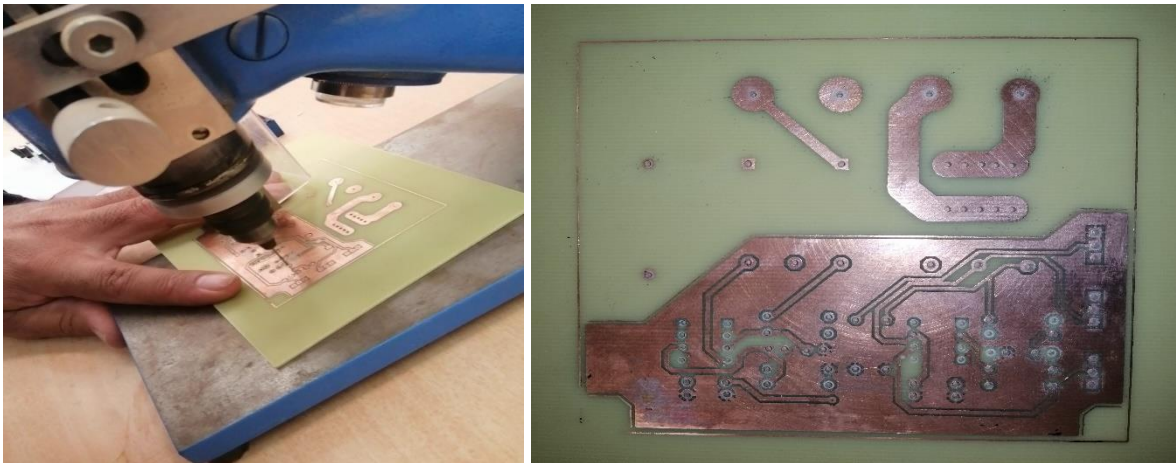


Figure III-15 : circuit de filtrage Pendant la phase de perçage

III.7.5. Soudure Des Composants Electroniques :

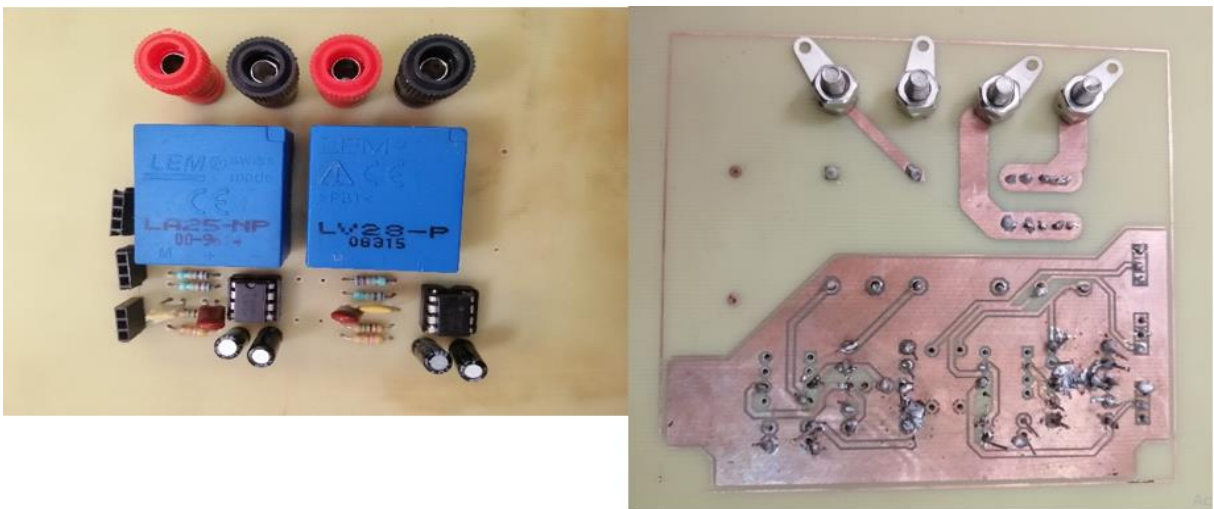


Figure III-16 : circuit de filtrage Pendant la phase de Soudure

III.7.6. Le Résultat De Filtrage :



Figure III-17 : Le résultat de filtrage

III.7.7. Montage Du Système Complet :

La figure (III-18) représente le système complet de la commande MPPT avec l'hacheur boost

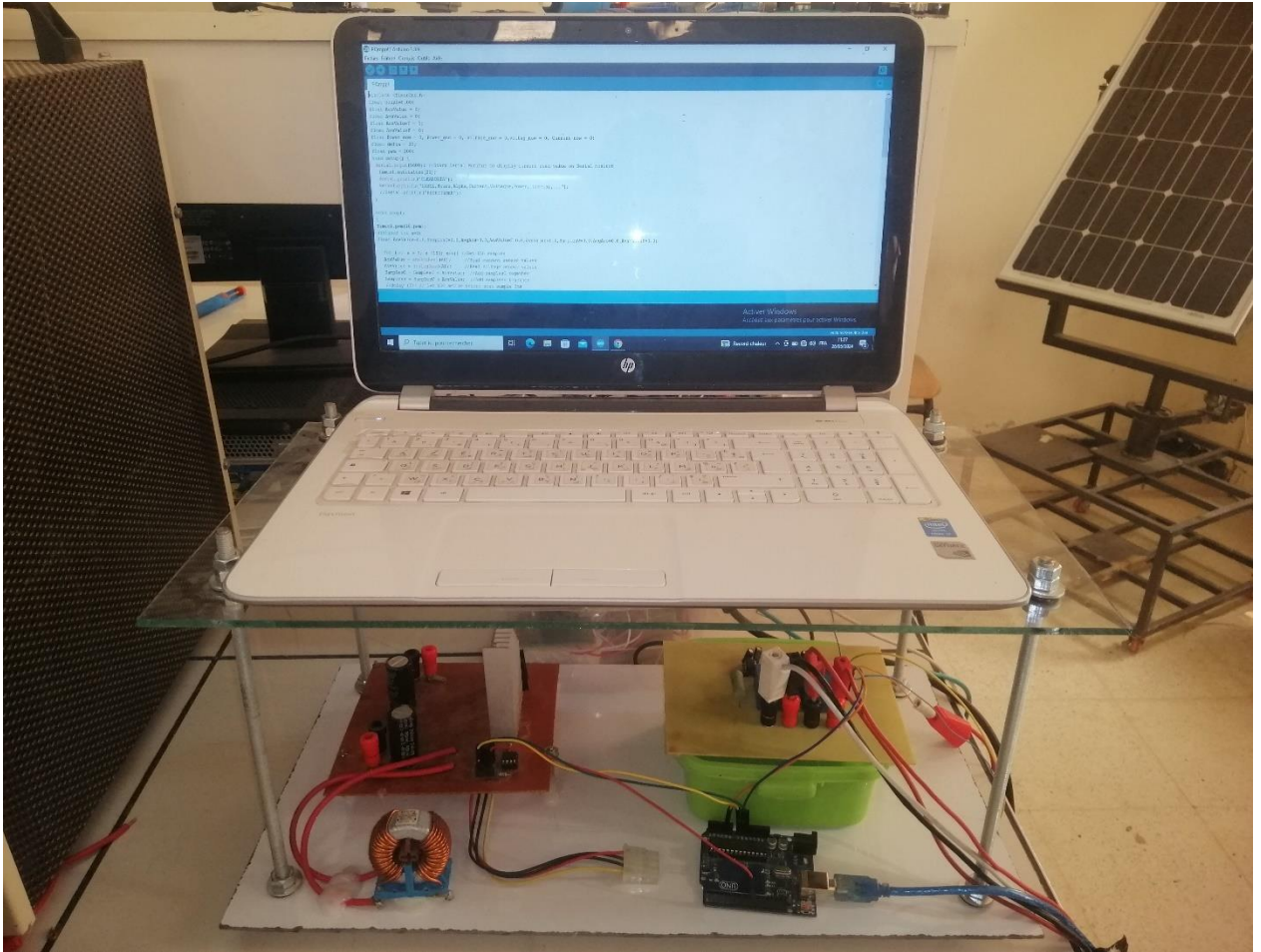


Figure III-18 : circuit de système PV complet

III.8. Résultats Pratique Le Système Complet Et L'MPPT Méthode P&O :

III.8.1. 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-19) à (III-20) à (III-21) à (III-22) pour une charge résistive de 50Ω et avec éclairement fixe, en appliquant l'algorithme P&O. Ces résultats montrent que le système PV fonction.

La puissance 32W parce que l'éclairement n'est pas 1000w/m^2 et $T= 37^\circ\text{C}$

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

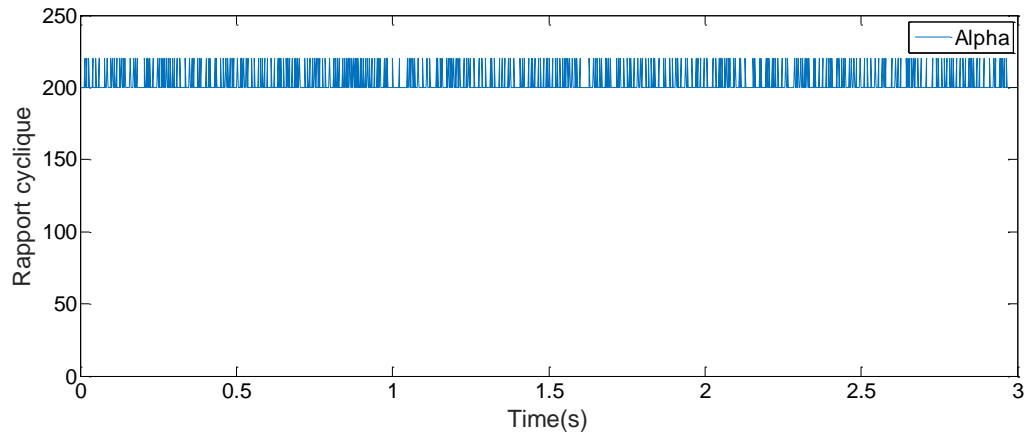


Figure III-19 : Rapport cyclique de l'hacheur

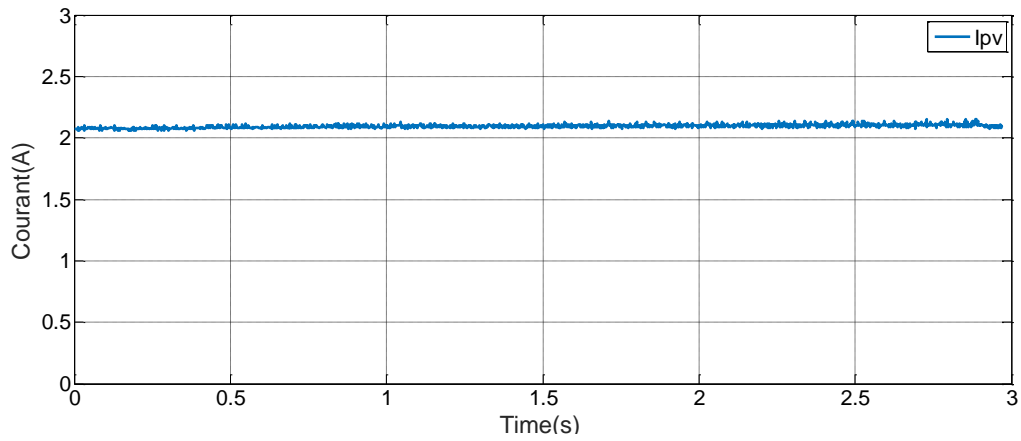


Figure III-20 : Courant de panneau photovoltaïque

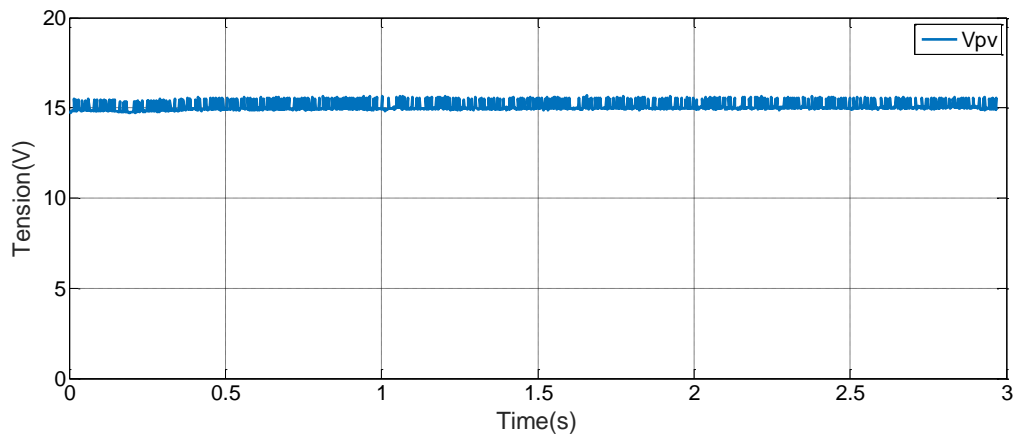


Figure III-21 : Voltage de panneau photovoltaïque

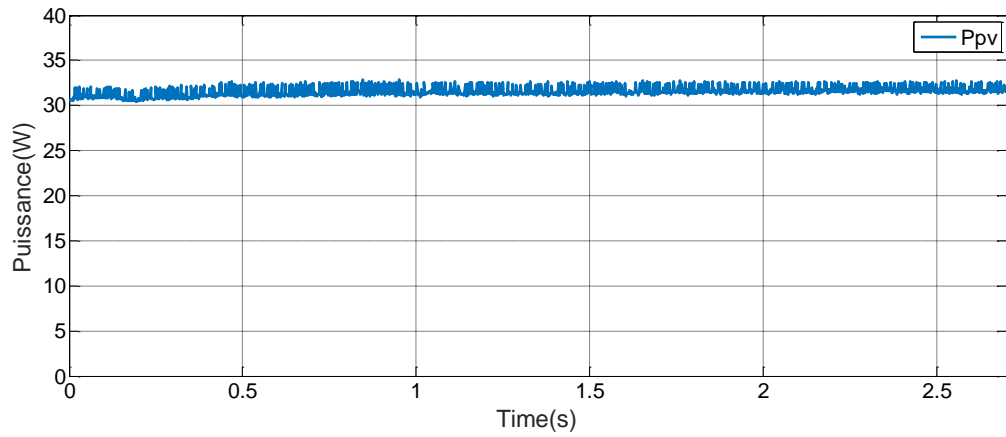


Figure III-22 : puissance de panneau photovoltaïque

III.8.2. Résultats Pratiques Avec Changement D'éclairément :

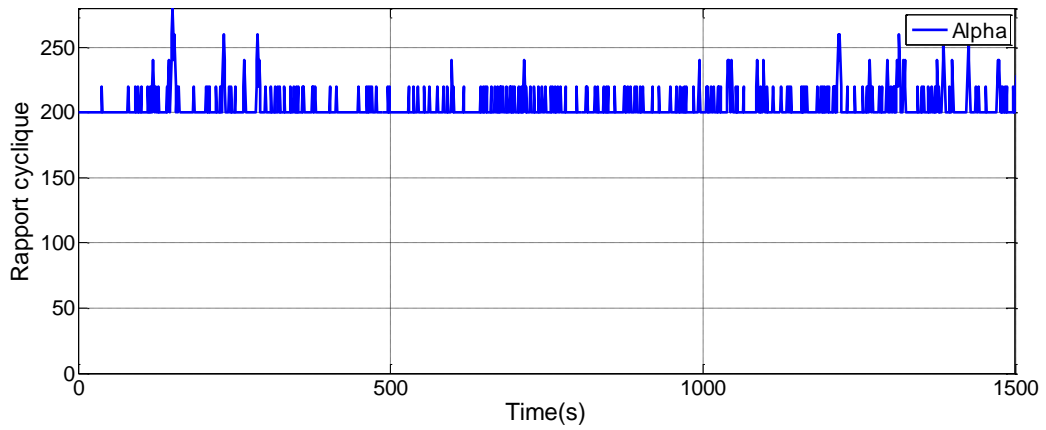


Figure III-23 : Rapport cyclique de l'hacheur

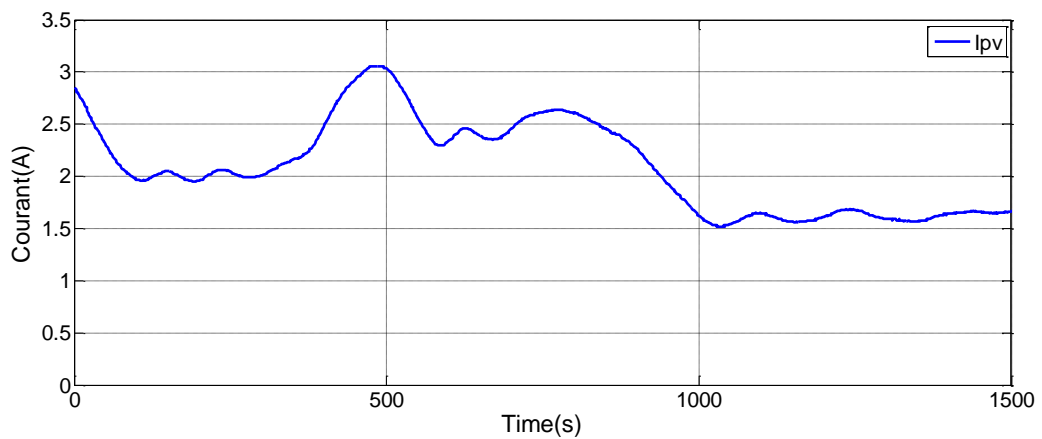


Figure III-24 : Courant de panneau photovoltaïque

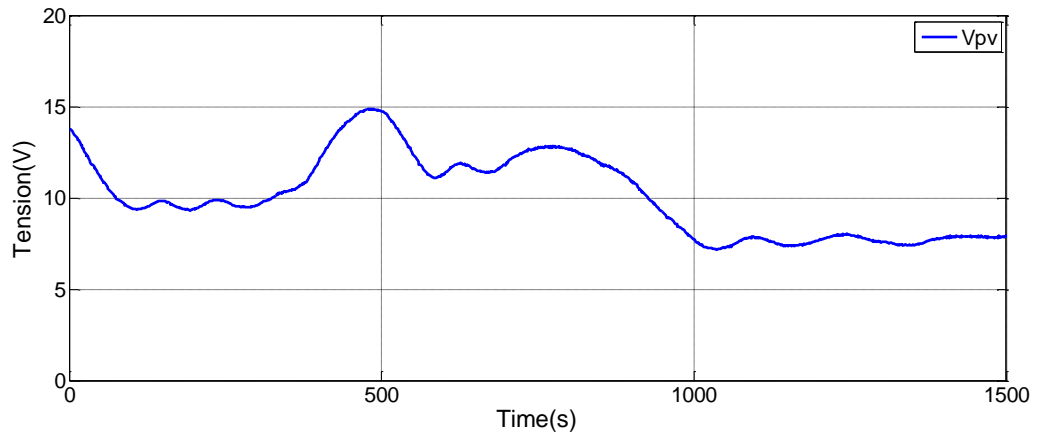


Figure III-25 : Voltage de panneau photovoltaïque

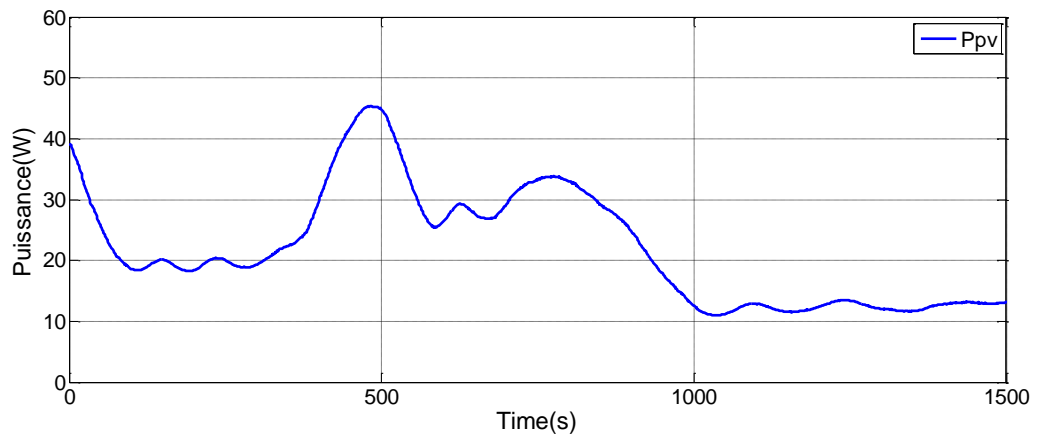


Figure III-26 : puissance de panneau photovoltaïque

III.8. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre la réalisation de l'hacheur BOOST en utilisant la carte Arduino UNO. Ensuite, nous avons cité les différents composants du système, tel que le module 50W, le capteur de courant et le capteur de tension. Enfin, nous avons fait des tests pratiques sur le système PV par la méthode 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 GENERALE

Le travail qu'on a présenté porte sur l'analyse d'une modélisation et simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque (PV) adapté par une commande numérique (commande MPPT) assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

Dans un premier temps, on a donné des généralités sur les systèmes PV, principe de l'effet PV, cellule PV. Ainsi le générateur photovoltaïque et leurs performances. Et la simulation de générateur PV et nous avons vu que l'influence de température et l'éclairement sur les caractéristiques (I-V), (P-V), et nous concluons que les performances du générateur se dégradent avec l'augmentation de la température, la diminution de l'intensité d'éclairement.

On a étudié, dans un deuxième temps, quelques types convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Comme l'hacheur dévolteur, l'hacheur survolteur et l'hacheur mixte (dévolteur-survolteur). Et nous avons vu la simulation d'un convertisseur survolteur (Boost) et remarqué que la tension de sortie supérieure à la tension d'entrée.

Finalement on a réalisé un système PV poursuite du point maximal de puissance délivrée par le panneau photovoltaïque et leur structure puis on a utilisé un programme MPPT a méthode P&O pour système photovoltaïque (Panneau PV 50W, Convertisseur (Boost), Charge (résistance 50 Ω)) à l'aide d'une carte Arduino, les résultats obtenus montrent que l'utilisation de la commande MPPT permet d'améliorer d'une manière considérable le rendement des installations photovoltaïques.

Et nous obtenons les résultats de simulation des méthodes utilisé P&O et PSO Et nous avons conclu que la méthode PSO est meilleure que la méthode P&O. En ce qui concerne les résultats de la partie pratique, nous obtenons des résultats moyens comparés aux résultats de simulation pour la méthode P&O.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] <https://www.ef4.be/fr/pv/composants-dun-systeme/systemes-photovoltaïques.html>
- [2] : K .Kassmi, M .Hamdaoui et F .Olivié, «Conception et modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique» Université Mohamed Premier, Faculté des Sciences, Département de physique, LEPAS, Oujda, Maroc. Revue des energies renouvelables, 451-462, 2007
- [3] : 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
- [4] .(2010)<http://www.solarserver.de/gclid=CJWA1ruS-K4CFS4NtAodSzY7xw>.
- [5] M.Krimi , le gisement solaire (présentation sur power point), Institue de formation en électricité et gaz (IFFEG) ,13 mai Blida, Algérie.
- [6] Yves Roulet-Ingénieur Environnement « différentes utilisations de l'énergie solaire et integration des capteurs solaires » département des infrastructures service des bâtiments, monuments et archéologie, mai 2005
- [7] Olivier Delbard « dictionnaire de l'environnement et du développement durable » univers poche, 2011
- [8] : S .ABADA, « Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur sepic» Mémoire maitre es Scianges, Université laval, Quebec Canada 2011.
- [9] : J .Royer, T. Djiako, E. Schiler et B. Sadasy, «Le pompage photovoltaïque» université d'ottawa ,1998.
- [10] Anne Labouret, Michel Villon, « Energie solaire PV », 3eme Edition Dunod ,2007
- [11] Dossier Thematique « effet photovoltaïque et fonctionnement des installations solaires isolées » energies solidaires courrier es n°03 – janvier 2000
- [12]M. HARAOUIBA, «étude et simulation d'un générateur de panneau,» FACULTE DE SCIENCE DE L'INGENIORT, ANNABA, 2019
- [13]a. aida, «Caractérisation des cellules photovoltaïques à,» FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT DE PHYSIQUE, TELEMENEN, 2018
- [14]A. T. R. AILI, «Modélisation et simulation sous MATALAB/SIMULINK d'un système photovoltaïque adapté par une commande mppt,» TIZIOUZOU, TIZIOUZOU, 2014
- [15]H. KAMELIA, «Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque :,» FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE , TIZIOUZOU, 2012
- [16]A. T. R. AILI, «Modélisation et simulation sous MATALAB/SIMULINK d'un système photovoltaïque adapté par une commande mppt,» TIZIOUZOU, TIZIOUZOU, 2014
- [17]M. HARAOUIBA, «étude et simulation d'un générateur de panneau,» FACULTE DE SCIENCE DE L'INGENIORT, ANNABA, 2019

- [18]G. F. E. S. AMEL, «commode de panneau solaire à l'aide d'un carte à pic,» BISKRA, 2010.
- [19]A. M. E. H. OMAR, «Etude comparative entre différents modèles électriques photovoltaïques,» UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI OUM EL BOIAGHI, OUM EL BOUGHI, 2012.
- [20]Z. SORIA et M. CHEYMAA, «Etude et Simulation d'un Générateur Photovoltaïque Muni d'un Convertisseur MPPT pour une Meilleur Gestion Energétique», UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF -MSILA, MSILA, 2017
- [21]B. HANANE, «Principe de fonctionnement et mesure des caractéristiques d'une cellule photovoltaïque,» UNIVERSITE DR MOULAY TAHAR DE SAIDA, SAIDA, 2016
- [22] : BOUALEM, DENDIB, "Technique conventionnelles et avancée de poursuite MPPT pour des applications photovoltaïque : étude comparative.", Université Ferhat Abbas-Sétif Mémoire de Magister, Département d'électronique, 2007
- [23] Meddah M., Bourahla M., Bouchetata N., ‘‘ Synthèse des convertisseurs statiques dc/ac pour les systèmes photovoltaïques. Revue des Energies Renouvelables, 2011.
- [24] Abada S., ‘‘ Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur Sepic ‘’. Mémoire de grade de Maître des Sciences (M. Se.), Université Laval Québec, 2011.
- [25] F. Slama ‘‘ Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique’’Mémoire de Magister UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF-
- [26] T. Fogelman, « Système photovoltaïque pour les pays en déventement », manuel d'installation et d'utilisation, Agence Française pour la Maîtrise de l'énergie, (AFME), 1982.
- [27] C .Bernard, J .Chauvin, D .Lebrun, J. F. Muraz, P. Stassi, « Station solaire autonome pour l'alimentation des antennes de l'expérience de radio détection à l'observatoire Pierre Auger » 2006.
- [28] A. Guen, « Contribution à l'étude des systèmes de télécommunications mobiles » Thèse de Magister, Université de Tlemcen, Février 1992
- [29] Haroubia mohammed, étude simulation d'un panneau photovoltaïque, université d'Annaba, année2019, Algérie.
- [30] B. Abdelkader’’ Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur Triphasé par l'Approche Bond Graph ’’Mémoire de Magister UNIVERSITE FERHAT ABBAS DE SETIF 02/12/2009.
- [31] F. Slama ‘‘ Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique’’Mémoire de Magister UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF-01/04/2011.
- [32] : D. Boukhers, « optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage », Magister en électronique, Université de Constantine, 2007.

- [33] : H. Abbes, H. Abid, K. Loukil, « Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque », Revue des Energies renouvelables vol.17 N: 3 (2014) 435-445, Tunisia.
- [34] G. Obeidi, « Commande des hacheurs MPPT par la logique floue », Mémoire de Magister, École Nationale Polytechnique, Alger 2006.
- [35] B. Abdelkader” Modélisation et Diagnostic d’un Onduleur Triphasé par l’Approche Bond Graph ”Mémoire de Magister UNIVERSITE FERHAT ABBAS DE SETIF 02/12/2009.
- [36] H. Rezzouk, « Simulation et implémentation d’algorithmes de recherche du point de maximum de puissance pour un système PV sur un circuit FPGA », Mémoire de Magister, Université de Jijel 2010.
- [37] V. Boitier, P. Maussion, C. CABAL, “Recherche du maximum de puissance sur les générateurs photovoltaïques”, université de Toulouse, revue 3E.I, N°54, pp 90-96, septembre 2008
- [38] E. Bas, E. Egrioglu, and E. Kolemen, “Training simple recurrent deep artificial neural network for forecasting using particle swarm optimization,” Granular Computing, vol. 7, no. 2, pp. 411–420, 2022, doi: 10.1007/s41066-021-00274-2.
- [39] N. Setyawan, E. A. Hakim, and Z. Zulfatman, “SIGNATURE PSO: MODIFIED PARTICLE SWARM OPTIMIZATION DENGAN FUZZY SIGNATURE DAN IMPLEMENTASI PADA OPTIMALISASI KENDALI LQR,” MULTITEK INDONESIA, vol. 13, no. 2, p. 29, Jan. 2020, doi: 10.24269/mtkind.v13i2.2227
- [40] Datasheet «LV 25-P »LEM, 2014
- [41] Tech.Support@microsim.com
- [42] X.HINAULT. www.mon-club-elec.fr. Consulté le 25 mai 2023.
- [43]: S.Aminata, «*Simulation du système hybrides Photovoltaïque* » Thèse de Doctorat, canada, 1998

ANNEXE

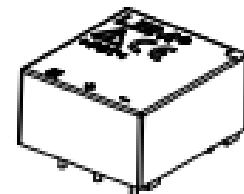
Voltage Transducer LV 25-P

For the electronic measurement of voltages: DC, AC, pulsed..., with galvanic separation between the primary circuit and the secondary circuit.



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

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



Electrical data

I_{PN}	Primary nominal RMS current	10	mA			
I_{PM}	Primary current, measuring range	0 ... ±14	mA			
R_{in}	Measuring resistance	with ±12 V	⊕ ±10 mA _{max}	$R_{in, min}$ 30	$R_{in, max}$ 190	Ω
			⊕ ±14 mA _{max}	30	100	Ω
		with ±15 V	⊕ ±10 mA _{max}	100	350	Ω
			⊕ ±14 mA _{max}	100	190	Ω
I_{SN}	Secondary nominal RMS current	25	mA			
N_p/N_s	Turns ratio	2500 : 1000				
U_c	Supply voltage (±5 %)	±12 ... 15	V			
I_c	Current consumption	10 (@ ±15 V) + I_{SN}	mA			

Accuracy - Dynamic performance data

ϵ_{tot}	Total error @ $I_{PM}, T_A = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	⊕ ±12 ... 15 V	±0.9	%	
		⊕ ±15 V (±5 %)	±0.8	%	
ϵ_L	Linearity error		< 0.2	%	
I_{0}	Offset current @ $I_P = 0, T_A = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	Typ	±0.15	mA	
		Max	±0.15	mA	
$I_{0,T}$	Temperature variation of I_0	0 °C ... +25 °C	±0.06	±0.25	mA
		+25 °C ... +70 °C	±0.10	±0.35	mA
t_{D90}	Delay time ¹⁾ to 90 % of the final output value for U_{PN}	step 40		µs	

General data

T_A	Ambient operating temperature	0 ... +70	°C
$T_{A, st}$	Ambient storage temperature	-25 ... +85	°C
R_p	Resistance of primary (winding) @ $T_A = 70 \text{ }^\circ\text{C}$	250	Ω
R_s	Resistance of secondary winding @ $T_A = 70 \text{ }^\circ\text{C}$	110	Ω
m	Mass	22	g
	Standards	EN 50178: 1997 UL 508: 2010	

Note: ¹⁾ $t_D = 25 \text{ k}\Omega$ (L/R constant, produced by the resistance and inductance of the primary circuit).

Features

- Closed loop (compensated) voltage transducer using the Hall effect
- Insulating 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_i , 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.

Application domain

- Industrial.

Current Transducer LA 25-NP

For the electronic measurement of currents: DC, AC, pulsed..., with galvanic isolation between the primary circuit and the secondary circuit.

I_{PN} = 5-6-8-12-25 A



Electrical data

I_{PN}	Primary nominal current rms	25	A
I_{PM}	Primary current, measuring range	0 .. ± 36	A
R_Ω	Measuring resistance @ with ± 15 V	T_A = 70°C	
		R_{Ω min}	R_{Ω max}
		T_A = 85°C	R_{Ω max}
	@ ± 25 A _{rms}	100	320
	@ ± 36 A _{rms}	100	190
		100	185
I_{SM}	Secondary nominal current rms	25	mA
K_N	Conversion ratio	1-3-3-4-5 : 1000	
V_C	Supply voltage (± 5 %)	± 15	V
I_C	Current consumption	10 + I _A	mA

Accuracy - Dynamic performance data

X	Accuracy @ I _{PM} , T _A = 25°C	± 0.5	%	
ε_L	Linearity error	< 0.2	%	
I₀	Offset current ¹⁾ @ I _P = 0, T _A = 25°C	Typ	Max	
I_{0M}	Magnetic offset current ²⁾ @ I _P = 0 and specified R _Ω after an overload of 3 × I _{PM}	± 0.05	± 0.15	
I_{CT}	Temperature variation of I ₀	0°C .. + 25°C	± 0.06	± 0.25
		+ 25°C .. + 70°C	± 0.10	± 0.35
		- 25°C .. + 85°C		± 0.5
		- 40°C .. + 85°C		± 1.2
t_r	Response time ³⁾ to 90 % of I _{SM} step	< 1	µs	
d/dt	d/dt accurately followed	> 50	A/µs	
BW	Frequency bandwidth (-1 dB)	DC .. 150	kHz	

General data

T_A	Ambient operating temperature	-40 .. + 85	°C
T_S	Ambient storage temperature	-45 .. + 90	°C
R_P	Primary coil resistance per turn @ T _A = 25°C	< 1.25	mΩ
R_S	Secondary coil resistance @ T _A = 70°C	110	Ω
		@ T _A = 85°C	115
R_{IS}	Isolation resistance @ 500 V, T _A = 25°C	> 1500	MΩ
m	Mass	22	g
	Standards	EN 50178: 1997	

Notes: ¹⁾ Measurement carried out after 15 min functioning

²⁾ The result of the coercive field of the magnetic circuit

³⁾ With a d/dt of 100 A/µs.

Features

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

Advantages

- Excellent accuracy
- Very good linearity
- Low temperature drift
- Optimized response time
- Wide frequency bandwidth
- No insertion losses
- High immunity to external interference
- Current overload capability.

Applications

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

Application domain

- Industrial.