



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



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

Mémoire de Fin d'Étude
En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Électrotechnique

Spécialité Machines électriques

Thème

***Commande d'un MPPT avec convertisseur
DC/DC pour système photovoltaïques***

Réalisé par :

 **DJAFER BENALI**
 **AYMAN BEKAKRA**

Encadré par :

Dr. LAMMOUCHI ZAKRIA

Année Universitaire 2022/2023

Résumé

L'énergie solaire photovoltaïque est considérée parmi les énergies renouvelables les plus exploitées dans le monde, En raison des caractéristiques électriques non linéaires des cellules PV et de leurs associations, le rendement des systèmes PV peut être amélioré par des solutions à base des techniques MPPT. Notre travail présenté porte sur l'analyse d'une étude et simulation d'un système PV adapté par une commande MPPT avec la méthode de perturbation et observation (P&O) qui assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le module PV à l'aide de l'outil Matlab/ Simulink, en même temps nous avons réalisé un système PV (GPV, convertisseur DC/DC (Boost), MPPT(P&O),charge) et testé avec l'Arduino pour générer un signal PWM.

Mots Clés : Générateur photovoltaïque PV, MPPT, Méthode de perturbation et observation (P&O) , hacheur Boost, Carte Arduino, Commande MLI.

abstract

Solar PV is among the most exploited renewable energies in the world, due to the nonlinear electrical properties of PV cells and their correlations, the efficiency of PV systems can be improved through solutions based on MPPT technologies. Our work is related to the analysis of the study and simulation of a PV system adapted by an MPPT control with the perturbation and control (P&O) method that ensures the continuation of the maximum power provided by the PV module when using Matlab / Simulink, at the same time we made a PV system (GPV converter, DC / DC (Boost), P,MPPT(&O), Payload) and we tested with Arduino to generate PWM signal.

Keywords: PV power generator, MPPT, perturbation and control (P&O) method, boost chopper, Arduino board, PWM command

المخلص

تعتبر الطاقة الشمسية الكهروضوئية من بين الطاقات المتجددة الأكثر استغلالاً في العالم ، نظراً للخصائص الكهربائية غير الخطية للخلايا الكهروضوئية وارتباطاتها ، يمكن تحسين كفاءة الأنظمة الكهروضوئية من خلال الحلول القائمة على تقنيات MPPT. يتعلق عملنا بتحليل دراسة ومحاكاة نظام PV تم تكييفه بواسطة عنصر تحكم MPPT مع طريقة الاضطراب والمراقبة (O&P) التي تضمن استمرار الطاقة القصوى التي توفرها الوحدة الكهروضوئية عند استخدام Matlab / Simulink ، في نفس الوقت قمنا بصنع نظام PV (محول GPV ، DC / DC (Boost) ، MPPT(O&P) ، حمل) واختبرنا مع Arduino لتوليد إشارة PWM.

الكلمات الرئيسية: مولد الطاقة الكهروضوئية الكهروضوئية ، MPPT ، طريقة الاضطراب والمراقبة (O & P) ، المروحية التعزيزية ، لوحة Arduino ، أمر PWM.

Remerciement

Avant tout nous tenons nos remerciements à notre dieu tout puissant de nous avoir donné la force et le

A la suite Nous tenons à remercier ·courage

vivement Dr. LAMMOUCHI ZAKRIA Pour sa

sincérité et son dévouement à nous soutenir et à

réaliser notre projet , par ses informations leurs

conseils et leurs encouragements· Nous voudrions aussi

exprimer nos remerciements aux membres de jury

·d'avoir fait l'honneur d'accepter le jury de ce travail

Que tous les enseignants de département

d'Electronique...Merci

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes parents

Tous mes frères

Mes collègues

Benali.D

Je dédie ce modeste travail à :

Mes parents

A tous ceux qui m'ont soutenu

même avec un mot

Bekakra.A

Table des matières

Introduction générale	1
<i>Chapitre 1: Généralités sur les systèmes photovoltaïques</i>	
1.1. Introduction	4
1.2. Historique du photovoltaïque	4
1.3. L'énergie solaire	5
1.3.1. Unités utilisées	5
1.4. L'effet photovoltaïque	5
1.5. Principe de fonctionnement d'une cellule	6
1.5.1. Les matériaux semi-conducteurs	6
1.6. Module photovoltaïque	7
1.6.1. Constitution d'un module de photovoltaïque	7
1.6.2. Association en série et en parallèle d'une module PV	8
1.6.2.1. Association en série	8
1.6.2.2. Association en parallèle	9
1.6.3. Protection d'un module PV	9
1.7. Orientation des panneaux solaires	10
1.7.1. Choix de l'orientation des modules	10
1.7.2. Choix de l'inclinaison des modules	11
1.8. Système photovoltaïque autonome	11
1.8.1. Le générateur photovoltaïque	11
1.8.2. Stockage d'énergie	12
1.8.3. Régulateur	12
1.9. Utilisation de l'énergie photovoltaïque	13
1.10. Avantages et inconvénients de l'énergie PV	13

1.10.1. Avantages	13
1.10.2. Inconvénients	14
1.11. Conclusion	14

Chapitre 2: Modelisation la chaine de conversion photovoltaïque

2.1. Introduction	16
2.2. Convertisseur Buck-Boost	16
2.3. Convertisseur Boost	17
2.4. Recherche du point de puissance maximale (MPPT)	20
2.4.1. Principe	20
2.4.2. Méthode Perturbe & Observe (P&O)	21
2.5. Caractérisation et simulation de caractérisation du module PV	24
2.6. Simulation d'un système photovoltaïque avec hacheur Boost	25
2.6.1. Les résultats de la simulation d'un PV- Buck-Boost	28
2.7. Avantages du convertisseur BOOST :	31
2.8. Conclusion	32

Chapitre 3 :Réalisation d'un convertisseur DC-DC et résultats expérimentaux

3.1. Introduction	35
3.2. Matériel utilisé	35
3.2.1. Le microcontrôleur	35
3.2.1.1. Définition	35
3.2.1.2 Les avantages de la carte	35
3.2.1.3. Caractéristique de la carte	36
3.2.2. L'interface de logiciel	36
3.2.3. Le panneau solaire	37
3.2.4 Composantes du hacheur Boost (L et C)	37
3.2.5. Capteur de tension	39

3.2.6. Capteur de courant	39
3.2.7. Régulateurs de tension	40
3.2.8. Driver de MOSFET	40
3.3. Réalisation d'un convertisseur Boost	40
3.3.1. Réalisation du circuit imprimé	41
3.3.2. Réalisation d'un convertisseur Boost avec commande MPPT	42
3.3.2.1. Implantation du système de commande dans l'Arduino	42
3.3.2.2. Résultats expérimentaux du montage	43
3.4. Conclusion	45
Conclusion générale	47

Liste des figures

Chapitre 1: Généralités sur les systèmes photovoltaïques

Figure 1.1. Parcours des électrons dans le photovoltaïque.	6
Figure 1.2. Cristal de silicium	7
Figure 1.3 Composition d'un module solaire photovoltaïque.	8
Figure 1.4. Caractéristique résultante d'un groupement de ns cellules en série.	9
Figure 1.5. Caractéristique résultante d'un groupement de np cellules en parallèle	9
Figure 1.6. Câblage série / parallèle de modules photovoltaïques avec leurs diodes de protection.	10
Figure 1.7 Représentation d'un module photovoltaïque incliné à 35°.	11
Figure 1.8. Système photovoltaïque autonome.	12
Figure 1.9. Une application des systèmes photovoltaïques.	13

Chapitre 2: Modelisation la chaine de conversion photovoltaïque

Figure 2.1. Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Buck-Boost	17
Figure 2.2. Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Boost	18
Figure 2.3. Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est fermé	18
Figure 2.4 Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est ouvert	19
Figure 2.5. Chaine de conversion photovoltaïque avec convertisseur statique contrôlé par une commande MPPT	21
Figure 2.6. Schéma de converge vers le PPM par P&O	22
Figure 2.7. Algorithme de la méthode P&O.	23
Figure 2.8. Caractéristiques courant-tension et courant-tension du GPV dans les Conditions standards	25

Figure 2.9. Caractéristiques courant- puissance et courant-puissance du GPV dans les Conditions standards	25
Figure2.10 schéma bloc de connexion d'un générateur photovoltaïque / hacheur Boost avec MPPT.	26
Figure 2.11. Schéma bloc de l'algorithme MPPT.	27
Figure 2.12. Résultat de simulation des puissances de panneau par divers éclairement (1000/600 W/m ²)	27
Figure 2.13 Résultat de simulation des tensions à la borne de panneau par divers éclairement	28
Figure 2.14 Résultat de simulation des tensions à la borne de la charge par divers éclairement	28
Figure2.15 schéma bloc de la simulation d'un système PV/ Buk-Boost avec MPPT	29
Figure 2.16 Résultat de simulation des puissances à la borne de panneau et à la borne de la charge par divers éclairement (1000/600 W/m ²) avec MPPT	30
Figure 2.17Résultat de simulation des tensions à la borne de panneau et à la borne de la charge par divers éclairement avec MPPT	30
Figure 2.18. Résultat de simulation des courants à la borne de panneau et à la borne de la charge par divers éclairement avec MPPT	31
Figure2.19 Evolution du gain en tension en fonction du rapport cyclique des convertisseurs	32

Chapitre 3 :Réalisation d'un convertisseur DC-DC et résultats expérimentaux

Figure 3.1. La carte Arduino UNO.	35
Figure 3.2. L'interface de l'IDE Arduino	37
Figure 3.3..Le panneau solaire utilisé.	37

Figure 3.4. Convertisseur Boost	39
Figure 3.5. Capteur de tension.	39
Figure 3.6. Capteur de courant ACS712s.	39
Figure 3.7. Régulateur de tension.	40
Figure 3.8. Driver IR2110.	40
Figure 3.9. Les étapes de réalisation d'un circuit imprimé	41
Figure 3.10. schéma synoptique d'un commande MPPT	42
Figure 3.11. Montage du système complet.	43
Figure 3.12rapport cyclique variable suivant le niveau de l'éclairement	43
Figure 3.13 Résultat de simulation de la puissance PV	44
Figure 3.14 Résultat de simulation de la tension à la borne de panneau	44
Figure 3.15 Résultat de simulation du courant PV	44

Liste des tables

Chapitre 2: Modelisation la chaine de conversion photovoltaïque

Tableau 2.1. Caractéristique électrique du module	24
---	----

Liste des abréviations

Alternating current	AC
Air masse	AM
Conversion continu/alternative	DC/AC
Conversion continu/continu	DC/DC
Générateurs photovoltaïques	GPV
Incrémentation de conductance	IncCond
Modulation de largeurs d'impulsions	MLI
Point de puissance maximale	PPM
Direct current	DC
Maximum Power Point Tracking	MPPT
Perturbation et observation	P&O
Point de fonctionnement	PF
Régulateur proportionnel integral	PI
Photovoltaïque	PV
Courant-tension	I-V
Puissance-tension	P-V
Courant du GPV	I
Courant maximale dans l'inductance	I_{max}
Courant minimale dans l'inductance	I_{min}
Inductance,	L
condensateur d'entrée, condensateur de sortie	C_1, C_2
L'ondulation de la tension de sortie	ΔV_s
L'ondulation du courant dans l'inductance	Δi_L

La fréquence de découpage	f
Nombre de branches en parallèle	N_p
Nombre de cellules en série	n_s
Nombre de modules en série	N_s
Opérateur gradient	Δ
Période de découpage	T_d
Puissance transmise à la charge	P_{ch}
Rapport cyclique du convertisseur	α
Température de jonction des cellules	T
Temps	t
Tension de cellule PV	V_{pv}
Tension circuit ouvert de la cellule	$oc\ v$
Tension du GPV	V_{pv}
Tensions d'entrée et de sortie du convertisseur	V_e, V_s

Introduction générale

Introduction générale

La consommation mondiale d'électricité observée durant ces dernières décennies est fortement liée au développement de l'industrie, du transport et des moyens de communications. De nos jours, une grande partie de la production électrique est produite à partir de ressources non renouvelables comme le charbon, le gaz naturel, le pétrole et l'uranium. Leur vitesse de régénération est extrêmement lente à l'échelle humaine. Ce qui entrainera à plus ou moins courte échéance un risque non nul d'épuisement de ces ressources.

La pollution de l'air, les changements climatiques, les risques du nucléaire, les limites des réserves des énergies traditionnelles (uranium, pétrole, charbon et gaz naturel) qui sont épuisables et leurs répartitions non équitables sur le globe terrestre, l'augmentation des peuples du monde et l'accroissance des besoins énergétiques ont fait prendre conscience qu'un recours à d'autres moyens de production d'énergies respectueux de la planète où nous vivons, s'impose.

La solution est de recourir aux énergies renouvelables (solaire, marine, éolienne,...etc.) qui offrent la possibilité de produire de l'électricité satisfaisante aux exigences écologiques, Le photovoltaïque (PV) fait partie de ces énergies.

Un générateur photovoltaïque délivre une tension et un courant proportionnels aux changements de la température et de l'éclairement solaire, la puissance qui en résulte en est elle aussi dépendante [1]. Il faut aussi savoir qu'à chaque variation de ces paramètres, il existe un point où la puissance délivrée par le PV est maximale, il faut donc traquer en permanence ce point, quand l'éclairement change, afin de tirer le maximum de puissance du PV.

Afin d'exploiter au mieux cette énergie, il est nécessaire d'utiliser des convertisseurs électriques qui permettent, en premier lieu, de convertir la tension continue que génère le PV en une tension compatible aux différentes charges de notre vie quotidienne, et surtout de permettre la commande par des techniques de recherche de point de puissance maximal appelé « Maximum power point tracking » (MPPT).

Plusieurs travaux ont abordé le problème de la recherche du point de fonctionnement permettant de tirer le maximum d'énergie des modules PV en utilisant différentes méthodes MPPT. Cependant, le non linéarité de la caractéristique des modules PV, leurs dépendances

de la température, de l'ensoleillement et le niveau de dégradation de la caractéristique rendent l'implémentation de ces méthodes très complexe.

L'objectif de notre travail est de pouvoir étudier et réaliser une meilleure conception d'un convertisseur Boost et sa commande en MPPT implémentée sur une carte Arduino afin de pouvoir tirer le maximum de puissance d'un système photovoltaïque. Ensuite une étude sur les avantages de l'intégration d'un pont d'adaptation d'impédance dans un système autonome sera présentée à travers une série de tests de simulation sur MATLAB

Dans le premier chapitre, après avoir présenté la définition de l'effet PV permettant la production d'électricité à partir d'un rayon lumineux frappant une pastille de silicium, des caractéristiques de la cellule PV ont été tracées pour différents paramètres internes et externes influant sur la conversion d'énergie PV. Également, des généralités sur les générateurs photovoltaïques (GPV), tels que la constitution, protection et installation, ont été données. De plus, les différentes chaînes de production d'électricité PV sont présentées.

Le second chapitre traite la problématique d'optimisation énergétique d'un système PV. Il débute par la connexion directe d'un GPV avec la charge. Cette configuration ne garantit pas un transfert optimal de l'énergie. Pour remédier à cet inconvénient, un étage d'adaptation d'impédance est nécessaire. Par la suite, une analyse de fonctionnement de plusieurs convertisseurs DC/DC non isolés (Boost, Buck-Boost) jouant le rôle d'adaptateurs est fait. On termine le chapitre par les techniques MPPT usuelles, qui permettent d'extraire le maximum d'énergie des modules PV. Ensuite Nous allons utiliser le logiciel MATLAB pour étudier dans un premier temps le comportement d'un module PV, ainsi que l'influence de l'éclairement sur l'énergie produite et l'application des différents types des convertisseurs statiques qu'on peut utiliser dans le système photovoltaïque avec la commande MPPT.

Dans le troisième chapitre, nous tenterons de rassembler les éléments de la plateforme expérimentale pour pouvoir valider les simulations avec des tests expérimentaux.

En conclusion générale, on présente une synthèse des travaux réalisés ainsi que les principaux résultats obtenus.

*Chapitre **1**:*

Généralités sur les systèmes photovoltaïques

1.1. Introduction

La chaîne de conversion PV ou système PV est un ensemble d'éléments qui sert à la production d'électricité à partir du rayonnement solaire. Un GPV alimente une charge continue ou alternative via une interface d'électronique de puissance. Il est capable de fournir une puissance allant d'un milliwatt à quelques mégawatts. Le composant de base de ce système s'appelle : cellule PV ou photopile. Il produit de l'énergie électrique à chaque fois qu'il reçoit de l'éclairement. Il faut remarquer que la photopile n'est pas une pile car elle ne stocke pas d'énergie ni sous forme chimique ni sous une autre forme. Par contre, elle constitue un convertisseur instantané de la lumière vers l'électricité.

Dans ce chapitre, on présente globalement le fonctionnement du GPV, le principe de la conversion PV. On décrira une modélisation mathématique afin de tracer les caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) de la cellule PV en montrant l'influence des conditions météorologiques (éclairement et température).

1.2. Historique du photovoltaïque

- 1839 : Antoine Becquerel publie un mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires relatif à une expérience menée par son fils Edmond avec une pile constituée par des électrodes de platine et de cuivre oxydé plongeant dans une solution électrolytique acide. Cette pile est capable de fournir un courant.
- 1877 : W. G. Adams et R. E. Day découvrent l'effet photovoltaïque du sélénium, et C. Fritts met au point le premier panneau photovoltaïque à base de cellules au sélénium.
- 1905 : Albert Einstein publie un article sur l'effet photoélectrique, ce pour quoi il obtient un prix Nobel en 1921.
- 1954 : D. M. Chapin, C. S. Fuller et G. L. Pearson, deux ingénieurs annoncent la mise au point d'une cellule dont le rendement de conversion énergétique atteint 6 %, marquant ainsi véritablement la naissance de l'électricité photovoltaïque.
- 1959 : les États-Unis mettent en orbite Vanguard, le premier satellite alimenté par des cellules photovoltaïques.
- Années 1970 : les crises pétrolières renforcent l'intérêt et les crédits accordés à l'énergie photovoltaïque.
- 1978 : le premier mégawatt crête installé est atteint dès 1978.

- De 2010 à 2016 : la puissance installée du parc photovoltaïque mondial a été multipliée par 6 entre fin 2010 (50 GW) et fin 2016 (305 GW) [1].

1.3. L'énergie solaire

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire en utilisant une cellule photovoltaïque.

Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis 40 ans. Les applications ont commencé avec le programme spatial pour la transmission radio des satellites. Elles se sont poursuivies avec les balises en mer et l'équipement de sites isolés dans tous les pays du monde, en utilisant les batteries pour stocker l'énergie électrique pendant les heures sans soleil [2].

1.3.1. Unités utilisées

- L'éclairement ou irradiance est défini comme une puissance reçue par une surface. Il s'exprime en W/m^2 (watt par mètre carré). Le S.I. (système international d'unités) recommande d'utiliser le symbole E .
- L'irradiation ou rayonnement est l'énergie reçue par une surface. Elle s'exprime en $J m^{-2}$ (joule par mètre carré). L'ISES (International Solar Energy Society) recommande le symbole H . D'autres unités plus courantes sont le Wh/m^2 (wattheure par mètre carré) bien que ce dernier ne doive pas être utilisé puisque n'appartenant pas au système international d'unités (SI) [2].

1.4. L'effet photovoltaïque

Le mot « photovoltaïque » vient de grec « photos » qui signifie lumière et de « volta » du nom du physicien italien.

On trouve le phénomène physique de l'effet photovoltaïque dans les cellules solaires, et permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en énergie électrique. Les rayons solaires se composent des photons « grains de lumière », ces photons ayant une énergie qui dépend de la longueur d'onde (entre 0.4 et 1.1 μm pour le spectre visible). Après la collision de la lumière avec les atomes du cristal, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes. Chaque atome fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse un trou qui se traduit par une charge positive, engendrant aussi une paire électron-trou. Au

sein du matériau, un champ électrique permanent assure l'empêchement de la recombinaison de l'électron avec son atome d'origine.

Ce champ peut être généré de plusieurs manières : soit par la jonction de deux semiconducteurs de nature et de type différents (hétérojonctions), soit par la barrière de potentiel entre un métal et un semi-conducteur ou par les concentrations des électrons libres qui sont différentes (homojonction ou jonction p-n) au niveau de l'interface de zones d'un même semi-conducteur.

Une tension électrique est générée entre les deux zones N et P et peut varier entre 0.3V et 0.7V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition et du vieillissement du dispositif.

Ce dispositif devient un générateur électrique sous l'effet de la lumière, pour la liaison avec un circuit extérieur, on utilise des électrodes collectrices ou grilles sur chaque face (avant et arrière).

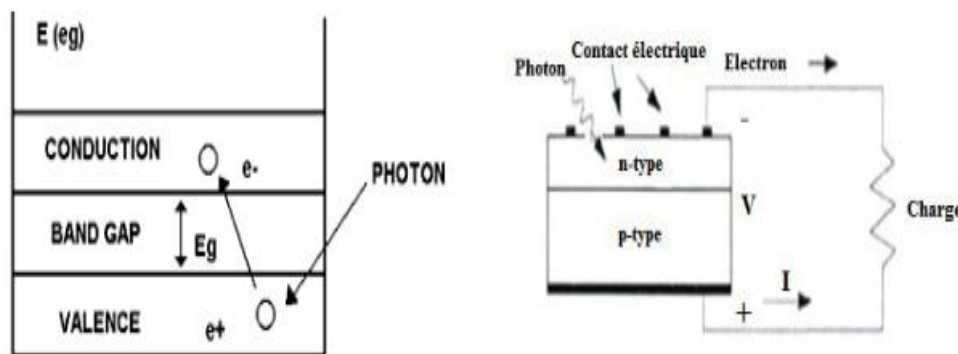


Figure 1.1. Parcours des électrons dans le photovoltaïque.

1.5. Principe de fonctionnement d'une cellule

1.5.1. Les matériaux semi-conducteurs

Les matériaux semi-conducteurs sont des corps dont la résistivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants.

Les quatre électrons de valence du silicium permettent de former quatre liaisons covalentes avec un atome voisin.

Dans ce cas, tous les électrons sont utilisés et aucun n'est disponible pour créer un courant électrique [3].

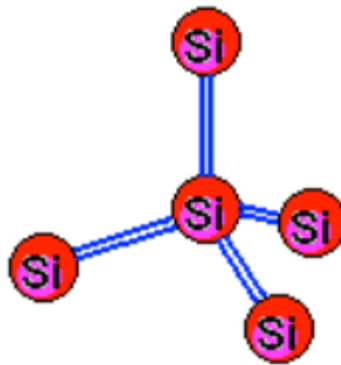


Figure 1.2. Cristal de silicium.

a) Les semi-conducteurs intrinsèques

Les électrons situés sur la couche la plus éloignée du noyau, qui participent aux liaisons covalentes peuvent, sous l'effet de l'agitation thermique, devenir porteur de charge.

Le diagramme énergétique est constitué de deux bandes (conduction et valence) séparées par une bande interdite. Pour franchir cette bande l'électron doit acquérir de l'énergie (thermique, photon, ...). Mais le nombre d'électrons libres dans un semiconducteur intrinsèque reste très faible. Ici le nombre de trous et d'électrons est le même .

b) Les semi-conducteurs extrinsèques

Pour augmenter la conductivité des semi-conducteurs on y introduit des impuretés. Ce procédé est appelé dopage[3].

1.6. Module photovoltaïque

1.6.1. Constitution d'un module de photovoltaïque

Un module solaire photovoltaïque est composé généralement de six éléments (figure I.9) [4]:

- Cadre en aluminium(1).
- Joint pour fixer le module(2).
- Verre : pour la protection du module(3).
- Couche de l'EVA (EVA: éthylène-acétate de vinyle) (4) : pour résister aux

intempéries et à l'humidité.

- Cellules photovoltaïques(5).
- Feuille de Tedlar blanc(6) : pour plus de résistance mécanique des grands modules.

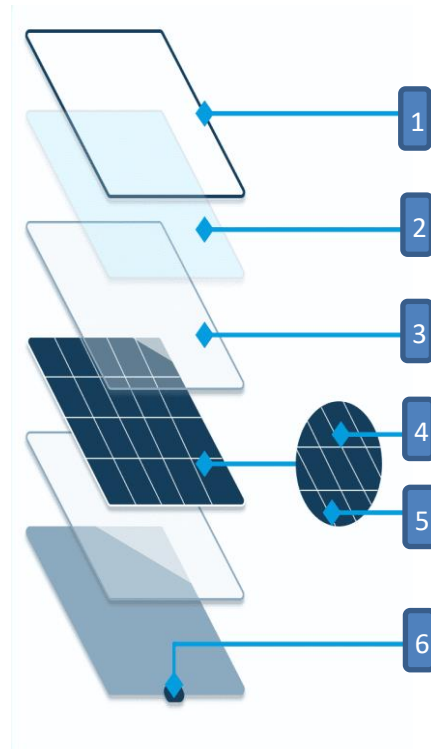


Figure 1.3 : Composition d'un module solaire photovoltaïque.

1.6.2. Association en série et en parallèle d'une module PV

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle pour construire le champ photovoltaïque afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation. Toutefois, il importe de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dus à de l'ombrage, de la poussière,...etc.) peuvent endommager les cellules de façon permanente [5].

1.6.2.1. Association en série

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série.

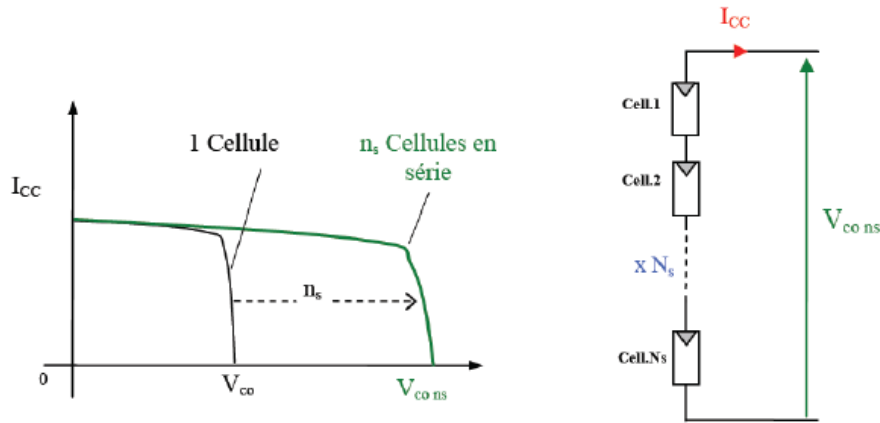


Figure 1.4. Caractéristique résultante d'un groupement de n_s cellules en série.

1.6.2.2. Association en parallèle

En additionnant des modules ou cellules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche.

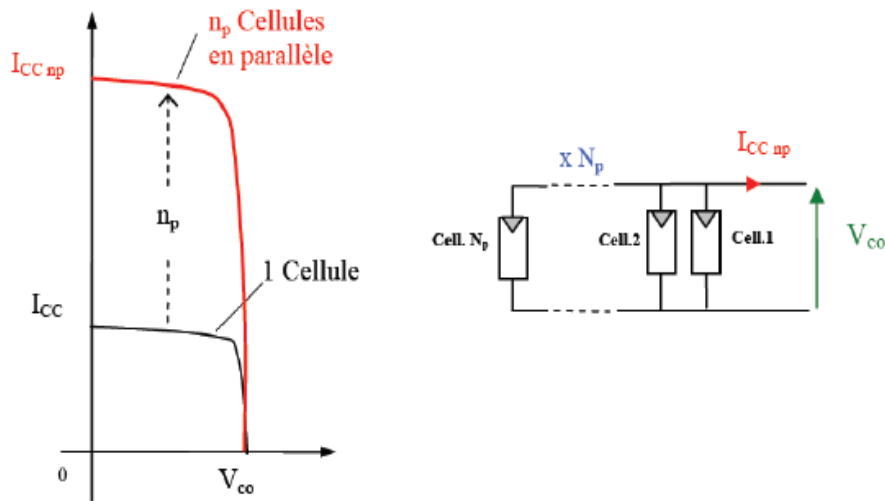


Figure 1.5. Caractéristique résultante d'un groupement de n_p cellules en parallèle.

1.6.3. Protection d'un module PV

Dans certaines conditions d'éclairement non uniforme et de fonctionnement proche du court-circuit, une cellule du groupement série peut même être soumise à la tension des (n_s-1) autres cellules appliquée en inverse et ainsi fonctionner en récepteur en dissipant une puissance importante qui peut la détruire si la contrainte thermique est trop forte ou si la

tension d'avalanche est dépassée. Pour éviter cela, il faut disposer une diode D_p connectée en parallèle, appelée "diode by-pass", aux bornes d'un groupement élémentaire de 30 à 40 cellules au silicium au maximum. L'amorçage spontané de cette diode parallèle, dès l'apparition d'une tension en inverse aux bornes du groupement limite cette dernière à la valeur V_d de la tension directe de conduction de la diode choisie et la puissance dissipée à $V_d.I_s$. Des modules commercialisés incluent maintenant ces diodes parallèles de protection contre les tensions inverses. De façon duale, une diode anti-retour D_r doit protéger des voies en parallèle des courants inverses [2].

Finalement la Figure 10 montre le câblage typique d'un réseau de cellules ou de modules photovoltaïques munis de ces diodes protections.

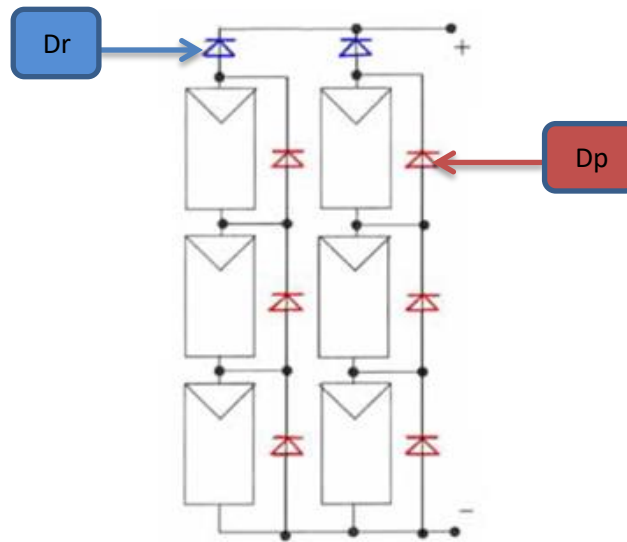


Figure 1.6. câblage série / parallèle de modules photovoltaïques avec leurs diodes de protection.

1.7. Orientation des panneaux solaires

1.7.1. Choix de l'orientation des modules

L'orientation des modules doit être plein sud d'une manière idéale. Toutefois, il faut tenir compte des deux paramètres suivants dans le cadre du choix d'une orientation :

- les masques environnants.
- l'orientation du site.

Dans le cas où le site présente des masques importants à l'est (végétation, bâtiments, etc.), il est peut-être préférable d'orienter plus à l'ouest le champ photovoltaïque plutôt que de

le placer plein sud. La production sera alors plus importante l'après-midi sans pour autant défavoriser le matin (qui n'est pas ensoleillé du fait des masques) [6].

1.7.2. Choix de l'inclinaison des modules

L'objectif est de produire le plus d'énergie sur l'année. La production est maximale lorsque les rayons du soleil sont perpendiculaires au module. L'incidence du rayonnement sur les modules photovoltaïques varie de manière importante entre l'été et l'hiver. D'autre part, la durée d'ensoleillement est elle aussi très variable entre l'été et l'hiver à tel point que chaque mois d'hiver représente moins de 5 % de la production totale. Il faut donc rechercher quelle est l'inclinaison qui permettra de produire le plus d'énergie sur l'année. Celle-ci dépend de la latitude du lieu et aussi de l'orientation des capteurs [6].

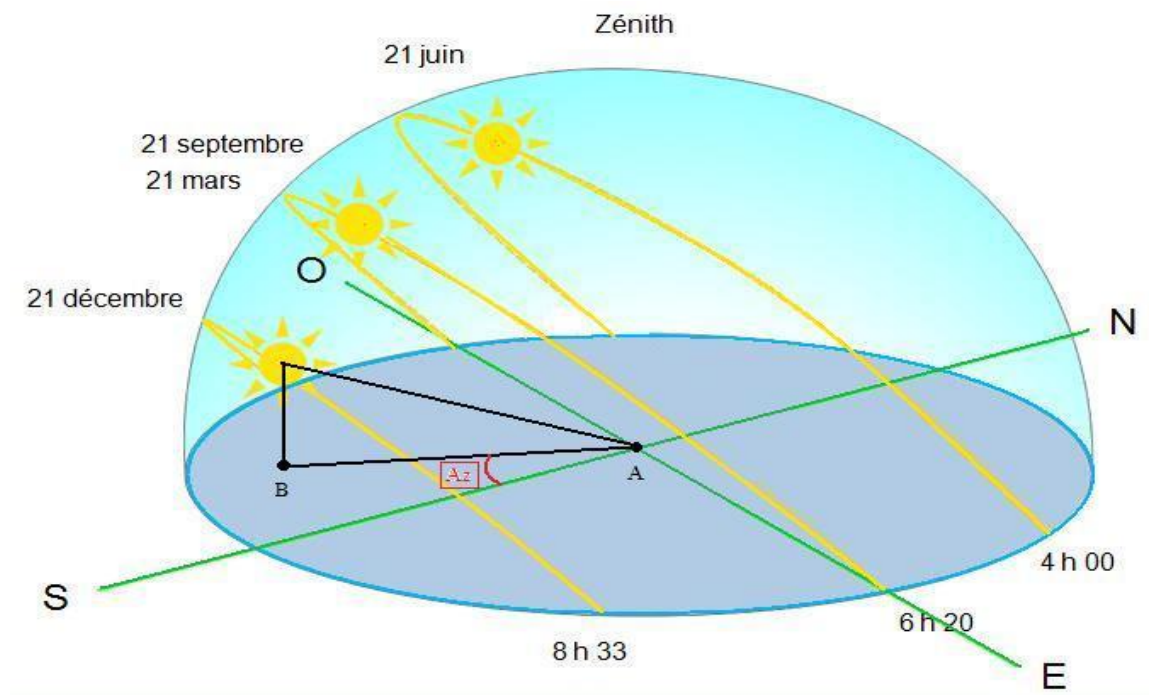


Figure 1.7. Représentation d'un module photovoltaïque incliné à 35°.

1.8. Système photovoltaïque autonome

1.8.1. Le générateur photovoltaïque

Le générateur PV représente la partie de production d'énergie électrique. Elle est composée d'un ou plusieurs des modules PV. Ces modules sont formés d'un assemblage des

cellules photovoltaïque. Ils peuvent être branchés en série pour augmenter leur tension d'utilisation et en parallèle pour augmenter leur courant.

1.8.2. Stockage d'énergie

Dans une installation PV, le stockage correspond à la conservation de l'énergie produite par le générateur PV, en attente pour une utilisation ultérieure. La gestion de l'énergie solaire nécessite s'envisager des stockage suivant les conductions météorologiques et qui vont répondre à deux fonction principales [7] :

- Fournir à l'installation de l'électricité lorsque le générateur PV n'en produit pas (la nuit ou par mauvais temps par exemple).
- Fournir à l'installation des puissances plus importantes que celles fournies par le générateur PV.

1.8.3. Régulateur

Les systèmes de régulation de charge sont des éléments d'un système photovoltaïque qui ont pour but de contrôler la charge et la décharge d'une batterie afin d'en maximiser la durée de vie. Son rôle principal est de réduire le courant lorsque la batterie est presque entièrement chargée. Lorsqu'une batterie se rapproche d'un état de charge complète, de petites bulles commencent à se former sur les électrodes positives.

Le régulateur de charge assure deux fonctions principales :

- la protection des batteries contre les surcharges et les décharges profondes.
- L'optimisation du transfert d'énergie du champ PV à l'utilisation.

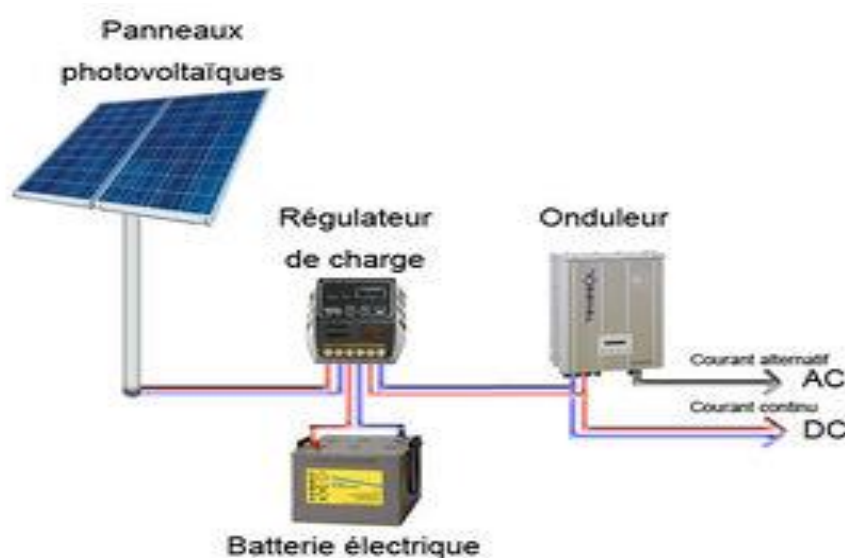


Figure1.8. Système photovoltaïque autonome.

1.9. Utilisation de l'énergie photovoltaïque

Cette partie se compose essentiellement d'un ou plusieurs récepteurs : ceux sont les différents équipements qui utilisent l'énergie électrique solaire produite et contrôlée (éclairage, pompage...) [4].

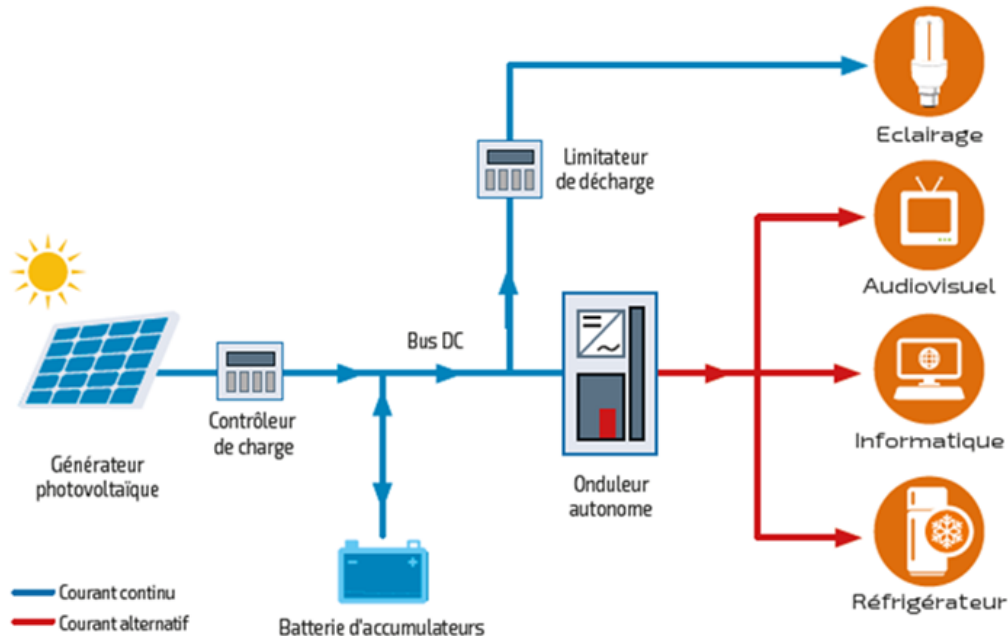


Figure 1.9. Une application des systèmes photovoltaïques.

1.10. Avantages et inconvénients de l'énergie PV

1.10.1. Avantages

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages :

- L'énergie solaire est, à l'échelle humaine, inépuisable et disponible gratuitement en très grandes quantités. De plus, lors de la phase d'exploitation, la production d'électricité au moyen de panneaux photovoltaïques n'est pas polluante.
- Le silicium, matériau utilisé dans les panneaux solaires actuels les plus répandus, est très abondant et n'est pas toxique.
- Les panneaux solaires ont une durée de vie de 20 à plus de 30 ans et sont presque intégralement recyclables.
- La modularité des panneaux est très importante, c'est-à-dire qu'il est possible de concevoir des installations de tailles diverses dans des environnements très variés. Ceux-ci sont par conséquent adaptés à la production décentralisée d'électricité en sites isolés.

- Les panneaux photovoltaïques peuvent être utilisés à des fins domestiques de petite échelle (par exemple sur des toitures) ou à des fins de production énergétique industrielle à grande échelle (par exemple, la ferme solaire de Toul- Rosières en Lorraine) [3].

1.10.2. Inconvénients

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients :

- Fabrication et recyclage des panneaux peu écologiques.
- Production qui dépend des conditions d'ensoleillement.
- Durée de vie limitée (env. 20 ans).
- Rendement assez faible (15%) [8].

1.11. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les enjeux et les développements actuels du photovoltaïque. Nous avons ensuite présenté le fonctionnement d'une cellule en expliquant brièvement le phénomène photovoltaïque. Nous avons vu que la cellule PV présente une caractéristique non linéaire, présente un point de puissance maximal caractérisé par un courant et une tension maximaux et qu'elle peut être modélisée par un circuit électrique simple.

Nous avons présenté l'influence des différents paramètres extérieurs sur cette caractéristique. Le courant de court-circuit évolue principalement avec l'éclairement et la tension à vide avec la température. L'interconnexion de cellules PV en série ou en parallèle pose plusieurs problèmes de déséquilibre qui sont très pénalisants si les cellules n'ont pas le même point de fonctionnement.

Nous avons présenté les différentes technologies de cellules actuellement sur le marché et ou cours de développement, et malgré la fin du silicium annoncée depuis de nombreuses années, ce dernier garde une grande longueur d'avance sur les autres technologies.

L'insertion de convertisseurs statiques avec une appropriée, entre le générateur et sa charge, permet d'optimiser le transfert de l'énergie. Au chapitre deux, on présente une analyse sur les différentes topologies de ces convertisseurs DC/DC ainsi qu'un état de l'art sur la plupart des techniques MPPT existantes.

Chaptire 2:

Modélisation la chaine de conversion photovoltaïque

2.1. Introduction

Un GPV présente des caractéristiques I-V non linéaires qui admettent un seul point de fonctionnement optimal dans les conditions homogènes d'éclairement et de température [13]. Une adaptation d'impédance s'impose et cela peut se faire par un couplage direct d'une charge adaptée ou en insérant entre le GPV et la charge électrique un dispositif électronique.

Cette interface joue le rôle entre les deux éléments. Il assure, à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur, l'adaptateur communément utilisé en PV est un convertisseur statique (Hacheur) [14].

Dans ce chapitre, on s'intéresse à l'étude du convertisseur DC/DC type hacheur Buck – Boost et hacheur Boost comme des étages de conversion d'énergie, on présentera un type de technique MPPT existante qui permet de faire fonctionner le GPV à sa puissance maximale.

L'objectif est de voir la performance de système PV lors de la variation des signaux irradiances et de la température fixe. Pour cela, on a fait la simulation de système globale pour deux signal irradiation différant avec l'analyser et d'interpréter les résultats obtenus.

2.2. Convertisseur Buck-Boost

La topologie et les formes d'ondes de courant et de tension obtenues de ce convertisseur sont présentées à la *Figure (2.1)* . ce type de convertisseur est composé essentiellement d'un interrupteur K (comme IGBT ou MOSFET) et d'une diode D l'interrupteur K est commandé par un signal à modulation de largeur d'impulsion (MLI) de période de découpage fixe T_d et de rapport cyclique variable α . La conduction des deux interrupteurs est complémentaire, quand K est fermé D est ouvert ; et quand K est ouvert, D est fermé. La tension de sortie moyenne est donnée par:

$$V_s = \frac{\alpha V_c}{1-\alpha} \quad (2.1)$$

L'ondulation de courant dans l'inductance est donnée par :

$$\Delta i_L = \frac{\alpha V_c}{L_f} \quad (2.2)$$

et l'ondulation de la tension de sortie:

$$\Delta V_s \frac{\alpha I_s}{Cf} = \frac{\alpha^2 V_s}{(1-\alpha)RCf} \quad (2.3)$$

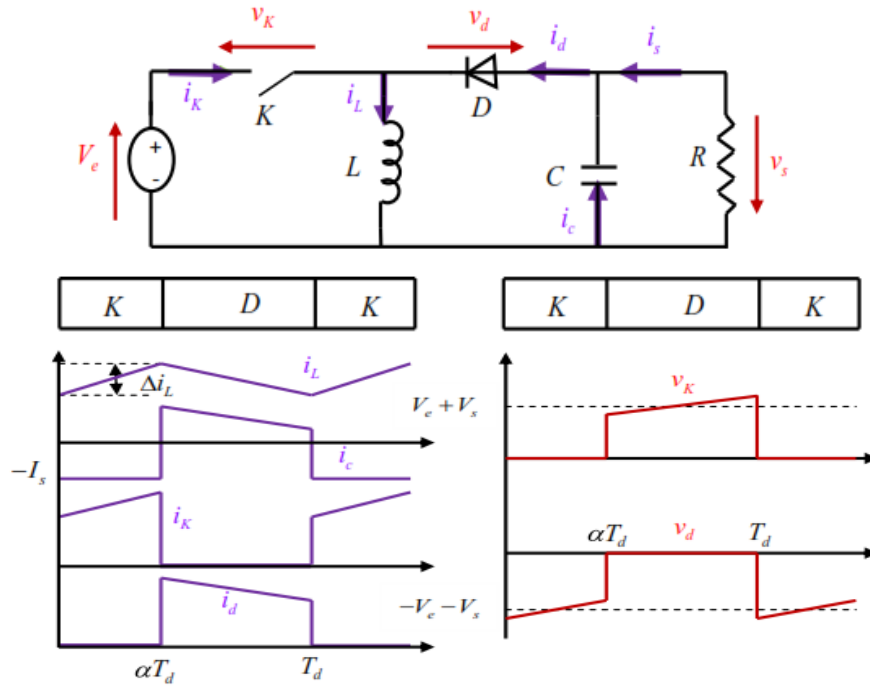


Figure 2.1. Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Buck-Boost

2.3. Convertisseur Boost

On considère un convertisseur DC-DC de type Boost. La Figure (2.2) donne le schéma de principe de ce convertisseur, les intervalles de conduction de l'interrupteur et de la diode ainsi que les formes d'ondes de ses courants (à gauche) et tensions (à droite).

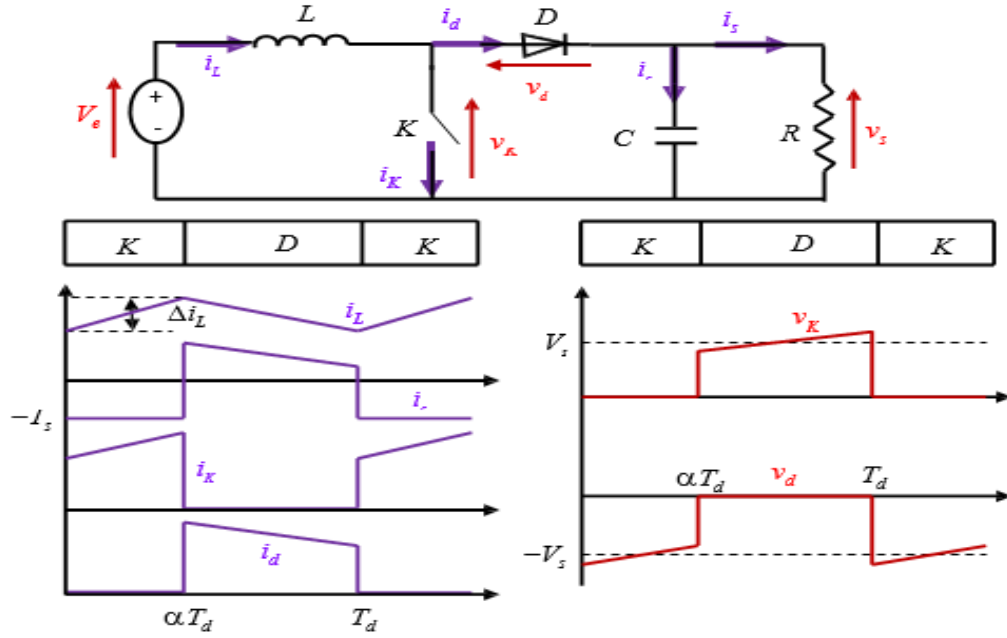


Figure 2.2. Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Boost
 Durant chaque période, K est fermé de l'instant 0 à αT_d et ouvert de αT_d à T_d . On distingue deux modes de fonctionnement selon que le courant dans l'inductance s'annule (conduction discontinue) ou pas (conduction continue).

Lorsque l'interrupteur K est fermé ($0 < t < \alpha T_d$), le circuit du convertisseur est (Figure 2.3) :

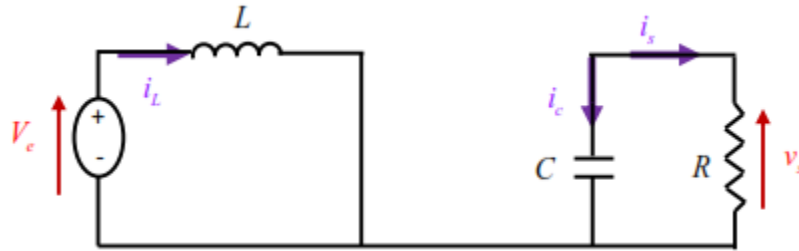


Figure 2.3. Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est fermé

$$L \frac{di_L}{dt} = V_c \quad (2.4)$$

$$i_L = I_{min} + \frac{V_c}{L} t \quad (2.5)$$

Avec I_{min} la valeur minimale du courant dans l'inductance.

A l'instant $t = \alpha T_d$, le courant dans l'inductance atteint sa valeur maximale I_{max}

$$I_{min} = I_{min} + \frac{V_c}{L} \alpha T_d \quad (2.6)$$

Lorsque l'interrupteur K est ouvert $\alpha T_d < t < T_d$ le circuit du convertisseur sera comme montré dans la figure (2.4).

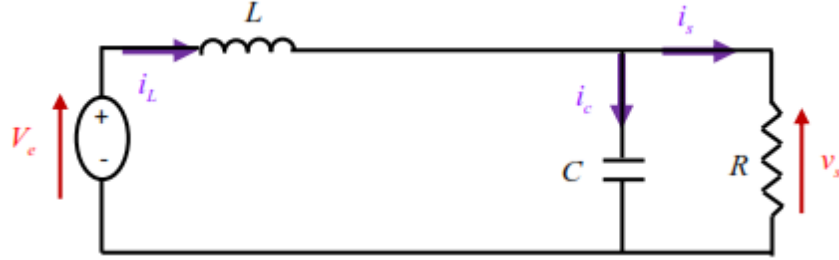


Figure 2.4. Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est ouvert

$$L \frac{di_L}{dt} = V_c - V_s \quad (2.7)$$

$$I_L = I_{min} + \frac{V_c - V_s}{L} (t - \alpha T_d) \quad (2.8)$$

A l'instant $t = T_d$, le courant dans l'inductance revient à sa valeur minimale I_{min}

$$I_{min} = I_{max} + \frac{V_c - V_s}{L} (1 - \alpha) T_d \quad (2.9)$$

Soit $\Delta i_L = I_{max} - I_{min}$ l'ondulation du courant dans l'inductance.

En faisant l'égalité des valeurs de l'ondulation du courant tirées des équations (2.6) et (2.9), on peut déduire la valeur moyenne de la tension de sortie V_s :

$$V_s = \frac{1}{1 - \alpha} V_c \quad (2.10)$$

On remarque qu'on peut contrôler la tension de sortie du convertisseur en faisant varier sa tension d'entrée ou son rapport cyclique. Celui-ci étant toujours compris entre 0 et 1, alors le montage fonctionne en élévateur de tension.

En appliquant le principe de conservation de puissance entre l'entrée et la sortie du convertisseur, on peut établir la valeur moyenne du courant dans l'inductance en fonction du courant moyen dans la charge et du rapport cyclique :

$$I_L = \frac{1}{1 - \alpha} I_e \quad (2.11)$$

De l'expression (2.6), on exprime l'ondulation de courant dans l'inductance :

$$\Delta i_L == \frac{\alpha V_s}{L} T_d = \frac{\alpha V_c}{Lf} \quad (2.12)$$

Avec f la fréquence de découpage.

Pendant la première séquence de fonctionnement $0 < t < T_d$, seul le condensateur donne de l'énergie à la charge, on peut écrire :

$$C \frac{dV_s}{dt} = -i_s \quad (2.13)$$

Alors l'ondulation de la tension de sortie peut être exprimée par:

$$\Delta V_s == \frac{\alpha I_s}{Cf} = \frac{\alpha V_s}{(1-\alpha)RCf} \quad (2.14)$$

2.4. Recherche du point de puissance maximale (MPPT)

2.4.1. Principe

Pour que le système photovoltaïque fonctionne à des points de puissance maximums de leurs caractéristiques, il existe des lois de commande spécifiques qui répondent à ce besoin.

Cette commande est nommée dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou « Maximum Power Point Tracking » en Anglais (MPPT) [15]. Le principe de ces commandes est de chercher le point de puissance maximale (PPM) en gardant une bonne adaptation entre le générateur et sa charge pour assurer le transfert de la puissance maximale.

La Figure (2.5) représente une chaîne de conversion photovoltaïque élémentaire associée à une commande MPPT. La commande MPPT est associée à un convertisseur statique permettant de faire une adaptation entre le GPV et la charge de telle sorte que la puissance générée correspond à sa valeur maximale et qu'elle soit transférée directement à la charge[9].

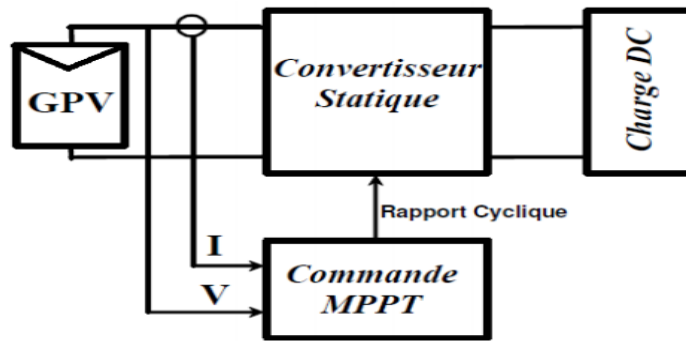


Figure 2.5. Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur statique contrôlé par une commande *MPPT*

2.4.2. Méthode Perturbe & Observe (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. Ainsi, comme l'illustre la *Figure (2.6)*, 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 PPM.

Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. 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 PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande [10].

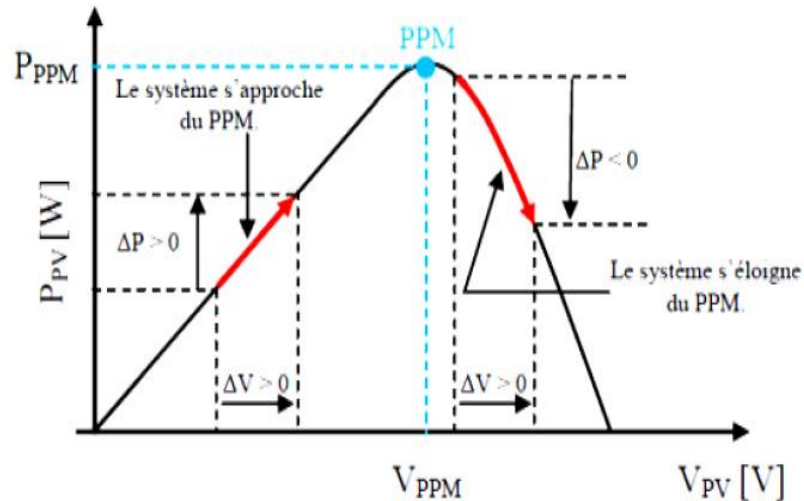


Figure 2.6. Schéma de converge vers le PPM par P&O.

La Figure 2.7 représente l'algorithme classique associé à une 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 GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant

A cause de la facilité de son implémentation, la méthode P&O est fréquemment utilisée malgré qu'elle présente des problèmes d'oscillations autour du PPM car la recherche doit être répétée périodiquement pour obliger le système à osciller autour du PPM. En plus, et pour des variations brusques des conditions climatiques ou/et de la charge, cette méthode présente parfois des erreurs d'interprétation dans la direction qu'il faut suivre pour atteindre le PPM [11].

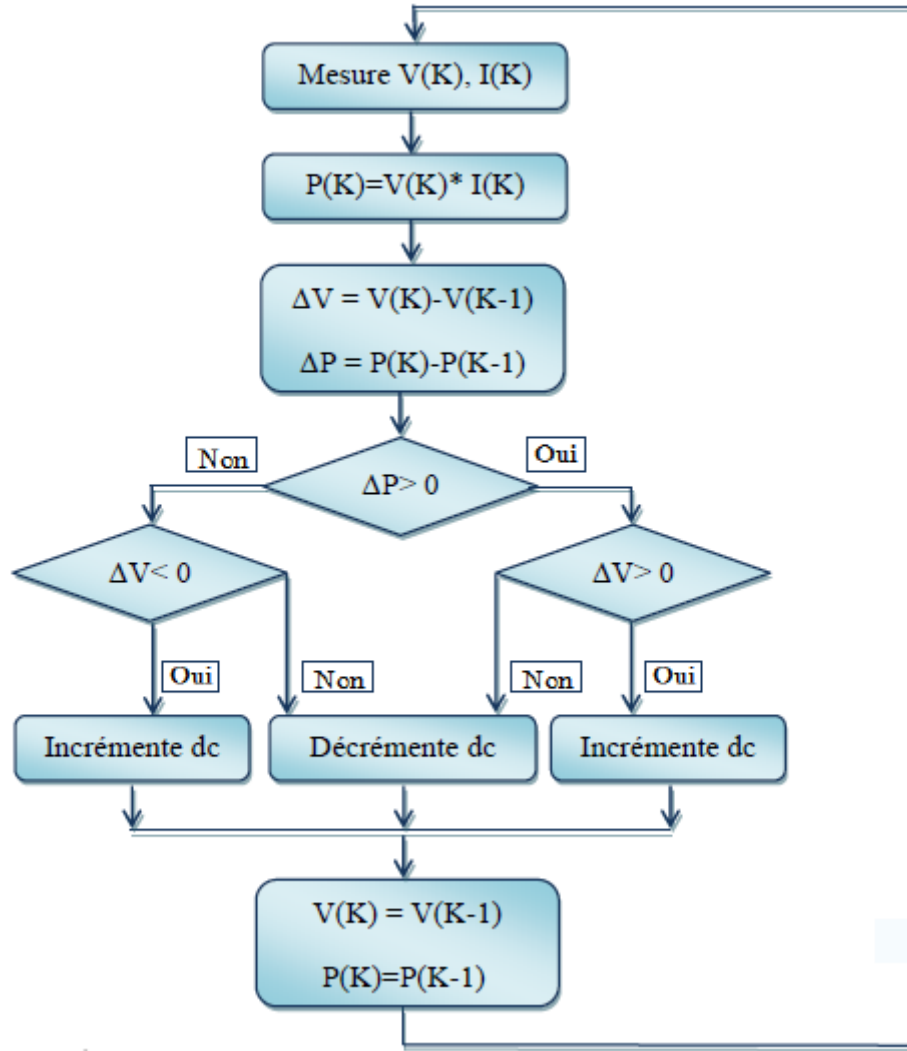


Figure 2.7. Algorithme de la méthode P&O.

Telle que :

P_{PVn} la nouvelle puissance

P_{PVn-1} l'ancienne puissance dans le temps (t-1).

$$\Delta V = V_{PVn} - V_{PVn-1} \quad (2.15)$$

$$\Delta P = P_{PVn} - P_{PVn-1} \quad (2.16)$$

2.5. Caractérisation et simulation de caractérisation du module PV

Dans ce travail, nous avons simulé le module photovoltaïque *Canadian Solar CS5C 80M* qui comporte 1 cellule. Le module PV peut produire une puissance maximale de 80 watts à 17 volts. Ce ci nous a permis de déterminer la puissance en fonction de la tension et le courant en fonction de la tension du module étudié pour un éclairement de 1000 W/m^2 et température $T = 25^\circ\text{C}$.

Les caractéristiques électriques de ce module photovoltaïque dans des conditions de test standards sont représentées par le tableau (2.1).

Grandeurs	Valeurs
- Eclairement standard, E.	$E=1000(\text{W/m}^2)$
- Température standard, T.	$T=25(\text{C})$
- Puissance crête maximale, Pm.	$P_m=80.15(\text{W})$
- Tension optimale, V_{opt} .	$V_{\text{opt}}=17.5(\text{V})$
- Courant optimale, I_{opt} .	$I_{\text{opt}}=4.58(\text{A})$
- Tension de circuit ouvert, V_{co} .	$V_{\text{co.}}=21.8(\text{V})$
- Courant de court-circuit, I_{sc}	$I_{\text{sc}}=4.97(\text{A})$

Tableau 2.1.Caractéristique électrique du module

Pour pouvoir étudier l'influence d'éclairement sur les paramètres de sorties d'un panneau photovoltaïque nous avons fixé la température à (25°C) et on trace les courbes pour différentes valeurs d'éclairement .

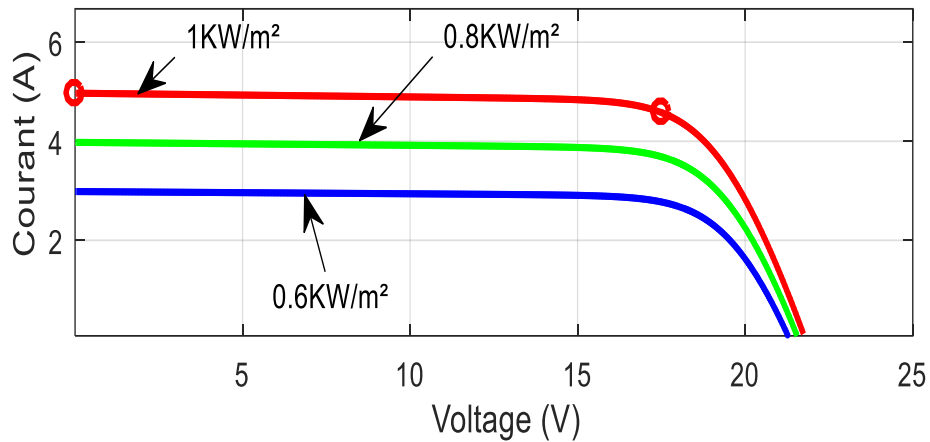


Figure 2.8. Caractéristiques courant-tension et courant-tension du GPV dans les Conditions standards

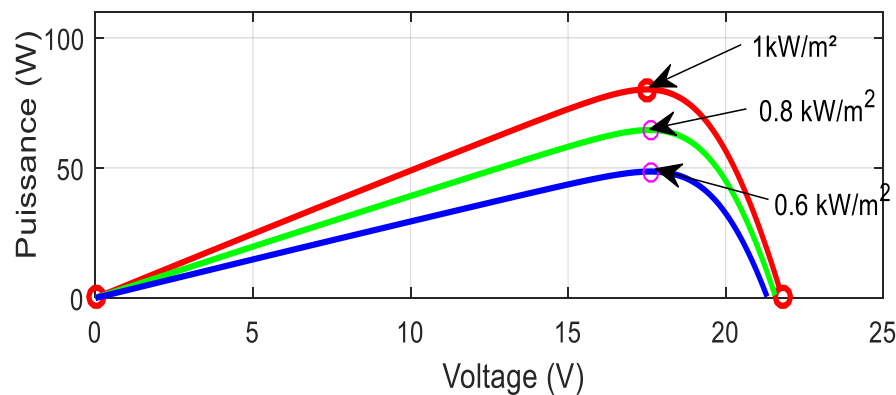


Figure 2.9. Caractéristiques courant- puissance et courant-puissance du GPV dans les Conditions standards.

- Il est clairement remarquable que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement ; car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique. (Figure 2.8)
- On remarque aussi que la baisse de l'éclairement fait diminuer faiblement la valeur de la tension de circuit ouvert. Le point de puissance optimale chute en conséquence (Figure 2.9).

2.6. Simulation d'un système photovoltaïque avec hacheur Boost

La Figure (2.10) représente le schéma global d'un système photovoltaïque composé d'un module PV avec un hacheur Boost commandé en MPPT de type P&O. Pour tester les fonctionnements des algorithmes modélisés précédemment, on a inséré le bloc de commande MPPT pour le système photovoltaïque, les entrées de la commande sont le courant et la tension du panneau, la sortie représente le pas du rapport cyclique qui génère le signal de modulation PWM. A l'aide du toolbox Simpower dans l'environnement Simulink de MATLAB on est arrivé à réaliser le système avec les schémas bloc de l'algorithme MPPT comme le montre le Figure (2.10) .

Pour montrer bien l'efficacité de la commande MPPT sur la puissance maximale, nous avons simulé le système avec différents éclaircements et une température fixe $T=25^{\circ}\text{C}$, et cette simulation est appliquée en deux mode sans et avec MPPT les résultats obtenus comme le montre le Figure (2.11)

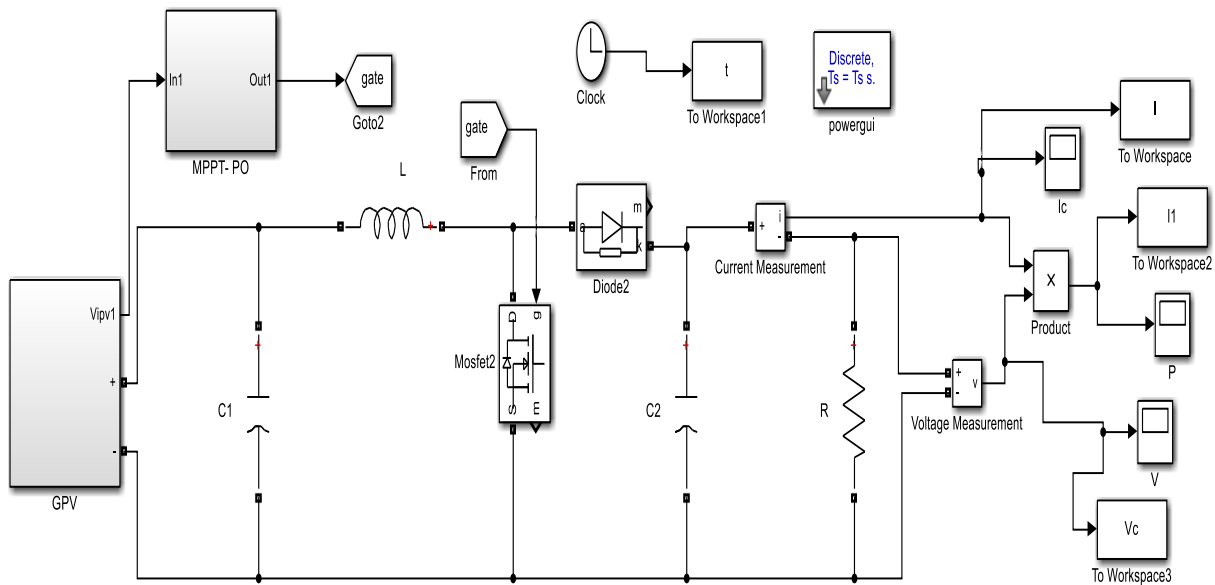


Figure2.10 schéma bloc de connexion d'un générateur photovoltaïque / hacheur Boost avec MPPT.

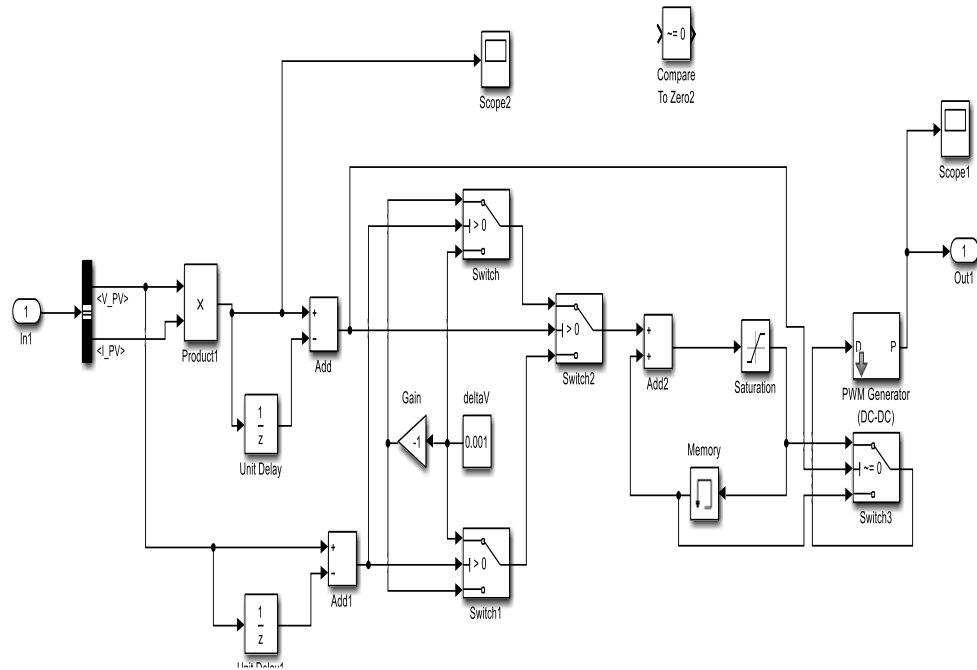


Figure 2.11. Schéma bloc de l'algorithme MPPT.

Les figures suivantes représentent respectivement, l'évolution de des puissances, des tensions aux bornes de panneau et de charge.

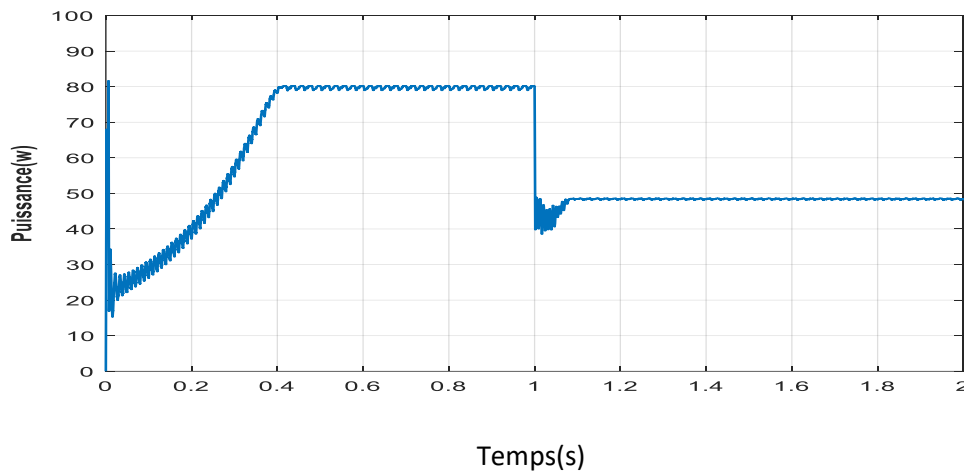


Figure 2.12. Résultat de simulation des puissances de panneau par divers éclairement (1000/600 W/m²)

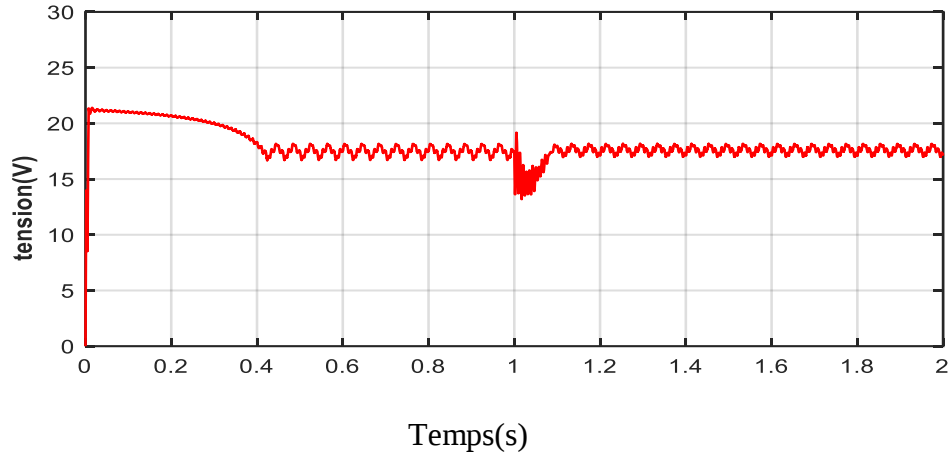


Figure 2.13. Résultat de simulation des tensions à la borne de panneau par divers éclairement

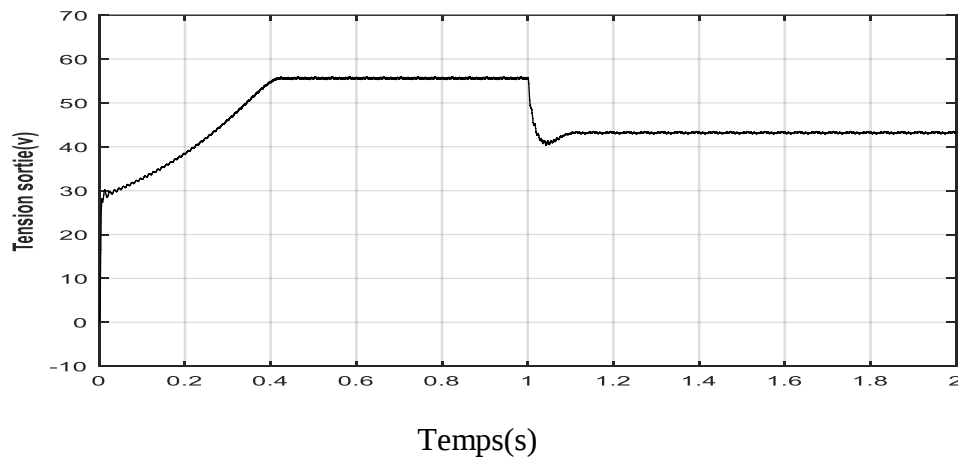


Figure 2.14. Résultat de simulation des tensions à la borne de la charge par divers éclairement

- ✓ À partir des résultats obtenus, on remarque que la commande P&O a permis de retrouver le point de puissance maximale du panneau.
- ✓ la courbe de la puissance illustrée dans la figure (2.14) atteint jusqu'à 80W avec de grandes oscillations.
- ✓ À partir des courbes présentées pour les différents cas de simulation, le hacheur -Boost fournit une tension de sortie supérieure à celle du générateur photovoltaïque. Donc l'hacheur Boost effectue correctement son rôle.
- ✓ Pour un éclairement maximale $E=1000 \text{ W/m}^2$, la puissance fournie par le générateur PV se stabilise autour de 80W, à la sortie du panneau, la tension et le courant se stabilisent respectivement autour de 22.8V et 1.75A.

- ✓ Dans le cas du fonctionnement avec l'éclairement variable, on note que la MPPT a un rendement très important dans le but de poursuivre le PPM.

2.6.1. Les résultats de la simulation d'un PV- Buck-Boost

Nous avons simulé le fonctionnement d'un ensemble (GPV-Buck-Boots-MPPT et une charge).

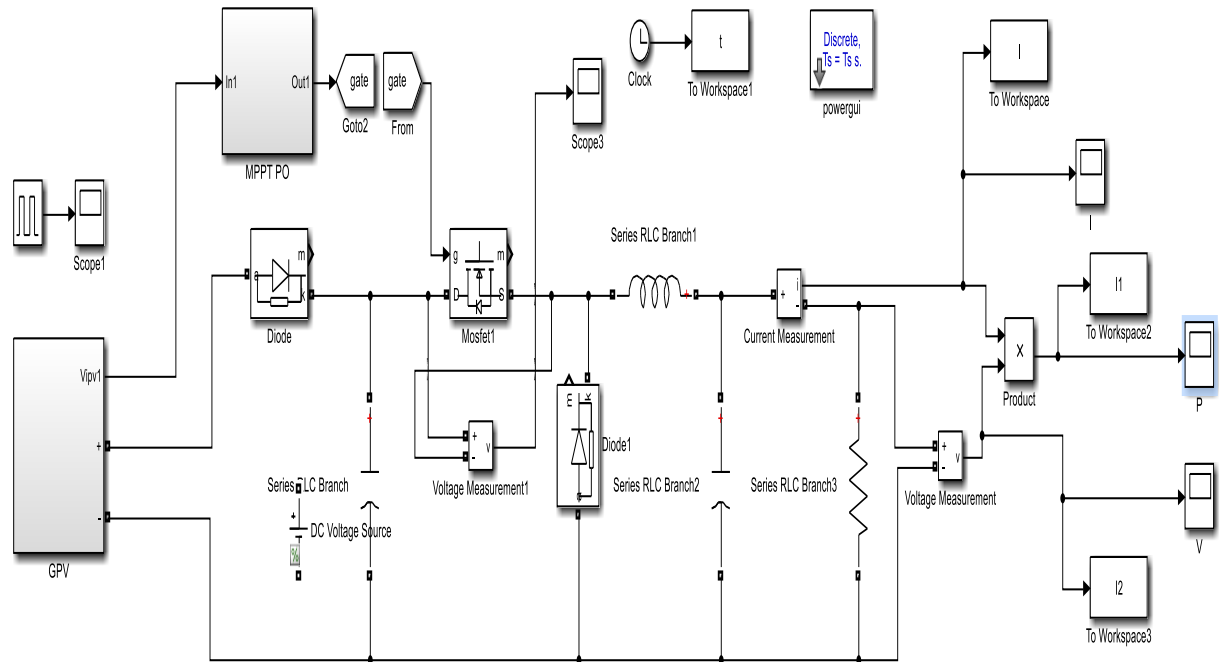


Figure 2.15 schéma bloc de la simulation d'un système PV/ Buck-Boost avec MPPT

Les figures suivantes représente, respectivement, l'évolution de des puissances, des tensions et des courants à l'entrée (Panneau) et la sortie du système (Charge).

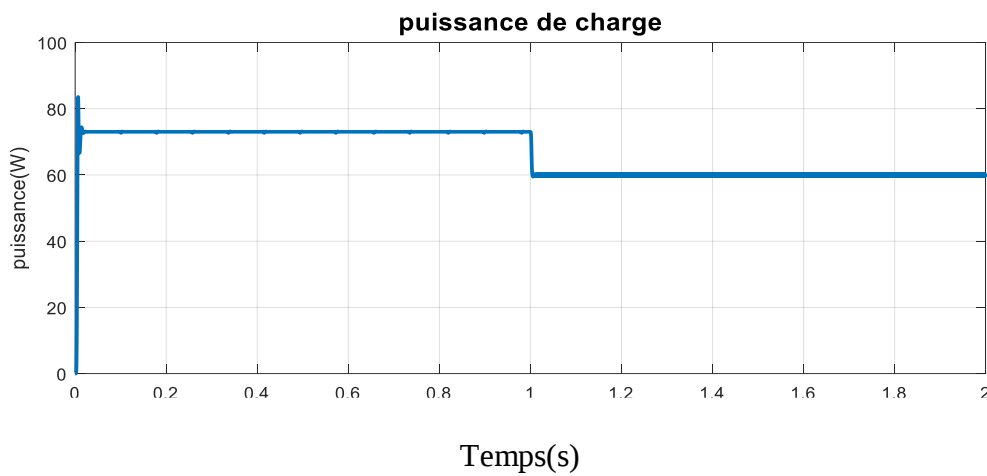
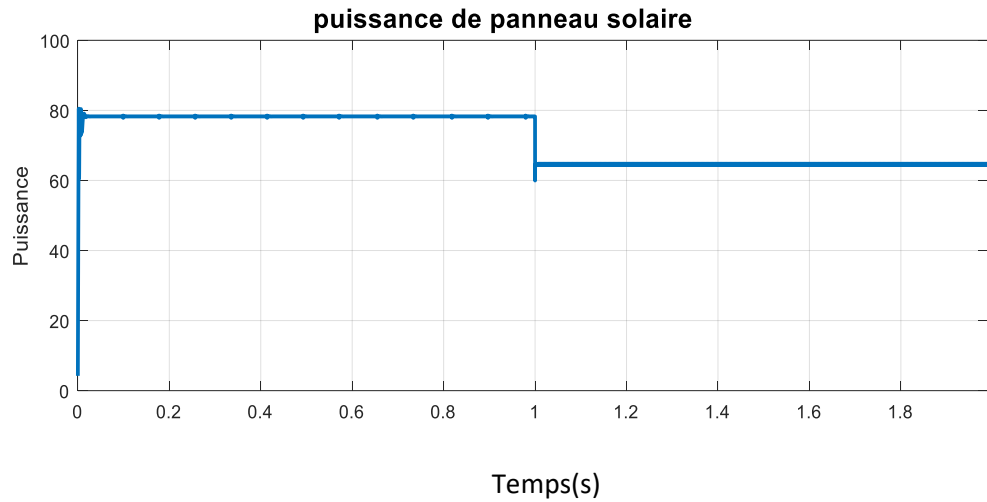
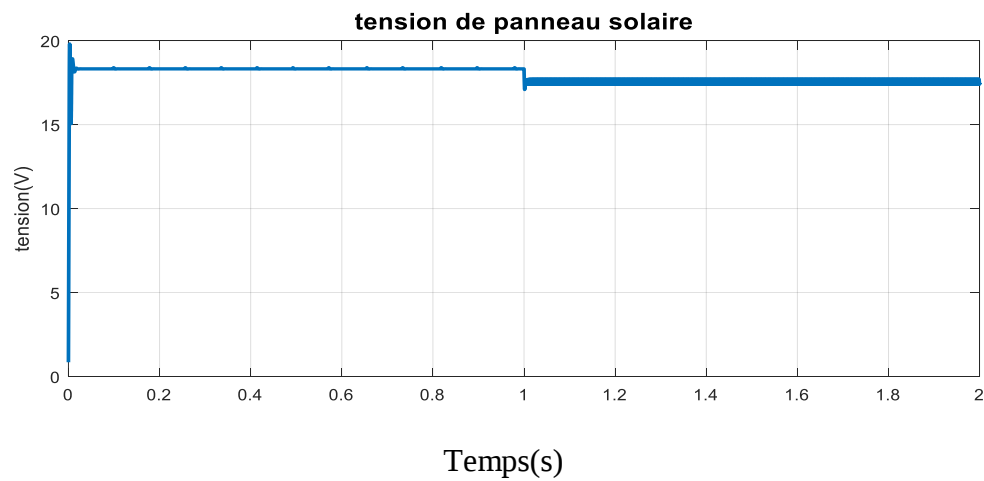


Figure 2.16. Résultat de simulation des puissances à la borne de panneau et à la borne de la charge par divers éclairement (1000/600 W/m²) avec MPPT



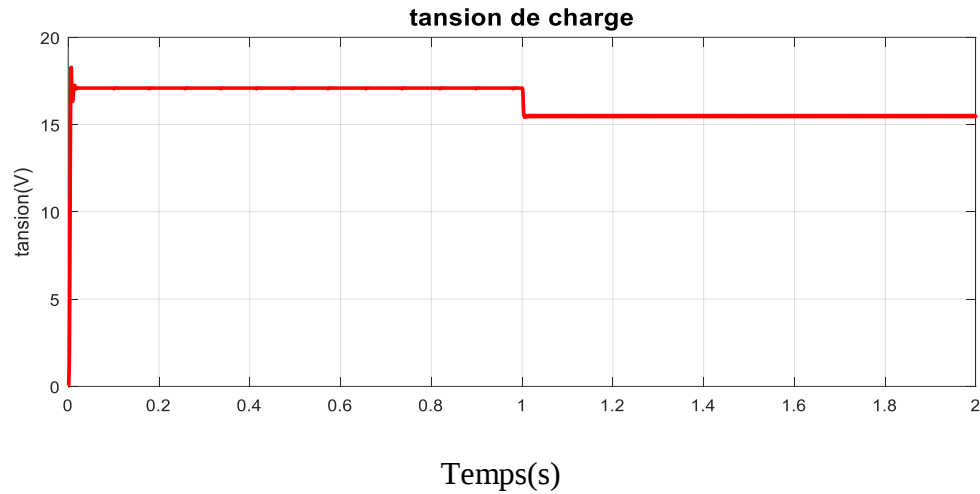


Figure 2.17. Résultat de simulation des tensions à la borne de panneau et à la borne de la charge par divers éclairement avec MPPT

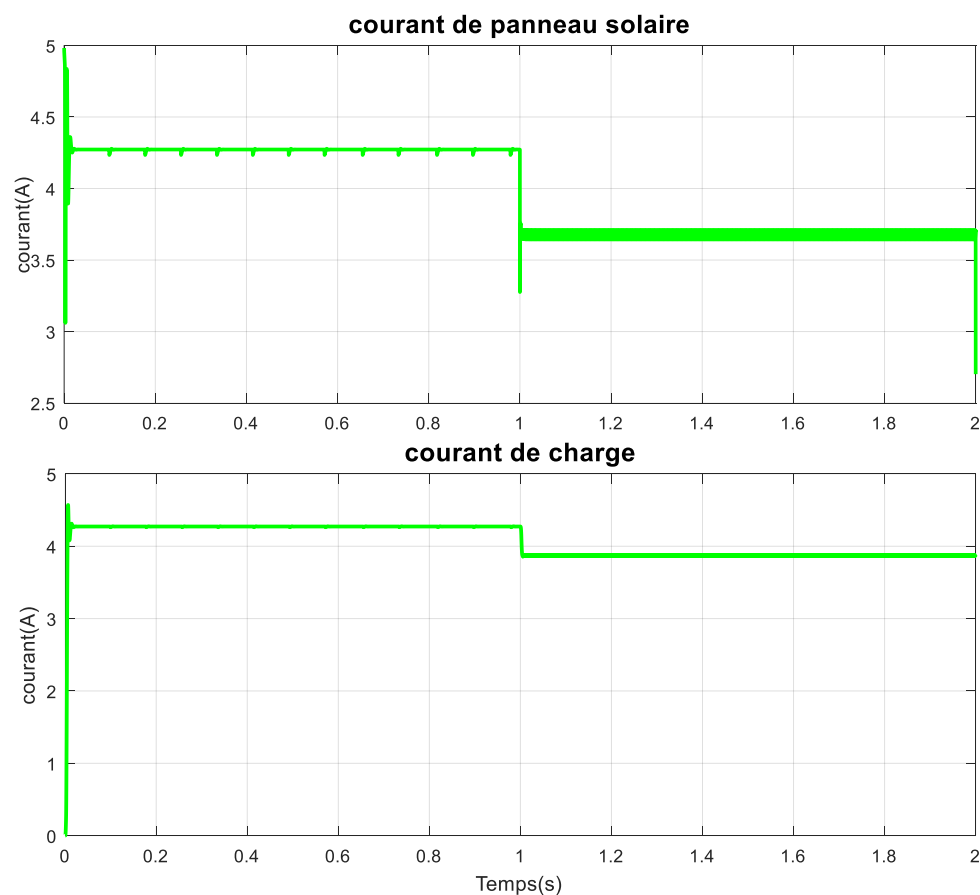


Figure 2.18. Résultat de simulation des courants à la borne de panneau et à la borne de la charge par divers éclairement avec MPPT

- **Remarques et interprétations**

Il apparaît qu'avec différents niveaux de l'éclairement, les grandeurs électriques (puissances, tensions et courants) se stabilisent autour des valeurs précises.

- ✓ Après un régime transitoire, la commande MPPT fait osciller le point de fonctionnement autour du point du PPM.
- ✓ Pour un éclairement maximale $E=1000 \text{ W/m}^2$ La puissance fournie par le générateur PV se stabilise autour de 78W et celle fournie à la charge autour de 75 W, à la sortie du panneau, la tension et le courant se stabilisent respectivement autour de 18V et 4.3A.
- ✓ Au niveau de la charge, la tension et le courant se stabilisent respectivement autour de 17.2 V et 4.2 A.
- ✓ On remarque les courbes des puissances avec les courbes des courants de sortie d'épande directement avec Schéma de signal irradiation
- ✓ On remarque l'augmentation de l'irradiation engendre une augmentation au niveau du courant et de la puissance, mais elle n'influe pas beaucoup sur la tension.

2.7. Avantages du convertisseur BOOST :

Le convertisseur BOOST est utilisé pour les systèmes photovoltaïques avec un suiveur du point de puissance maximale (MPPT). Ceci émane du fait que ce convertisseur fonctionne au mode de courant continu extrayant autant de puissance que possible à partir des cellules solaires. Par conséquent le rendement énergétique du convertisseur BOOST peut être plus grand que celui tous les autres hacheurs. Le BOOST est généralement employé pour obtenir une tension de sortie plus élevée que celle d'entrée [12] .

Le convertisseur Buck-BOOST est élévateur pour un rapport cyclique supérieur à un demi. Les contraintes en tension et en courant sur les interrupteurs et les diodes sont presque similaires pour les différentes topologies élévatrices. En analysant la complexité de ces structures, le BOOST serait le simple.

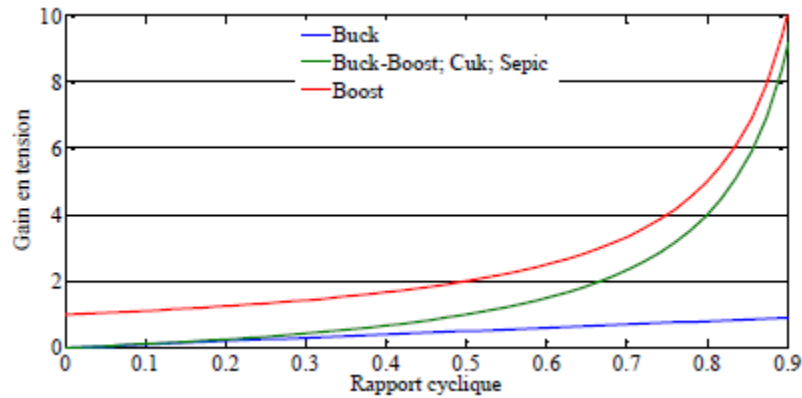


Figure 2.19. Evolution du gain en tension en fonction du rapport cyclique des convertisseurs

Si on les compare du point de vue gain en tension, aussi le Boost prend la première place comme le montre la figure 2.16 qui donne l'évolution du gain en tension en fonction du rapport cyclique.

2.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié et analysé, simulation d'un système PV adapté par une commande simple qui assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le module PV dans MATLAB/SIMULINK, le fonctionnement d'un système photovoltaïque, dont la charge est adaptée par l'intermédiaire d'un hacheur de type Boost et Buck-Boost.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes constitutions d'un système photovoltaïque ainsi que la modalisation du générateur PV. De plus, nous avons présenté les comportements de notre système et ses performances sous l'influence de différents paramètres météorologiques à savoir l'influence de l'ensoleillement et la température et visualiser les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ du module photovoltaïque. Par ailleurs, en a fait une modalisation des convertisseurs DC/DC. Dans le chapitre suivant nous allons procéder à la simulation de la commande MPPT avec différentes méthodes d'optimisation et de la recherche du point de puissance maximale.

Dans un second lieu, on a présenté de notre système photovoltaïque nous permettra de faire la simulation du système PV avec trois signal irradiation variable, d'analyser et d'interpréter les résultats obtenus.

*Chaptire **3**:*

Réalisation d'un convertisseur DC-DC avec des résultats expérimentaux

3.1. Introduction

Ce chapitre décrira les éléments essentiels de notre système PV, nécessaires à la mise en oeuvre d'une commande MPPT sur un DSC de type TMS320F28069M. Pour ce faire, nous élaborerons dans un premier temps une présentation de la structure générale du projet, ensuite nous relèverons les caractéristiques électriques réelles de notre PV. Enfin, nous détaillerons chaque élément du système en justifiant son choix.

Dans ce chapitre, on va étudier les deux montages expérimentaux d'un système PV complet (GPV+ convertisseur Boost + charge)

3.2. Matériel utilisé

3.2.1. Le microcontrôleur

3.2.1.1. Définition

La carte Arduino UNO est un microcontrôleur ATmega328 programmable permettant de faire fonctionner des composants (moteur, LED...). Elle possède des «ports» permettant par exemple de se connecter à un ordinateur.



Figure 3.1. La carte Arduino UNO.

3.2.1.2 Les avantages de la carte

- pas cher.
- multi-plateforme.

- un environnement de programmation clair et simple.
- logiciel Open Source et extensible.
- matériel Open source et extensible.

3.2.1.3. Caractéristique de la carte

- Microcontrôleur ATmega328P.
- Tension de fonctionnement 5V.
- Tension d'entrée (recommandé) 7-12V.
- Tension d'entrée (limite) 6-20V.
- E / S numériques Pins 14 (dont 6 fournissent la sortie PWM).
- PWM numérique E / S Pins 6.
- Pins d'entrée analogique 6.
- DC Courant par I O Pin / 20 mA.
- Courant DC pour 3.3V Pin 50 mA.
- Mémoire flash 32 KB (ATmega328P) dont 0,5 KB utilisé par boot loader
SRAM 2 KB (ATmega328P) EEPROM 1 KB (ATmega328P).
- Vitesse de l'horloge 16 MHz.
- Longueur 68,6 mm.
- Largeur 53,4 mm.
- Poids 25 g.

3.2.2. L'interface de logiciel

L'interface de l'IDE Arduino est plutôt simple (voir Figure 3.2), il offre une interface minimale et épurée pour développer un programme sur les cartes Arduino. Il est doté d'un éditeur de code avec coloration syntaxique (1) et d'une barre d'outils rapide (2). Ce sont les deux éléments les plus importants de l'interface, c'est ceux que l'on utilise le plus souvent.

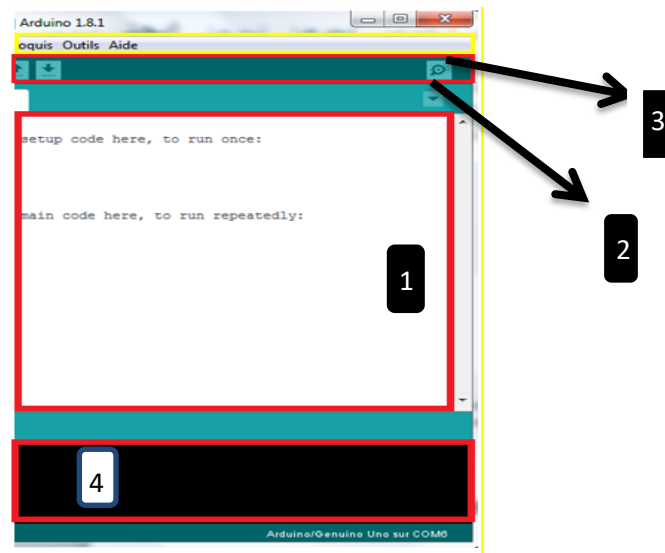


Figure 3.2. L'interface de l'IDE Arduino

On retrouve aussi une barre de menus (3) plus classique qui est utilisée pour accéder aux fonctions avancées de l'IDE. Enfin, une console (4) affichant les résultats de la compilation du code source, des opérations sur la carte, etc.

3.2.3. Le panneau solaire

On a utilisé le panneau solaire de la paillasse du laboratoire 17V, 80W qu'est illustré par la *Figure 3.3*



Figure 3.3..Le panneau solaire utilisé.

3.2.4 Composantes du hacheur Boost (L et C)

Pour le dimensionnement des différents composants du circuit du convertisseur afin de diminuer les ondulations des courants et des tensions sans faire un

surdimensionnement ce qui accroîtrait le poids et le prix des circuits, un calcul de ces composants en fonction des ondulations voulues est nécessaire. Cette remarque est très importante pour le dimensionnement de l'inductance L afin de respecter le courant admissible par l'interrupteur où dans le cas pratique les ondulations du courant ils sont plus importants par rapport aux autres ondulations.

En appliquant la relation $V_L = L \frac{dI_L}{dt}$ est on obtient :

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_L}{L} \approx \frac{V_{in}}{L} \quad (2.1)$$

A partir de la relation (2.17), la valeur crête à crête du courant I_L est :

$$I_{Lcc} = 2\Delta I_L \approx \frac{V_{in}}{L} \alpha T_s \quad (2.13)$$

La valeur de l'inductance L à choisir pour certaine ondulation ΔI_L est :

$$L \approx \frac{V_{in}}{2\Delta I_L} \alpha T_s \quad (2.14)$$

Pour le calcul de la capacité C du condensateur on a :

$$\frac{dV_{in}}{dt} = \frac{I_c}{C} \approx \frac{I_{in}}{C} \quad (2.15)$$

La valeur d'ondulation crête à crête de tension de sortie est :

$$V_{cc} = 2\Delta V_c \approx \frac{I_{in}}{C} \alpha T_s \quad (2.16)$$

La valeur de la capacité C est données par :

$$C \approx \frac{I_{in}}{2\Delta V_c} \alpha T_s \quad (2.17)$$

Le critère de conception pour les condensateurs, c'est que l'ondulation de la devrait être moins de 5%. La tension moyenne aux bornes du condensateur (C) est $V_{out} = 17$ V et pour une charge résistive de 28Ω dans les conditions de $E=1000W/m^2$ et $T=25^\circ C$, on déduire les paramètres suivantes :

- Deux condensateur $C_{in}=470 \mu f$, $C_{out}=470 \mu f$, branché aux bornes du module pour filtrer la tension d'entrée du hacheur et diminuer les ondulations d'entrée et de sortie.
- Une inductance : $L=3.3$ mH.



Figure 3.4. Convertisseur Boost

3.2.5. Capteur de tension

Capteur de tension a 3 pin (VCC, GND, SIGNAL). Peut supporté jusqu'à 25V. Ce module est basé sur le principe de pression de points de résistance, et il peut effectuer la tension de puissance d'entrée du terminal rouge réduire 5 fois de tension initiale



Figure 3.5. Capteur de tension.

3.2.6. Capteur de courant

Le capteur ACS712s, ce capteur est basée sur l'effet hall pour mesurer les signaux AC ou DC du courant avec précision

Le maximum de courant qui peut supporté ce module 5A .le signal de courant présent peuvent être lus via analogiques port.



Figure 3.6. Capteur de courant ACS712s.

3.2.7. Régulateurs de tension

Un régulateur de tension est un élément qui permet de stabiliser une tension à une valeur fixe, et qui est nécessaire pour les montages électroniques qui ont besoin d'une tension qui ne fluctue pas, ne serait-ce que peu. Un régulateur de tension peut être composé d'un ensemble de composants classiques (résistances, diodes Zener et transistor par exemple), mais il peut aussi être de type "intégré" et contenir tout ce qu'il faut dans un seul et même boîtier. La série des « 78XX » (7805, 7809, 7812, etc.) sont des régulateurs de tension positive,



Figure 3.7. Régulateur de tension.

3.2.8. Driver de MOSFET

C'est un circuit intégré qui permet le pilotage en haute fréquence de deux ou un seul Mosfet, sous des tensions pouvant atteindre 600v, en garantissant l'isolation électrique de l'Arduino et notre Mosfet.



Figure 3.8. Driver IR2110.

3.3. Réalisation d'un convertisseur Boost

Le convertisseur Boost assure le transfert et la conversion de la puissance entre les deux cotés, source et charge grâce à un système de commande cette commande est à base du microcontrôleur Arduino UNO alimenté par une tension de 5 V à travers le circuit de protection.

Le circuit de commande est constitué d'un driver pour faire saturer le Mosfet ce dernier est alimenté par deux régulateurs de tension l'une de 5v et l'autre de 12v. les deux régulateurs sont alimentés par notre source.

3.3.1. Réalisation du circuit imprimé

Pour la réalisation du circuit imprimé on utilise une plaque en verre époxy, recouverte par une mince pellicule de cuivre, cette dernière est aussi recouverte d'une couche de produit chimique sensible au rayonnement ultraviolet appelé « résine ». Pour ne pas être exposée aux rayonnements UV (Ultra-violet) naturel de soleil, cette couche est livrée avec un film protecteur anti UV.

La réalisation de notre circuit imprimé passe par les étapes suivantes :

- Réalisation du schéma du circuit PCB par le logiciel Protues-Ares.
- Impression du schéma du circuit sur un papier transparent spécial.
- Découpage de la plaque à la taille de typon.
- L'insolation de circuit à l'aide de l'insoleuse qui attaque la résine par les rayonnements UV.
- La révélation du plaque par un produit chimique, le révélateur sert à éliminer la résine attaquée par UV, et il ne reste que le cuivre et la résine protégée par l'encre imprimé sur la carte lors de l'étape de l'insolation.
- La gravure, cette étape consiste à plonger le circuit dans un bain d'acide (perchlorure de fer). Le cuivre mis à nu lors de la révélation sera éliminé.
- Le perçage des positions des composants avec une perceuse manuelle.

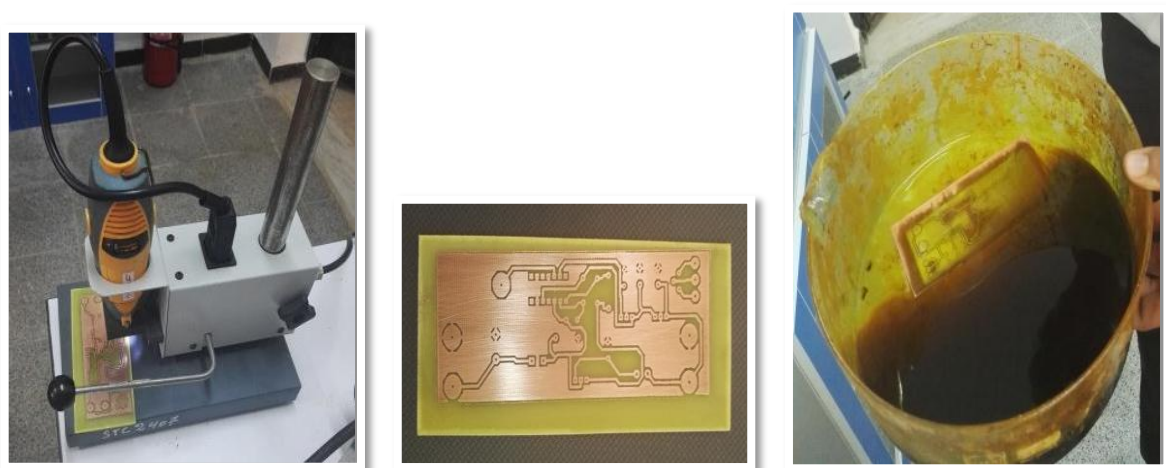


Figure 3.9. Les étapes de réalisation d'un circuit imprimé

3.3.2. Réalisation d'un convertisseur Boost avec commande MPPT

L'algorithme de recherche du point de fonctionnement à puissance maximale (MPPT) a été implanté dans l'Arduino. Les signaux I_{PV} et V_{PV} , sont filtrés et ensuite multipliés pour obtenir la valeur de la puissance Moyenne.

Le bloc suivant calcule la dérivée basée sur la variation de puissance en fonction de la tension. Le signal alpha est généré en fonction de la dérivée et il est intégré pour produire le signal MLI pour le convertisseur.

Les détails du programme basé sur la méthode Perturbation et Observation (P&O) sont décrits à chapitre 2.

3.3.2.1. Implantation du système de commande dans l'Arduino

La figure suivante montre le montage du système complet :

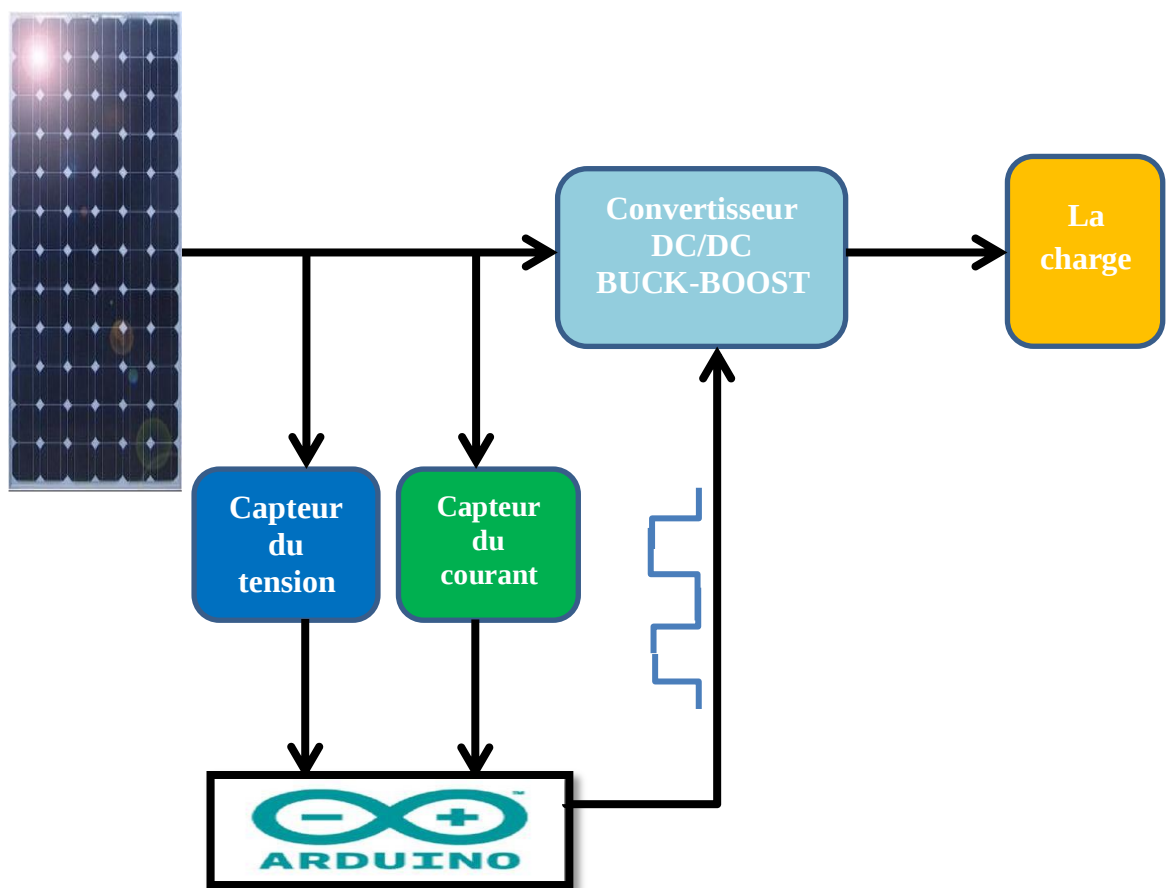


Figure 3.10. Schéma synoptique d'un commande MPPT

La figure suivante montre le montage du système complet :

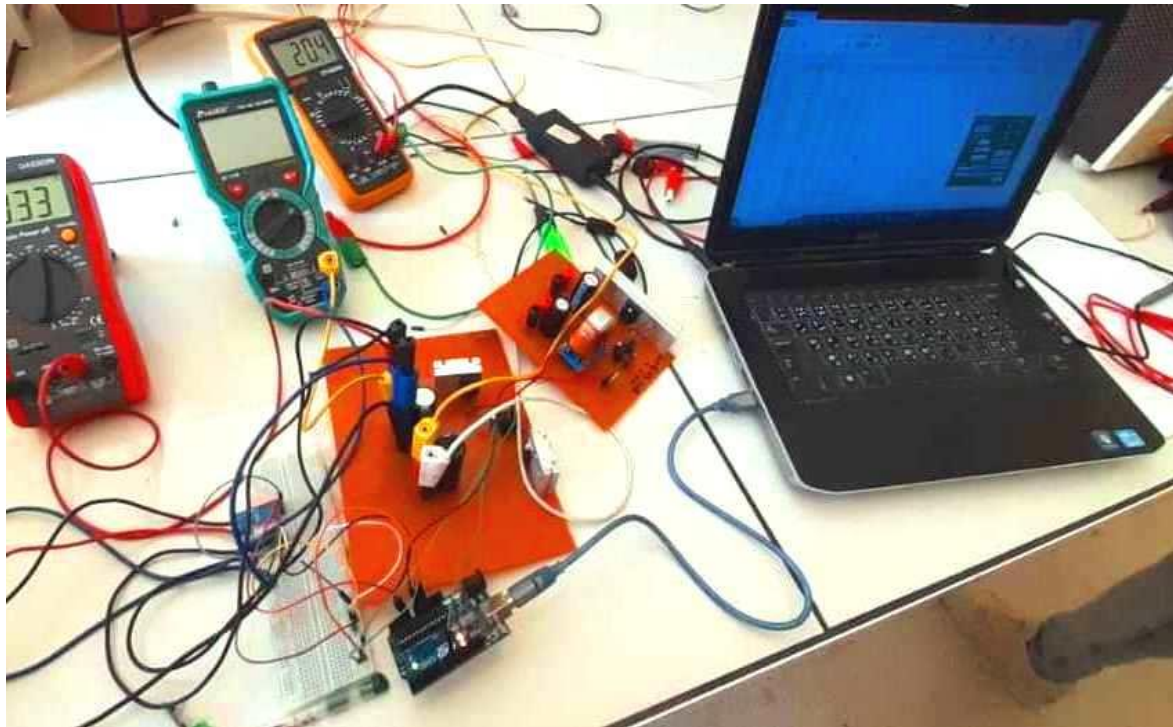


Figure 3.11. Montage du système complet.

3.3.2.2. Résultats expérimentaux du montage

Le signal à la sortie du pin 9, c'est un signal MLI d'amplitude 5V, d'une fréquence fixe de 20Khz et d'un rapport cyclique variable suivant le niveau de l'éclairement (DC=90% à DC =84%), ce signal attaque l'entrée du driver de MOSFET. Les figures (3.15 (a) et (b)) montrent le signal d'attaque.

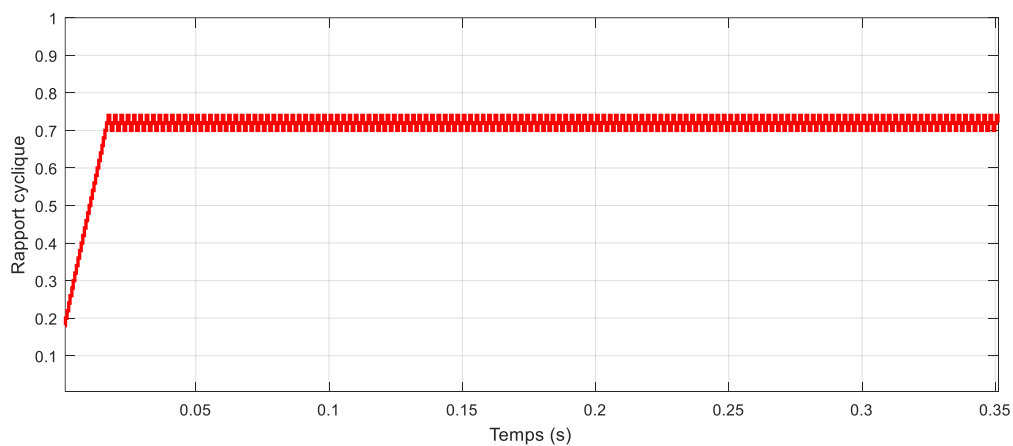


Figure 3.12 Rapport cyclique variable suivant le niveau de l'éclairement

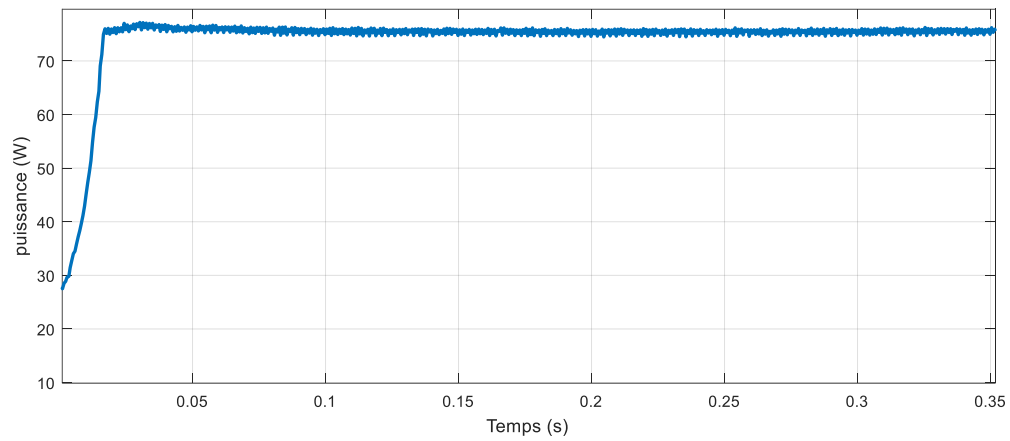


Figure 3.13 Résultat de simulation de la puissance PV

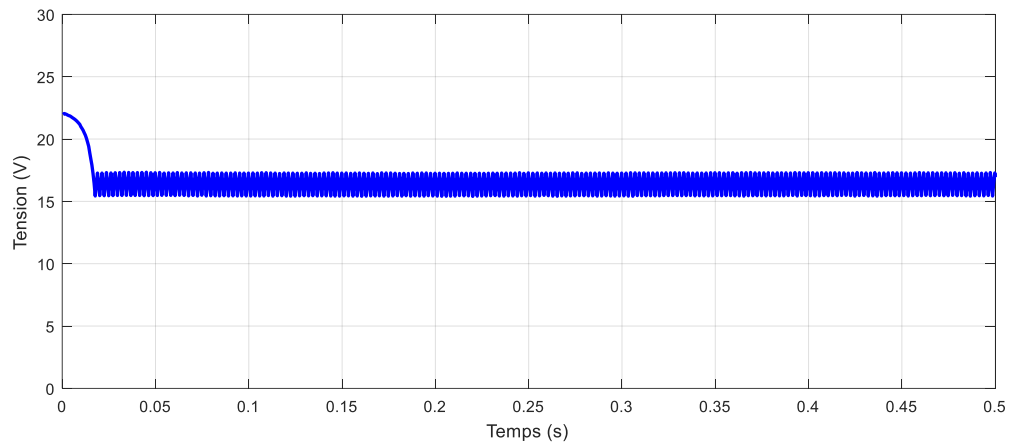


Figure 3.14 Résultat de simulation de la tension à la borne de panneau

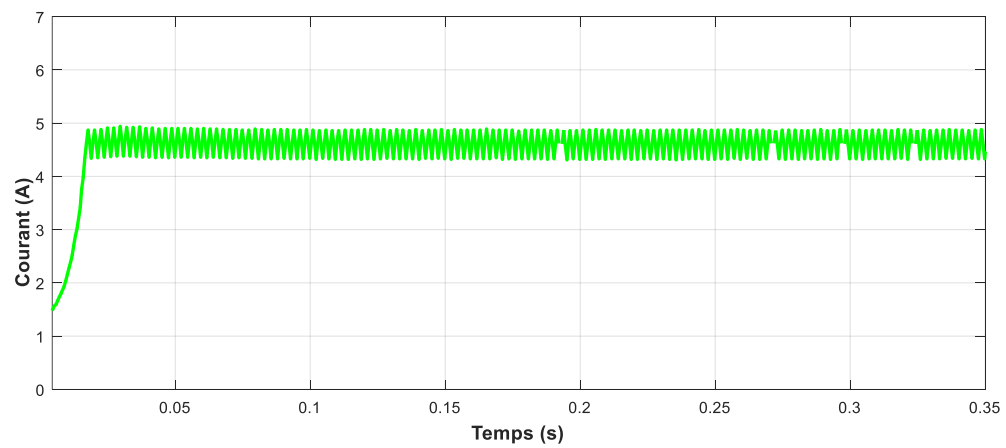


Figure 3.15 Résultat de simulation du courant PV

Les résultats sont en bon accord à ceux optimaux déduits par l'analyse optimale des grandeurs électriques du module photovoltaïque.

- En conséquence, le système photovoltaïque réalisé oscille bien autour du point de puissance maximale. Afin d'assurer un bon fonctionnement du système réalisé et d'estimer les pertes de puissances fournies par le module photovoltaïque, nous avons caractérisé le système réalisé sur des variations de l'éclairement Il apparaît d'après les tableaux :
- Un bon accord entre l'expérience et la simulation du chapitre précédent.
- L'Arduino génère un signal MLI permettant d'osciller le point de fonctionnement du générateur PV autour de chaque PPM .
- L'ensemble des résultats obtenus montre bien le bon fonctionnement du système PV réalisé.

3.4. Conclusion:

Dans ce chapitre, on a étudié les convertisseurs statiques utilisés dans les systèmes photovoltaïques, comme le hacheur Buck –Boost et l'onduleur a MOSFET, .

On a présenté la modélisation d'une cellule PV à une seule diode, le coeur du GPV, et le hacheur Buck –Boost commandé par un algorithme MPPT. Nous avons choisi pour cela, la méthode P&O (perturbation & Observation).

Dans la dernière phase du chapitre, on a présenté la simulation d'un association d'un GPV avec la hacheur Boost commandé par un algorithme MPPT et l'onduleur a été faite par la commande MLI

Conclusion générale

Conclusion générale

Notre travail présenté porte sur l'analyse d'une étude et simulation d'un système PV adapté par une commande MPPT simple qui assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le module PV dans MATLAB/SIMULINK, et même temps nous avons réalisé un prototype de convertisseur DC-DC et testé avec l'Arduino pour générer un signal PWM. La méthode P&O est l'un des systèmes les plus largement utilisés dans MPPT. Il vérifie la puissance de sortie du réseau et compare sa varié à la direction de perturbation de la tension de fonctionnement du réseau lui-même.

Avant d'entamer la problématique du transfert énergétique du générateur PV, une plateforme de connaissance approfondie sur le thème PV est nécessaire. Beaucoup de généralités portant sur l'effet PV, cellule et générateur PV sont présentés au premier chapitre. Un modèle mathématique du phénomène de conversion PV a été établi, permettant ainsi le traçage des caractéristiques du générateur PV. Les caractéristiques PV puissance-tension dans les conditions normales de fonctionnement admettent un seul point extremum. L'insertion de convertisseurs statiques (Boost et Buck- Boost) avec une commande MPPT (P&O) permet le fonctionnement optimal du générateur sont présentés au deuxième chapitre. Les résultats de simulation ont montré clairement que la méthode proposée est efficace pour la recherche du PPM quelles que soient les conditions climatiques de l'ensoleillement.

Finalement, nous avons réalisés et tester le convertisseur associé avec une carte Arduino dans laquelle nous avons implanté pour l'optimisation de la puissance maximale (MPPT).

Pour une éventuelle continuité du présent travail, il est possible d'énumérer quelques perspectives comme suite de cette étude dont on peut citer :

- Exploitation de nouveaux algorithmes MPPT.
- Introduction d'autres types de convertisseurs DC/DC.
- Utilisation des techniques d'intelligence artificielle comme la logique floue, les réseaux de neurones artificiels et les réseaux neuro-flous pour la commande du convertisseur.

Références bibliographiques

- [1]. Z. Soheir, I. Medjahed « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque commandé par la commande MPPT (P&O) », *Mémoire Master, université de Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, 20120.*
- [2]. B. Flèche , D. Delagnes, « Energie solaire photovoltaïque.doc » , *juin 2007.*
- [3]. T. Mornay, A. Vernay, M. Volle, « Les cellules photovoltaïques », *Institution des Chartreux 2004/2005.*
- [4]. F. Guessoumi, Saadi A « Commande de panneau solaire à l'aide d'une carte à pic », *Mémoire ingénieur, université de Biskra, 2010.*
- [5]. A. BORNI, « Etude et régulation d'un circuit d'extraction de la puissance maximale d'un panneau solaire », *Mémoire ingénieurs. université de Constantine, 2009.*
- [6]. Zemouri Azeddine, «Etude experimentale d'un convertisseur dc/dc controler par une commande robuste», *Mémoire de Magistère, université de de Batna, 2014.*
- [7]. H. Merakchi, B. Goumeidane, « Optimisation d'un système solaire de pompage
- [8]. [http://www.explorateurs-energie.com/index.php/les-energies/solaire.](http://www.explorateurs-energie.com/index.php/les-energies/solaire)
- [9]. S. ABOUDA, « Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques: application aux systèmes de pompage » *Thèse de doctorat, co-tutelle de l'Université de Reims Champagne-Ardenne et de l'Université de Sfax, Avril 2015.*
- [10]. N. Abouchabana, « Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT », *Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger,2009.*

- [11]. S. ABOUDA, « Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques: application aux systèmes de pompage » *Thèse de doctorat, co-tutelle de l'Université de Reims Champagne-Ardenne et de l'Université de Sfax, Avril 2015.*
- [12]. M.S. Amamra « Optimisation de la production d'un générateur Photovoltaïque », *Mémoire master université de Ouargla 2015*
- [13]. M.S. Amamra « Réalisation d'une commande buck-boost pour PV », *Mémoire master Université Abou Bakr Belkaid Tlemcen 2018.*
- [14]. M.S. Amamra « Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaîne de conversion photovoltaïque autonome », *Thèse de doctorat Université FERHAT ABBAS 2017.*
- [15]. T. Tariq, H. Nouh «Commande d'un MPPT avec un convertisseur DC/DC pour un système photovoltaïque», *Mémoire master Université de M'sila, 2019.*