

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département : Electrotechnique

Mémoire de Projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en électrotechnique

***Systeme de commande et régulation d'une installation
photovoltaïque***

BOUHEDID YOUNES

Sous la direction de : M. AZZOUZI Hmidat Ingénieur en Electricité

Monsieur MENDACI Soufiane Docteur à l'université de Guelma

Monsieur BELKACEMI Rabie Docteur (ENP)

Présenté et soutenu publiquement le (20/06/2023)

Composition du Jury :

Président	M.Mo Mahmoudi	Professeur	ENP
Prmoteur	M.Ra Belkacemi	Docteur	ENP
Examineur	M.A. Hellal	Docteur	ENP

L'année 2023

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département : Electrotechnique

Mémoire de Projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en électrotechnique

***Systeme de commande et régulation d'une installation
photovoltaïque***

BOUHEDID YOUNES

Sous la direction de : M. AZZOUZI Hmidat Ingénieur en Electricité

Monsieur MENDACI Soufiane Docteur à l'université de Guelma

Monsieur BELKACEMI Rabie Docteur (ENP)

Présenté et soutenu publiquement le (20/06/2023)

Composition du Jury :

Président	M.Mo Mahmoudi	Professeur	ENP
Prmoteur	M.Ra Belkacemi	Docteur	ENP
Examineur	M.A. Hellal	Docteur	ENP

L'année 2023

Dédicace

*Avec Tous mes sentiments de respect . avec l'expérience de ma
reconnaissance , je dédie ma remise de diplôme et ma joie
A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur
tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,
A mes frères et mes chères sœurs pour leurs encouragements
permanents, et leur soutien moral,
A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours
universitaire,
A mes amis de l'université
Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le
fruit de votre soutien infailible,
Merci d'être toujours là pour moi*

Remerciements

Au nom de dieu le clément, le miséricordieux

Merci dieu mon seigneur, merci de votre générosité et gratitude.

Je saisis cette occasion pour exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à Monsieur AZZOUZI Hmidat et Monsieur Dr.

MENDACI Soufiane, Monsieur Belkacemi Rabie mes encadreurs de mémoire de fin d'étude, pour leurs précieux conseils et orientations tout au long de mon travail.

J'adresse également mes remerciements aux responsables, aux personnes et aux enseignants qui, par leur compréhension et leur soutien, ont contribué à la réalisation de mon travail.

Je souhaite également exprimer ma reconnaissance à ma famille et à mes amis qui, par leurs encouragements, m'ont aidé à surmonter tous les obstacles.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont participé à l'exécution de ce projet de fin d'étude

ملخص

حققت الطاقة الشمسية الكهروضوئية تقدماً كبيراً في وقت قصير وتحمل إمكانات كبيرة للعب دورٍ حاسم في انتقالنا نحو مستقبل أكثر استدامة. تهدف هذه المذكرة بشكل أساسي إلى تحسين أداء وكفاءة نظام الطاقة الشمسية الكهروضوئية من خلال استخدام خوارزمية مناسبة لتنظيم واجهة الطاقة. يركز العمل على تحليل وتنفيذ نظام طاقة شمسية مُحسَّنة باستخدام طريقة تحكُّم مُحسَّنة، وذلك لتحقيق أقصى استفادة من القدرة المولدة بواسطة مولد الطاقة الشمسية. **الكلمات المفتاحية:** مولد الكهروضوئي، محول كهربائي تيار مستمر-تيار مستمر، الطاقة المتجددة.

Abstract

Photovoltaic energy has made significant progress in a short period of time and holds great potential to play a key role in our transition towards a more sustainable future. The main objective of this paper focuses to enhance the performance and efficiency of a photovoltaic system by implementing a suitable algorithm to regulate the power interface.

The work focuses on the analysis and implementation of an optimized photovoltaic (PV) system using an improved control method (MPPT control), thereby maximizing the power output from the PV generator.

Key words: Photovoltaic Generator, Converter DC-DC, renewable energy.

Résumé

L'énergie photovoltaïque a fait d'énormes progrès en peu de temps et présente un potentiel important pour jouer un rôle clé dans notre transition vers un avenir plus durable. Ce mémoire a pour objectif principal d'améliorer les performances et l'efficacité d'un système photovoltaïque en mettant en œuvre un algorithme adapté pour réguler l'interface de puissance.

Le travail porte sur l'analyse et la mise en œuvre d'un système photovoltaïque (PV) optimisé par une commande améliorée (commande MPPT), permettant ainsi de maximiser la puissance fournie par le générateur PV.

Mots-Clé : Générateur photovoltaïque, convertisseur DC-DC, énergie renouvelable.

TABLE DES MATIERES

Liste des Figures	
Liste des Tables	
Liste des abréviations	
INTRODUCTION GENERALE	13
Introduction générale.....	14
<i>CHAPITRE I : Etat de L'art.....</i>	<i>16</i>
Introduction	17
I.2 Rayonnement Solaire.....	17
I.2.1 Les différents types de rayonnement solaire	17
I.3 L'énergie photovoltaïque	18
I.3.1 Définition	18
I.3.2 Historique.....	18
I.4 Cellule pv	19
I.4.1 Principe de l'effet pv	19
I.4.2 Type et rendement des cellules	20
<i>I.4.2.1 La cellule solaire monocristalline.....</i>	<i>20</i>
<i>I.4.2.2 La cellule solaire polycristalline :</i>	<i>20</i>
<i>I.4.2.3 La cellule solaire amorphe.....</i>	<i>21</i>
<i>I.4.2.4 Cellules à base d'autre matériaux (sans silicium)</i>	<i>21</i>
I.5 L'association des cellules.....	22
I.5.1 L'association en série des cellules :	22
I.5.2 L'association en parallèle des cellules :	23
I.5.3 Association en série/parallèle.....	24
I.6. Modules photovoltaïques.....	25
I.7. Modèle électrique d'une cellule PV	26
I.7.1 Courant de court-circuit ICC :	28
I.7.2 Tension de circuit ouvert.....	28
I.7.3 Puissance de la cellule PV.....	28
<i>I.7.3.1 Puissance maximale d'une cellule PV</i>	<i>28</i>
I.7.4 Facteur de forme :	29
I.8. Protection d'une cellule pv.....	29
I.8.1 La diode de blocage	29
I.8.2 La diode by-pass :	30
I.9 Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque	30
I.9.1 Avantages :	30
I.9.2 Inconvénients :	31
Conclusion :	31

CHAPITRE II : Modélisation et simulation du système	32
II.1 INTRODUCTION :	33
II.2 Modélisation D'un générateur Photovoltaïque.....	33
II.3 Panneaux PV.....	35
II.3.1 Simulation d'un générateur Photovoltaïque	35
II.3.1.1 Influence de la température et de l'éclairement sur le GPV :.....	37
II.3.1.2 Cas de la variation de la température :	38
II.3.1.3 Cas de la variation de l'éclairement :.....	38
II.4 Connexion directe entre le GPV et la charge.....	39
II.4.1 Etage d'adaptation entre un Générateur PV et une Charge	40
II.5 Modélisation de convertisseur statique DC-DC	41
II.5.1 Convertisseur abaisseur (Buck)	41
II.5.1.1 Principe de fonctionnement :.....	42
II.5.2 Convertisseur élévateur (Boost)	43
II.5.2.1 Principe de fonctionnement	43
II.6 Dimensionnement d'un Hacheur Boost.....	45
II.6.1 Calcul du rapport cyclique D.....	46
II.6.2 Calcul de l'inductance L	46
II.6.3 Calcul du condensateur de sortie C.....	46
Conclusion.....	49
CHAPITRE III : Simulation de Système Photovoltaïque à MPPT .	50
III.1 INTRODUCTION	51
III.2 Principe de mppt.....	51
III.3 Méthode perturbation et observation (P&O).....	52
III.3.1 Implémentation de la commande P&O sous MATLAB/SIMULINK	53
III.4 Implémentation de la commande mppt sur arduino	57
III.4.1 Model de panneaux	57
III.4.2 Capteur de courant et tension	58
III.4.3 Convertisseur DC-DC	58
III.4.4 Implémentation de la commande P&O	60
III.4.5 Analyse des résultats obtenus par Proteus.....	61
III.5 Conclusion	62
CHAPITRE IV : Réalisation et Discussions	63
IV.1 Introduction.....	64
IV.2 Description de site.....	64
IV.3 Schéma de montage utilisé	64
IV.4 Description du banc d'essais expérimental :	65
IV.4.1 Module Photovoltaïque	65
IV.4.2 Convertisseur survolteur	65
IV.4.3 Capteur de Tension :	66
IV.4.4 Capteur de courant ACS712.....	66

IV.4.5 Afficher LCD	67
IV.4.6 Logiciel arduino	67
IV.5 Assemblage complet du système photovoltaïque.....	68
IV.6 Résultats expérimentaux du montage	68
IV.7 CONCLUSION	69
CONCLUSION GENERALE	70
<i>REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE.....</i>	<i>72</i>

LISTE DES FIGURES

- **Figure 1** : Encombrement théorique nécessaire pour répondre à l'électricité demande mondiale, Europe (EU-25) et Allemagne (Data DLR, 2005).....14

Chapitre I :

- **Figure I.1**: Les différentes composantes du rayonnement solaire.....18
- **Figure I.2**: Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire.....20
- **Figure I.3**: cellule solaire monocristalline.....20
- **Figure I.4**: cellule solaire polycristalline.....21
- **Figure I.5** : Cellule solaire amorphe.....21
- **Figure I.6** : Schéma de la mise en série de plusieurs cellules PV.....23
- **Figure I.7**: Caractéristique Courant-Tension (I-V) de plusieurs cellules PV mise en série.....23
- **Figure I.8** : Schéma de la mise en parallèle de plusieurs cellules PV.....24
- **Figure I.9**: Caractéristique Courant-Tension de plusieurs cellules PV mise en parallèle.....24
- **Figure I.10** : Association mixte des cellules PV..... 24
- **Figure I.11** : Un module photovoltaïque..... 25
- **Figure I.12**: Schéma équivalent d'une cellule PV.....26
- **Figure I.13**: caractéristique (I-V) d'une cellule PV.....27
- **Figure I.14**: caractéristique (P-V) d'une cellule PV.....27
- **Figure I.15**: Protection de cellule solaire dans un module PV par la diode anti-retour.....29
- **Figure I.16**: Protection de cellule solaire dans un module PV par la diode by-pass.....30

Chapitre II :

- **Figure II.1**: Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.....33
- **Figure II.2** : Schéma bloc d'un GPV sous Matlab/Simulink.....35
- **Figure II.3** : Schéma bloc du courant I_D , I_0 , I_{sh}36
- **Figure II.4**: caractéristique I-V d'une cellule.....37
- **Figure II.5** : caractéristique P-V d'une cellule.....37
- **Figure II.6**: Influence de température sur les caractéristiques Courant-Tension.....38
- **Figure II.7**: Influence de température sur les caractéristiques Puissance-Tension.....38
- **Figure II.8**: Influence de l'irradiation sur les caractéristiques Courant-Tension.....39
- **Figure II.9**: Influence de l'irradiation sur les caractéristiques Puissance-Tension.....39
- **Figure II.10**: Points de fonctionnement du GPV connecté directement aux charges DC.....40

• Figure II.11 : chaine de conversion photovoltaïque avec MPPT.....	.41
• Figure II.12 : Schéma de base d'un convertisseur Buck.....	42
• Figure II.13 : Convertisseur Buck à l'état passant.....	42
• Figure II.14 : Convertisseur Buck à l'état bloqué.....	.43
• Figure II.15 : Schéma de base d'un convertisseur Boost.....	43
• Figure II.16 : Schéma du Boost (K fermé).....	44
• Figure II.17 : Schéma du Boost (K ouvert).....	45
• Figure II.18 : schéma bloc de simulation.....	47
• Figure II.19 : icharge.....	48
• Figure II.20 : Igpv.....	48
• Figure II.21 : Vcharge.....	48
• Figure II.22 : Pout.....	48
• Figure II.23 : courbe de tension de charge ; zoomés au régime permanant.....	49

Chapitre III :

• Figure III.1 : Schéma de base d'une alimentation utilisant des panneaux solaires	51
• Figure III.2 : Représentation de la phase d'observation de la méthode P&O dans la caractéristique P-V	52
• Figure III.3 : Organigramme de l'algorithme P&O	53
• Figure III.4 : Structure du système global.....	54
• Figure III.5 : la commande P&O.....	54
• Figure III.6 : Profil de l'irradiation.....	55
• Figure III.7 : Tension du panneau.....	55
• Figure III.8 : Courant du panneau.....	55
• Figure III.9 : Puissance du panneau.....	56
• Figure III.10 : Puissance du panneau en fonction de tension.....	56
• Figure III.11 : Tension de la charge.....	57
• Figure III.12 : Courant de la charge.....	57
• Figure III.13 : Puissance de la charge.....	57
• Figure III.14 : Simulation d'un panneau solaire avec ses caractéristiques.....	58
• Figure III.15 : Capteur de courant et Tension.....	58
• Figure III.16 : Boost réalisé sur Proteus.....	59
• Figure III.17 : Tensions obtenues par Proteus.....	59
• Figure III.18 : Courant obtenues par Proteus.....	60

- **Figure III.19** : Puissance obtenues par Proteus.....60
- **Figure III.20** : Système Complet..... ..60
- **Figure III.21** : Courant du panneaux et courant de la charge.....61
- **Figure III.22** : Tension de la charge et tension du panneaux.....61

Chapitre IV :

- **Figure IV.1** : schéma de contrôle MPPT..... 64
- **Figure IV.2** : Divel Solar-100M (36)..... 65
- **Figure IV.3** : Convertisseur DC-DC..... 66
- **Figure IV.4** : Signal de la commande..... .66
- **Figure IV.5** : Capteur De Tension..... 66
- **Figure IV.6** : Capteur De Courant..... 67
- **Figure IV.7** : Afficheur LCD..... 67
- **Figure IV.8** : Interface de logiciel..... .68
- **Figure IV.9** : Montage du système complet.....68

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I :

- **Tableau I.1 :** Type des cellules solaires sans silicium..... 22

Chapitre II :

- **Tableaux III.1 :** Paramètres du convertisseur Boost..... 54
- **Tableau III.2 :** Paramètres du Boost..... 59

Chapitre IV :

- **Tableaux IV 1 :** Caractéristiques du boost..... 65
- **Tableau IV.2 :** les relevés de résultats..... 69

Liste Des Abréviation

PV : Photovoltaïque

GPV : Générateur Photovoltaïque

STC : les conditions standard ($G=1000\text{w/m}^2$, $T=25^\circ\text{c}$, AM 1.5)

PPM : Point de puissance maximale

MPPT : Maximum power point Tracking

PWM : Pulse width Moduling

P&O : Perturbation et Observation

DC : courant continu

AC : courant alternatif

***INTRODUCTION
GENERALE***

Introduction générale

La consommation mondiale d'énergie ne cesse de croître, posant des questions cruciales sur le problème du réchauffement climatique, dû aux gaz à effet de serre, et sur l'épuisement accéléré des ressources fossiles. Suite à cette prise de conscience globale et notamment des gouvernements, un développement économique respectueux de l'environnement s'avère absolument nécessaire. À l'heure où nous sommes confrontés à des choix écologiques et aux nécessaires économies d'énergie, font que l'énergie photovoltaïque devient de plus en plus une solution parmi les options énergétiques prometteuses avec des avantages, l'absence de toute pollution et la disponibilité en plus ou moins grandes quantités en tout point du globe terrestre. L'énergie solaire photovoltaïque (ou énergie photovoltaïque ou EPV) est l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. Elle est dite renouvelable, car sa source (le Soleil) est considérée comme inépuisable à l'échelle du temps humain.

L'Université allemande de Braunschweig a calculé suffisamment d'espace sur la carte pour alimenter le monde en énergie en utilisant uniquement des panneaux solaires.

Big Square : L'énergie qui en découle est suffisante pour le monde entier.

Carré du milieu : suffisant pour les pays de l'Union européenne.

Petit carré : Assez pour le Moyen-Orient. [1]

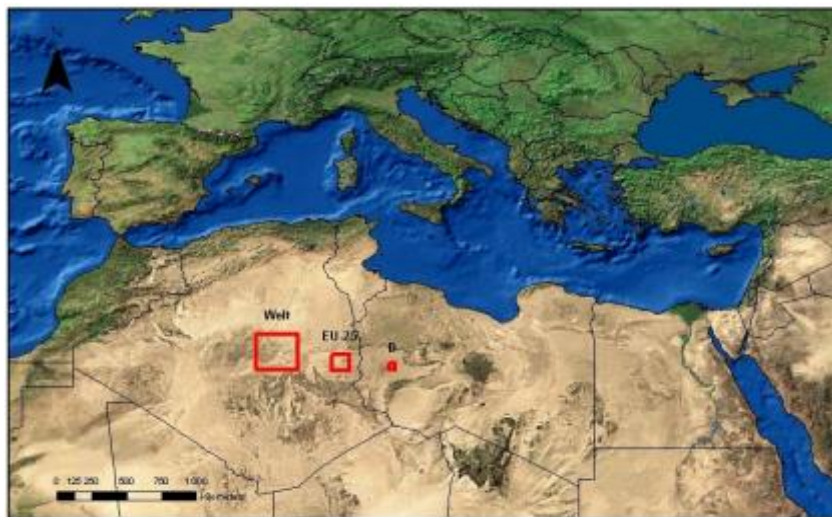


Figure 1: Encombrement théorique nécessaire pour répondre à l'électricité demande mondiale, Europe (EU-25) et Allemagne (Data DLR, 2005). [1]

L'objectif de ce travail est de faire l'étude de commande et régulation photovoltaïque.

Pour décrire cela, ce mémoire est présenté en quatre parties :

Dans le premier chapitre de ce travail nous allons présenter des généralités sur l'énergie solaire en Algérie et le système photovoltaïque en introduisant le principe et l'effet. Ainsi comment effectuer avantageusement.

Dans le Second chapitre nous étudions la simulation d'un panneau solaire de type 100 w et les caractéristiques de ce dernier dans les différents paramètres en utilisant un logiciel spécifique : le **Matlab**.

Dans le troisième chapitre Nous présenterons la technique de commande MPPT appelée P&O, suivie d'une étude de simulation sur MATLAB pour évaluer son efficacité. La deuxième partie de ce chapitre sera consacrée à l'étude en vue de l'implémentation du MPPT P&O sur une carte ARDUINO, réalisée à l'aide du logiciel spécialisé Proteus.

Dans le dernier chapitre nous aborderons une étude longitudinale sur le système photovoltaïque au niveau « Annaba innovation centre » de la région d'Annaba, Cette étude portera sur la réalisation d'un système complet comprenant d'un panneau solaire, un boost et l'implémentation du MPPT sur Arduino. Dans un premier temps, nous décrirons en détail le protocole de l'étude, puis dans une seconde partie, nous présenterons les résultats obtenus. Enfin, nous conclurons ce travail par une conclusion générale.

CHAPITRE I

Etat de L'art

Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque est la conversion de la lumière solaire en électricité à l'aide de cellules photovoltaïques. Ces cellules sont connectées en série et/ou en parallèle pour former des modules photovoltaïques ou des panneaux solaires (PV). Un ensemble de modules regroupés dans une centrale solaire photovoltaïque constitue un champ photovoltaïque. Le terme "photovoltaïque" est dérivé de "photo" qui fait référence à la lumière et "voltaïque" qui désigne la production d'électricité.

Dans ce chapitre, nous commencerons par présenter les connaissances de base relatives à l'énergie photovoltaïque. Ensuite, nous expliquerons le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque. Enfin, nous aborderons le développement de l'utilisation de l'énergie solaire en Algérie.

I.2 Rayonnement Solaire

Le soleil émet une quantité considérable d'énergie, appelée énergie solaire, ou rayonnement solaire. Ce dernier est de très loin la principale source d'énergie naturelle de la Terre, les autres sources sont toutes négligeables au regard de celle-ci, Leur somme représente moins de 1 % du rayonnement solaire :(flux de chaleur géothermique généré par l'intérieure la Terre, radioactivité naturelle et rayonnement cosmique). [2].

Il commande la majeure partie des grands processus terrestres, notamment météorologique et Biologiques. Ainsi il fournit 99.98 % de l'énergie nécessaire au fonctionnement climatique ; ensemble des espèces végétales et animales doit la vie aussi directement ou indirectement à lui. Mais ce n'est pas tout : sa lumière peut aussi être transformée en électricité. [3]

I.2.1 Les différents types de rayonnement solaire

La puissance émise par le soleil est estimée à $1.7 \cdot 10^{23}$ kW dont une très petite partie atteint le globe terrestre ; elle est ; ordre de $8.5 \cdot 10^{13}$ kW. Uniquement 70% (environ $6 \cdot 10^{13}$ kW) de cette puissance pénètre l'atmosphère. Le rayonnement solaire arrive au sol, soit directement soit après certaines atténuations ou déperditions résultant des phénomènes d'absorption et/ou de diffusion par les aérosols (poussières de diverses origines), les molécules d'eau et les différents gaz (azote, oxygène, gaz carbonique...) présents dans l'atmosphère. On décompose le rayonnement global ou rayonnement total terrestre (Fig.1) en rayonnement direct, rayonnement provenant directement du soleil et en rayonnement diffus, rayonnement provenant d'atmosphère ou de la voûte céleste. [4]

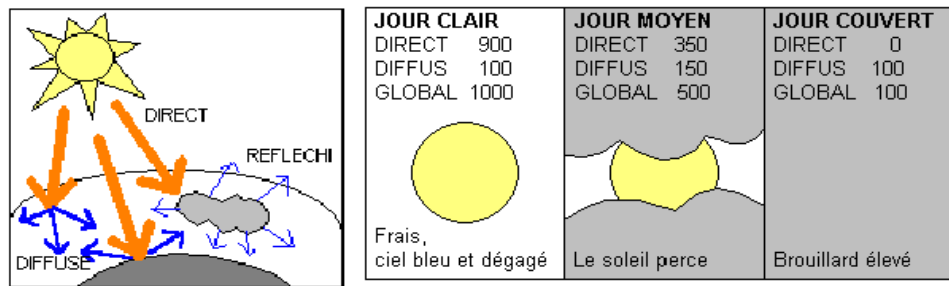


Figure I.1: Les différentes composantes du rayonnement solaire [4]

I.3 L'énergie photovoltaïque

Dans ce chapitre quelques notions préliminaires sur le rayonnement solaire nécessaire pour la compréhension du photovoltaïque ont été présentées. L'Algérie a un important potentiel solaire, ce qui en fait un marché attractif pour le développement de projets photovoltaïques.

Le gouvernement algérien a mis en place des politiques et des programmes pour encourager l'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque. Des projets d'installations de centrales photovoltaïques de grande envergure sont actuellement en cours de développement dans différentes régions du pays pour répondre à la demande croissante en électricité.

I.3.1 Définition

Lorsque la cellule est exposée à la lumière, les électrons sont mis en mouvement par l'énergie des photons qui pénètrent dans le matériau semi-conducteur, générant ainsi un courant électrique. [5]

Le semi-conducteur le plus couramment utilisé parmi ceux-ci est le silicium, qui est largement présent dans la croûte terrestre et dans le sable. Il se présente sous trois formes : monocristalline, polycristalline et amorphe. Bien que le silicium cristallin soit actuellement utilisé dans 90% des panneaux solaires produits dans le monde, il existe de nombreuses autres technologies déjà industrialisées, telles que les couches minces, ainsi que des technologies en phase de recherche [6].

I.3.2 Historique

En 1839, le physicien français Edmond Becquerel a été le premier à décrire l'effet photovoltaïque, et en 1912, Einstein a expliqué ses mécanismes. Cependant, jusqu'aux années 50, cela est resté une curiosité scientifique de laboratoire. Becquerel a découvert que certains matériaux produisaient une petite quantité d'électricité lorsqu'ils étaient exposés à la lumière. Heinrich Hertz a étudié cet effet dans les solides tels que le sélénium dès les années 1870. Avec des rendements d'environ 1%, le sélénium a rapidement été adopté par les photographes comme

un luxmètre. [7].

Dès les années 1950, les équipes des laboratoires Bell ont réalisé des progrès rapides en fabriquant la première cellule solaire en silicium cristallin avec un rendement de 4% grâce au procédé de tirage Czochralski. L'industrie des semi-conducteurs a largement contribué au développement des cellules solaires. La taille des cellules photovoltaïques a suivi la progression de la taille des plaquettes de l'industrie des circuits intégrés, passant de 5,08 cm au début des années 70 à 7,62 cm à la fin des années 70, puis à 10,16 cm au début des années 80. Avec la découverte de la croissance de lingots multicristallins parallélépipédiques, des plaquettes carrées de 10 cm de côté ont été obtenues, et elles atteignent aujourd'hui couramment des dimensions de 12,5 à 15 cm de côté [7].

I.4 Cellule pv

La cellule photovoltaïque fonctionne comme une diode spéciale à jonction PN, capable de produire de l'énergie électrique lorsqu'elle est exposée à la lumière.

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique qui forme la base du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque. Il se manifeste par la génération d'une force électromotrice lorsque la surface de la cellule est exposée à la lumière. La tension produite par la cellule peut varier entre 0,3 V et 0,7 V, en fonction de facteurs tels que le matériau utilisé, sa disposition, la température et le vieillissement de la cellule. [8].

I.4.1 Principe de l'effet pv

Le fonctionnement de la cellule solaire peut être décrit comme suit : lorsque les photons d'énergie ($E_{ph} = h\nu$) provenant du rayonnement solaire pénètrent dans la cellule, elles transfèrent leur énergie aux atomes de la jonction. Si cette énergie est suffisante, elle peut provoquer la transition des électrons de la bande de valence à la bande de conduction du matériau semi-conducteur, formant ainsi des paires d'électrons et de trous. Les électrons et les trous sont maintenus séparés par un champ électrique, créant ainsi une barrière de potentiel. Lorsqu'une charge est connectée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N se déplacent vers les trous de la zone P à travers la connexion externe, générant ainsi une différence de potentiel et permettant la circulation d'un courant électrique. [8].

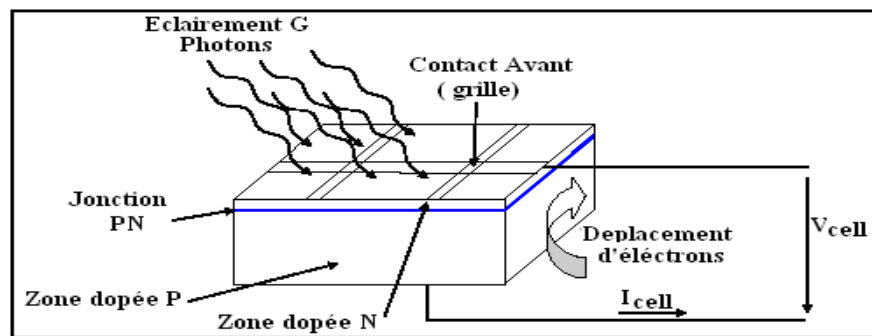


Figure I.2: Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire [8].

I.4.2 Type et rendement des cellules

Il existe différents types de cellules photovoltaïques, et chaque type de cellules à un rendement et un coût qui lui est propre. On site au suivant les types les plus connus :

I.4.2.1 La cellule solaire monocristalline

Les cellules monocristallines sont fabriquées à partir d'un monocristal de silicium scindé en deux couches, obtenu par croissance ou étirage d'un lingot cylindrique grâce au procédé Czochralski ou CZ. Ces cellules sont les plus proches du modèle théorique et ont le meilleur rendement (15%-25%) comparé à d'autres cellules en silicium. Cependant, leur coût de production est élevé car la méthode de fabrication est laborieuse, ce qui se traduit par un prix plus élevé pour les consommateurs [9].

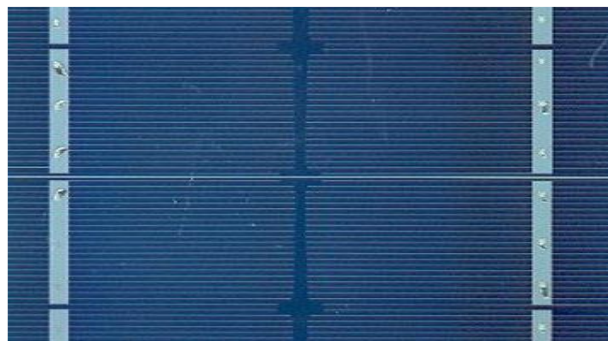


Figure I.3: cellule solaire monocristalline

I.4.2.2 La cellule solaire polycristalline :

Les cellules solaires polycristallines (aussi appelées multicristallines, poly-Si ou multi-Si) sont fabriquées à l'aide du processus de Siemens, un procédé chimique de purification. Cette méthode consiste à faire fondre des fragments de silicium puis à les solidifier pour obtenir des cellules avec de nombreux cristaux. Bien que leur surface soit moins parfaite que celle des cellules monocristallines, les cellules polycristallines sont plus faciles à produire et donc moins

chères. Cependant, leur efficacité est légèrement inférieure (15% à 17%), ce qui signifie qu'elles ont besoin de modules PV relativement plus grands pour produire la même quantité d'électricité que les cellules monocristallines. Malgré cela, leur coût inférieur en fait une option populaire pour les projets de grande envergure. [10].



Figure I.4: Cellule solaire polycristalline

1.4.2.3 La cellule solaire amorphe

La cellule solaire amorphe (également connue sous le nom d'a-Si) est fabriquée par décharge lumineuse, pulvérisation ou évaporation, contrairement au silicium cristallin, qui a une structure atomique régulière. Le silicium amorphe présente plutôt une structure atomique irrégulière. Cela permet une interaction plus fréquente entre les photons et les atomes de silicium dans le matériau amorphe, ce qui augmente l'absorption de la lumière. Par conséquent, des films de silicium amorphe ultra-minces de moins de 1 μm peuvent être produits et utilisés pour la production d'énergie. Les cellules amorphes sont moins chères, mais leur efficacité est la plus faible, allant de 5 % à 7 %. Cela signifie qu'elles nécessitent plus de surface pour produire la même quantité d'électricité que les cellules cristallines, mais leur coût inférieur en fait une option intéressante pour certaines applications [9].

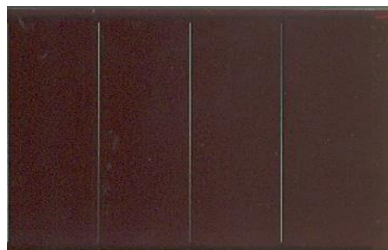


Figure 5: Cellule solaire amorphe

1.4.2.4 Cellules à base d'autre matériaux (sans silicium)

Au cours des dernières années, les chercheurs et les fabricants ont découvert des nouveaux types de matériaux photovoltaïques qui peuvent être des excellents remplaçants pour le silicium, ces matériaux sont cités dans le tableau ci-dessous [9]:

Type de cellule	Efficacité	Caractéristiques
GIGS	22%	<ul style="list-style-type: none"> • Meilleure absorption de la lumière. • Faible coût
GaAs	29%	<ul style="list-style-type: none"> • Bonne résistance à la température • Taux de conversion élevé.
CdTe	22%	Moins sensible à l'ombrage et aux élévations de température.
Dye sensitizel	14%	<ul style="list-style-type: none"> • Faible coût. • Rob Robustesse mécanique
Provskite	22%	<ul style="list-style-type: none"> • Coefficient d'absorption élevé. • Faible coût.
Multijunction	33.16%	meilleure efficacité

Tableau I.1 : Type des cellules solaires sans silicium

I.5 L'association des cellules

I.5.1 L'association en série des cellules :

La tension de sortie d'une cellule photovoltaïque est limitée par la tension du gap du semi-conducteur utilisé. Pour augmenter la tension de sortie, il est courant de connecter plusieurs cellules en série. Dans ce cas, les cellules sont parcourues par le même courant et la tension de sortie du générateur est proportionnelle au nombre de cellules connectées en série. [10].

En termes d'équations on aura : $V_{co\ ns} = N_s V_{co}$

$$I_{cc} = I_{cc\ ns}$$

Avec :

- $V_{co\ ns}$: Tension aux bornes de N_s cellules en série
- N_s : Nombre de cellules en série
- V_{co} : Tension aux bornes d'une seule cellule
- I_{cc} : Courant traversant une cellule
- $I_{cc\ ns}$: Courant traversant N_s cellules en série

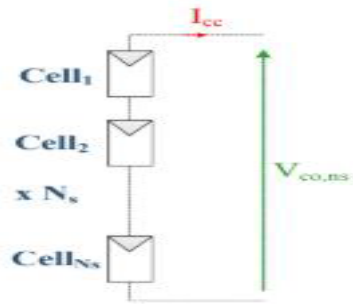


Figure I.6: Schéma de la mise en série de plusieurs cellules PV [11]

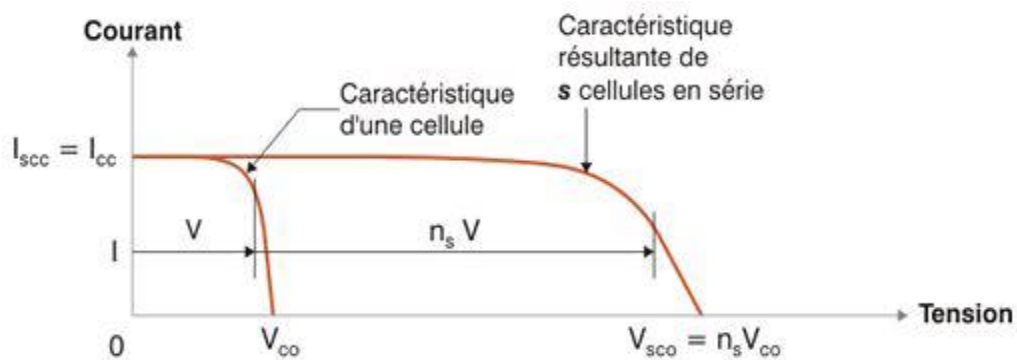


Figure I.7: Caractéristique Courant-Tension (I-V) de plusieurs cellules PV mise en série [11]

I.5.2 L'association en parallèle des cellules :

Lors de l'association en parallèle de cellules photovoltaïques, il est important de s'assurer que les tensions de chaque cellule sont identiques. Le courant total obtenu est alors égal à la somme des courants de chaque cellule élémentaire, multiplié par le nombre de cellules connectées en parallèle. La tension de sortie reste quant à elle constante. [10].

$$I_{cc\ np} = N_p I_{cc}$$

$$V_{co\ np} = V_{co}$$

Avec :

- $I_{cc\ np}$ Courant traversant
- N_p cellules en parallèle. N_p Nombre de cellules en parallèle.
- $V_{co\ np}$ Tension aux bornes de N_p cellules en parallèle.

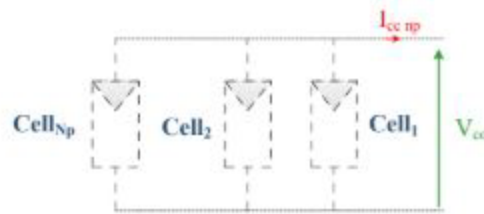


Figure I.8 : Schéma de la mise en parallèle de plusieurs cellules PV [10].

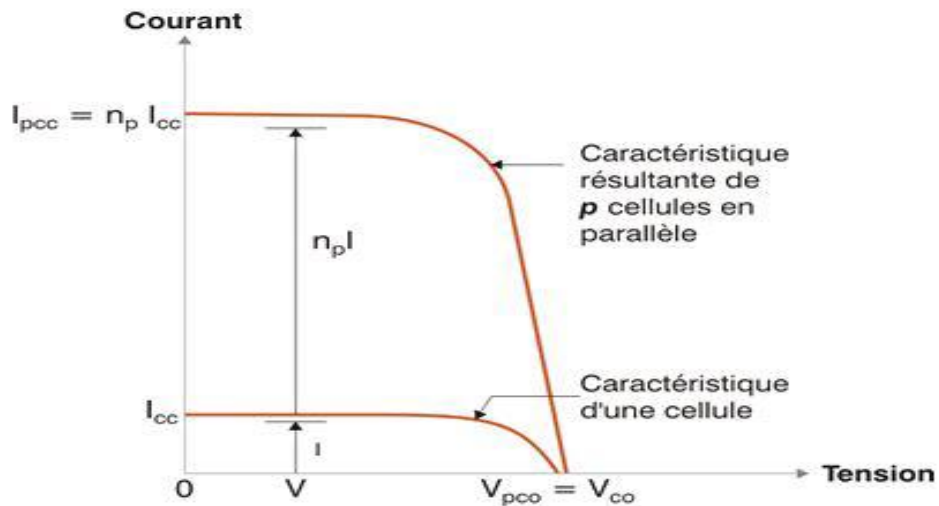


Figure I.9: Caractéristique Courant-Tension (I-V) de plusieurs cellules PV mise en parallèle [10].

I.5.3 Association en série/parallèle

Les valeurs du courant de court-circuit total et de la tension à vide totale dépendent de l'association en série et en parallèle des cellules photovoltaïques [10]. Ces grandeurs peuvent être calculées à partir des relations suivantes :

- $I_{spcc} = n_p \cdot I_{cc}$ et $V_{spco} = n_s \cdot V_{co}$
- n_p : nombre de cellule en parallèle.
- n_s : nombre de cellule en série.

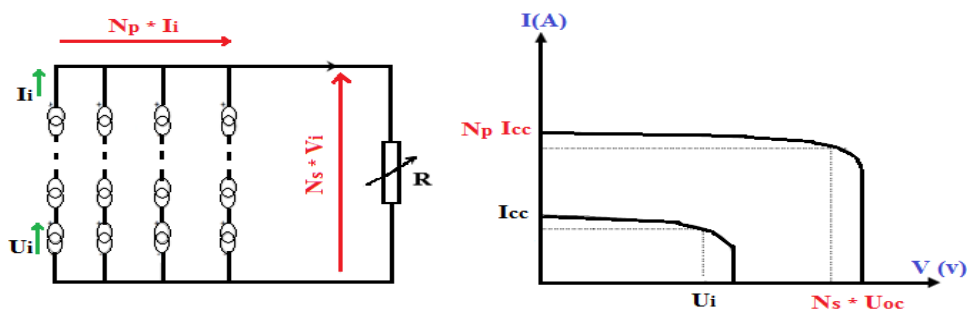


Figure 10: Association mixte des cellules PV. [10]

I.6. Modules photovoltaïques

Un module photovoltaïque est l'élément le plus important d'une installation photovoltaïque, car il représente la source d'énergie électrique... Un module photovoltaïque est donc un ensemble de cellules connectées en série, en parallèle ou en série parallèle pour un courant et une tension bien définie. La puissance de sortie disponible du générateur photovoltaïque est donnée par :

$$P_{pv} = N_s \cdot V_{pv} \cdot N_p \cdot I_{pv}$$

et :

- P_{pv} : puissance disponible en sortie GPV
- V_{pv} : Tension à la sortie GPV
- I_{pv} : courant de sortie GPV
- N_s : nombre de cellules en série
- N_p : nombre de batteries connectées en parallèle

Les modules photovoltaïques à base de silicium sont les plus répandus sur le marché, qu'ils soient monocristallins (représentant 64% du marché avec une efficacité de conversion de l'énergie solaire incidente en électricité de 15 à 18%), polycristallins (représentant 28% du marché avec une efficacité de conversion de 13 à 15%) ou amorphes (représentant 13% du marché avec une efficacité de conversion de 5 à 12%). Ces modules fournissent des tensions normalisées (12, 24, 48V) et des puissances allant de 10 à 100 Wc (Watt-crête : puissance maximale obtenue sous un ensoleillement optimal [12]).



Figure 11: Un module photovoltaïque [13]

I.7. Modèle électrique d'une cellule PV

Afin de simuler le comportement réel d'une cellule photovoltaïque, il est nécessaire d'utiliser un modèle mathématique. Le modèle le plus couramment utilisé dans les travaux de simulation est illustré dans la figure (12), car il offre un bon compromis entre précision et complexité grâce à sa simplicité [14].

C'est un modèle à cinq paramètres qui se compose d'une source de courant modélisant, une diode en antiparallèle, une résistance shunt et une résistance série [15].

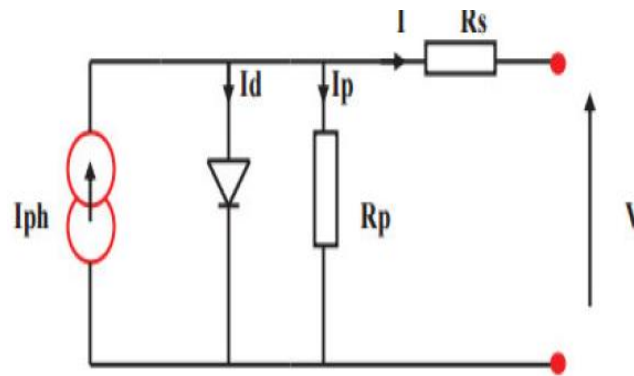


Figure I.12: Schéma équivalent d'une cellule PV

Le courant de sortie de la cellule est donné par :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D - I_{sh}$$

- I_{pv} : Courant généré par la cellule photovoltaïque
- I_{ph} : Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident)
- I_D : Courant qui circule à travers la diode.

L'expression du courant de la diode I_D est donnée par l'équation de Shockley :

$$I_D = I_0 \left[e^{\left(\frac{q(V_{pv} + R_{s,1c} \cdot I_{pv})}{n \cdot K \cdot T} \right)} - 1 \right]$$

- n : est la facteur d'idéalité de la diode il varie entre 1 et 2.
- q : charge de l'électron ($q = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{C}$).
- K : Constante de Boltzmann ($K = 1,380662 \cdot 10^{-23} \text{J} \cdot \text{K}^{-1}$).

L'expression du courant qui traverse la résistance en parallèle $R_{sh,1c}$ est donnée par :

$$I_{sh} = \frac{V_{pv} + R_{s,1c} \cdot I_{pv}}{R_{sh,1c}}$$

- V_{pv} : tension de sortie de la cellule

- $R_{s,1c}$: la résistance série de sortie de la cellule
- $R_{sh,1c}$: la résistance shunt de sortie de la cellule

Donc, au final, le modèle à 5 paramètres d'une cellule est donné par :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[e \left(\frac{q(V_{pv} + R_{s,1c} \cdot I_{pv})}{n \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + R_{s,1c} \cdot I_{pv}}{R_{sh,1c}}$$

On utilisant les relations précédentes on peut avoir les caractéristiques d'une seule cellule PV suivantes :

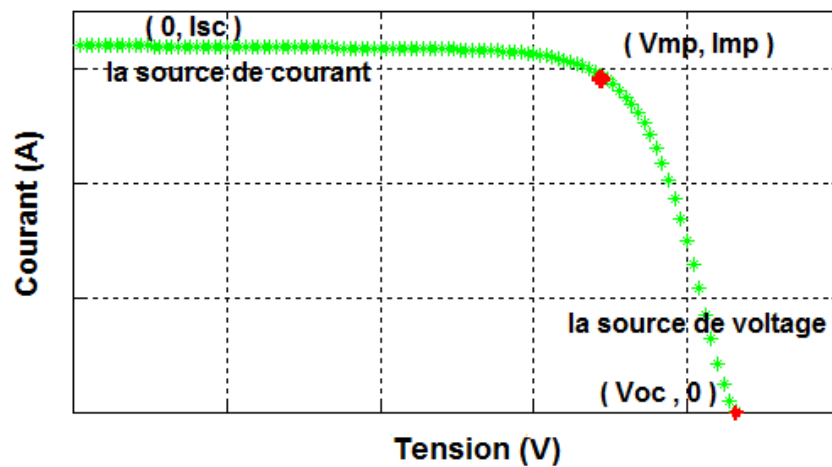


Figure I.13: caractéristique (I-V) d'une cellule PV [14]

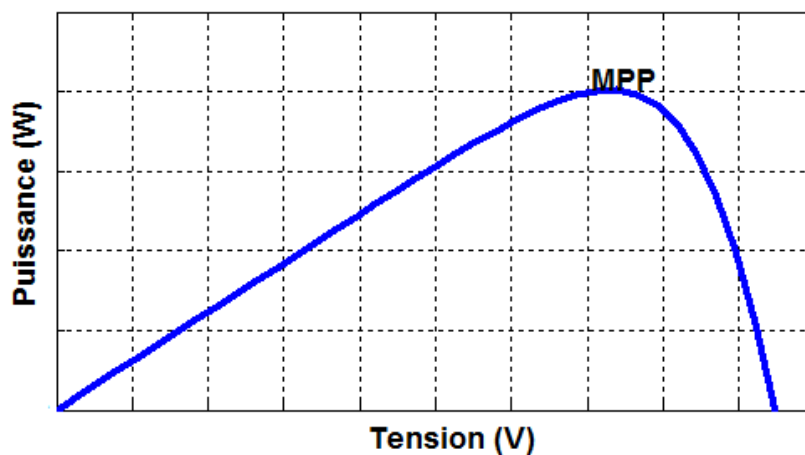


Figure I.14: caractéristique (P-V) d'une cellule PV [14]

On déduit que le courant et la puissance, ils ne sont pas linéairement sur toute la plage de variation de la tension de la cellule. De plus il faut noter que le point représente à une certaine tension inférieure à la tension du circuit ouvert V_{OC} et un courant inférieur au courant de court-circuit I_{SC} . Dans la cellule il présente un point de puissance maximale PPM.

I.7.1 Courant de court-circuit ICC :

C'est le courant correspondant à la tension aux bornes de cellule ou du générateur PV est nul
On peut écrire : $I_{cc} (V = 0) = I_{ph}$

$$I_{cc} = I_{ph} - I_0 \left[e^{\left(\frac{R_{s,1c} I_{cc}}{VT} \right)} - 1 \right] - \frac{R_{s,1c} \cdot I_{cc}}{R_{sh,1c}}$$

On négliger le terme $I_0 \left[e^{\left(\frac{R_{s,1c} I_{cc}}{VT} \right)} - 1 \right]$ Devant I_{ph} (dont la résistance série est faible)

L'expression devient :

$$I_{cc} = \frac{I_{ph}}{1 + \frac{R_{s,1c}}{R_{sh,1c}}}$$

I.7.2 Tension de circuit ouvert

La tension V_{co} en circuit ouvert est obtenue lorsque le courant traversant la cellule est nul.
Son expression est déduite de l'équation suivante :

$$0 = I_{ph} - I_0 \left[e^{\left(\frac{V_{co}}{VT} \right)} - 1 \right] - \frac{V_{co}}{R_{sh}}$$

Donc On peut écrire :

$$V_{co} = VT \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right)$$

I.7.3 Puissance de la cellule PV

En maintenant des conditions de fonctionnement constantes telles que l'éclairement, la température et la vitesse de circulation de l'air ambiant, la puissance électrique $P(W)$:

$P = VI$

- $P(w)$: Puissance fournie par la cellule PV.
- $V(V)$: Tension mesurée aux bornes de la cellule PV.
- $I(A)$: Intensité débitée par la cellule PV.

I.7.3.1 Puissance maximale d'une cellule PV

Le terme "puissance maximale" d'un module photovoltaïque fait référence à la valeur de puissance électrique la plus élevée que le panneau solaire peut fournir dans des conditions de test solaire standard (STC). Ces conditions standard comprennent une température de 25°C, une irradiance de 1000 W/m² et une masse d'air égale à 1,5. Les cellules photovoltaïques fournissent des valeurs de puissance différentes en fonction de leur point de fonctionnement, et le point de

fonctionnement correspondant à P_{max} est appelé le point de puissance maximale [16]

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

$$P_{max} = V_{P_{max}} \times I_{P_{max}}$$

I.7.4 Facteur de forme :

Rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance maximale que peut avoir la cellule :

V_{co} , I_{cc}

Il est donné par :

$$FF = \frac{P_{mpp}}{V_{co} \times I_{cc}}$$

I.8. Protection d'une cellule pv

Une installation photovoltaïque est destinée à produire de l'énergie électrique pendant des années, donc nous devons assurer la protection électrique de cette installation pour éviter les pannes le plus dangereuses.

Pour cette raison, Deux types de protection sont utilisés dans les installations actuelles

I.8.1 La diode de blocage

La diode anti-retour empêchant un courant négatif dans les PV. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit [17].

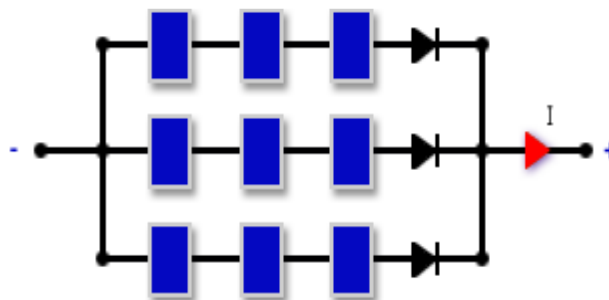


Figure I.15: Protection de cellule solaire dans un module PV par la diode anti-retour. [17].

I.8.2 La diode by-pass :

Les diodes by-pass peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairage n'est pas homogène (effet d'ombrage) évitant ainsi l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées [17].

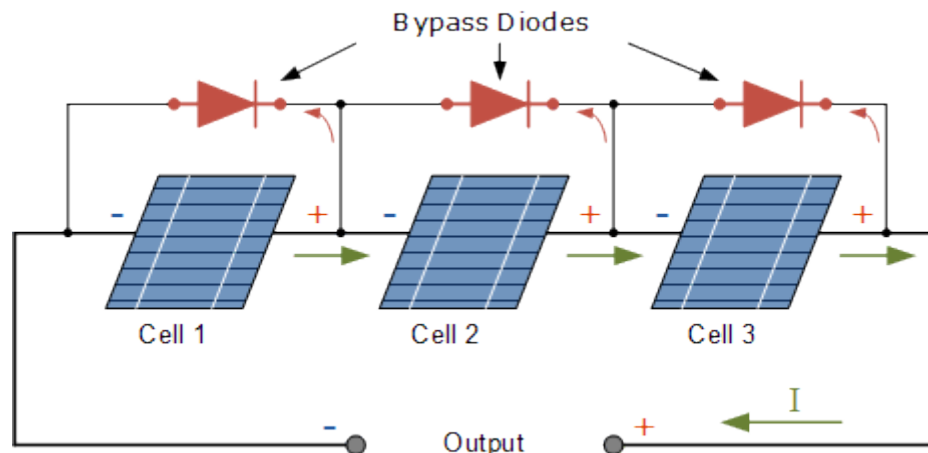


Figure I.16: Protection de cellule solaire dans un module PV par la diode by-pass [17].

I.9 Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque

I.9.1 Avantages :

Il existe de nombreux avantages associés à l'énergie solaire photovoltaïque :

- Les systèmes photovoltaïques sont connus pour leur fiabilité exceptionnelle.
- L'énergie photovoltaïque peut être exploitée partout, que ce soit dans un village isolé en montagne ou dans le centre d'une grande ville, grâce à la disponibilité universelle de la lumière solaire.
- Les panneaux photovoltaïques ont un coût de fonctionnement extrêmement bas, car ils nécessitent peu d'entretien, n'utilisent pas de combustible, ne nécessitent pas de transport supplémentaire et ne requièrent pas de personnel hautement spécialisé.
- Parmi les avantages de l'énergie solaire, on peut mentionner sa fiabilité, la longévité des panneaux solaires qui dépasse souvent les 25 ans, son autonomie et son faible impact sur l'environnement.
- En tant que technologie émergente, l'énergie solaire est souvent compétitive par rapport aux solutions conventionnelles dans les zones éloignées du réseau électrique qui ne nécessitent pas de grandes quantités d'électricité, ainsi que dans les zones urbaines où elle permet d'éviter les coûts de raccordement au réseau électrique public. Son coût est donc un avantage significatif dans ces contextes.

I.9.2 Inconvénients :

- La production d'énergie des panneaux photovoltaïques est étroitement liée à l'ensoleillement, qui est un facteur variable en permanence.
- Les panneaux photovoltaïques requièrent un investissement initial considérable en raison de leur coût élevé
- Au fil du temps, le rendement électrique des panneaux photovoltaïques diminue, avec une diminution d'environ 20 % après 20 ans d'utilisation
- Besoin d'espace : Les installations photovoltaïques nécessitent souvent une certaine superficie de terrain ou de toiture pour installer les panneaux solaires, ce qui peut être un défi dans les zones urbaines denses ou les espaces limités
- L'utilisation de batteries pour stocker l'énergie photovoltaïque entraîne une augmentation des coûts d'installation.

Conclusion :

L'objectif de ce chapitre est de fournir toutes les informations nécessaires pour développer des modèles photovoltaïques et des circuits pouvant être utilisés dans des simulations pour des applications photovoltaïques. Nous avons débuté par une revue des notions de base sur le rayonnement solaire et son utilisation dans le domaine photovoltaïque. Ensuite, nous avons détaillé le fonctionnement des cellules photovoltaïques, leur processus de fabrication ainsi que leurs caractéristiques clés, tout en abordant les mesures de protection correspondantes. Pour conclure, nous avons analysé les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

CHAPITRE II
Modélisation et
simulation du système

II.1 INTRODUCTION :

Dans ce chapitre, nous entreprendrons la modélisation d'un panneau solaire en analysant ses divers paramètres tels que la température et l'irradiation. Nous approfondirons ensuite l'étude des convertisseurs statiques, en nous concentrant spécifiquement sur le dimensionnement d'un convertisseur survolteur (Boost). Enfin, nous procéderons à une simulation du convertisseur Boost à l'aide de Matlab/Simulink.

II.2 Modélisation D'un générateur Photovoltaïque

Nous présentons dans cette partie l'implémentation du modèle du générateur photovoltaïque à l'aide de Matlab/Simulink. Pour ce faire, nous utilisons le modèle électrique d'une seule cellule qui est décrit dans le premier chapitre.

La cellule photovoltaïque fonctionne comme une diode et peut être représenté par un modèle électrique à cinq paramètres, comme illustré sur la figure (2.1).

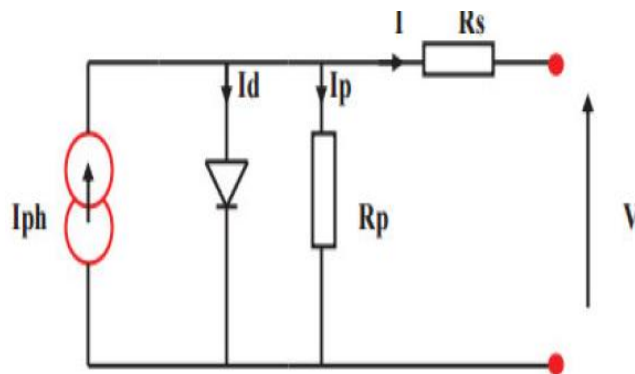


Figure II.1: Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque

Le modèle est constitué des éléments suivants : une source de courant, une diode, une résistance série R_s qui représente les pertes thermiques (perte de chaleur), ainsi qu'une résistance shunt qui prend en compte les courants de fuite.

Ce modèle permet de déterminer le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque en utilisant l'équation suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (2.1)$$

Avec

- I_{pv} : Courant généré par la cellule photovoltaïque
- I_{ph} : Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident)
- I_D : le courant qui circule à travers la diode.

Alors :

$$I_{ph} = (I_{scSTC} + K_i(T_i - 298)) \frac{G}{1000} \quad (2.2)$$

- I_{sc} : le courant de court-circuit ;
- I_{scSTC} : le courant de court-circuit dans les conditions STC ;
- G_n : le rayonnement solaire de référence = 1000 w/m²;
- K_i : le courant de court-circuit de cellule à 25c et 1000 w/m²
- T_n : la température nominale ou bien de référence [k].

$$I_D = I_0 \left[e \left(\frac{q(V_{pv} + R_s I)}{n \cdot K \cdot N_s \cdot T} \right) - 1 \right] \quad (2.3)$$

Le courant de saturation inverse I_0 dans les conditions STC est :

$$I_{0STC} = I_{rsSTC} = \frac{I_{phSTC} \frac{V_{ocSTC}}{R_p}}{e^{\frac{V_{oc}}{V_T}} - 1} \quad (2.4)$$

Avec : $I_{phSTC} = I_{scSTC} \quad (2.5)$

Cette expression avec une température variable s'écrit comme suite :

$$I_0 = I_{rs} = I_{0STC} \left(\frac{T}{T_n} \right)^3 e^{\frac{qE_{g0}}{nK} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right)} \quad (2.6)$$

$$I_{sh} = \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (2.7)$$

- V_{pv} : tension de sortie du panneau
- R_s : la résistance série,
- R_{sh} : la résistance shunt,
- q : la charge de l'électron = $1,6 \cdot 10^{-19}c$,

B : le facteur de qualité ou bien d'idéalité de la cellule,

K : la constante de Boltzmann = $1.38 \cdot 10^{-23} J/K$,

La formule du courant sera

$$I_{pv} = \frac{[I_{sc} + K_i(T - T_{STC})]G}{G_{STC}} - I_0 \left[e^{\left(\frac{q(V_{pv} + R_S \cdot I)}{n \cdot K \cdot N_S \cdot T} \right)} - 1 \right] - \frac{V_{pv} + R_S \cdot I}{R_{sh}} \quad (2.8)$$

II.3 Panneaux PV

Pour cette étude, nous avons utilisé le module photovoltaïque Divel Solar-100M (36) équipé de 36 cellules solaires en silicium polycristallin connectées en série, permettant une production maximale de 100 watts. Nous avons ainsi pu mesurer la puissance en fonction de la tension et le courant en fonction de la tension du module étudié, dans des conditions d'éclairement de 1000 W/m² et de température de 25°C.

II.3.1 Simulation d'un générateur Photovoltaïque

On fait dans cette partie une simulation d'un générateur PV, pour analyser et interpréter le fonctionnement d'un générateur photovoltaïque, nous avons programmé l'équation du modèle à l'aide de Matlab Simulink. En utilisant le module mathématique de la cellule photovoltaïque à cinq (5) paramètres, nous avons créé un schéma bloc Simulink représenté dans la Figure II.2 :

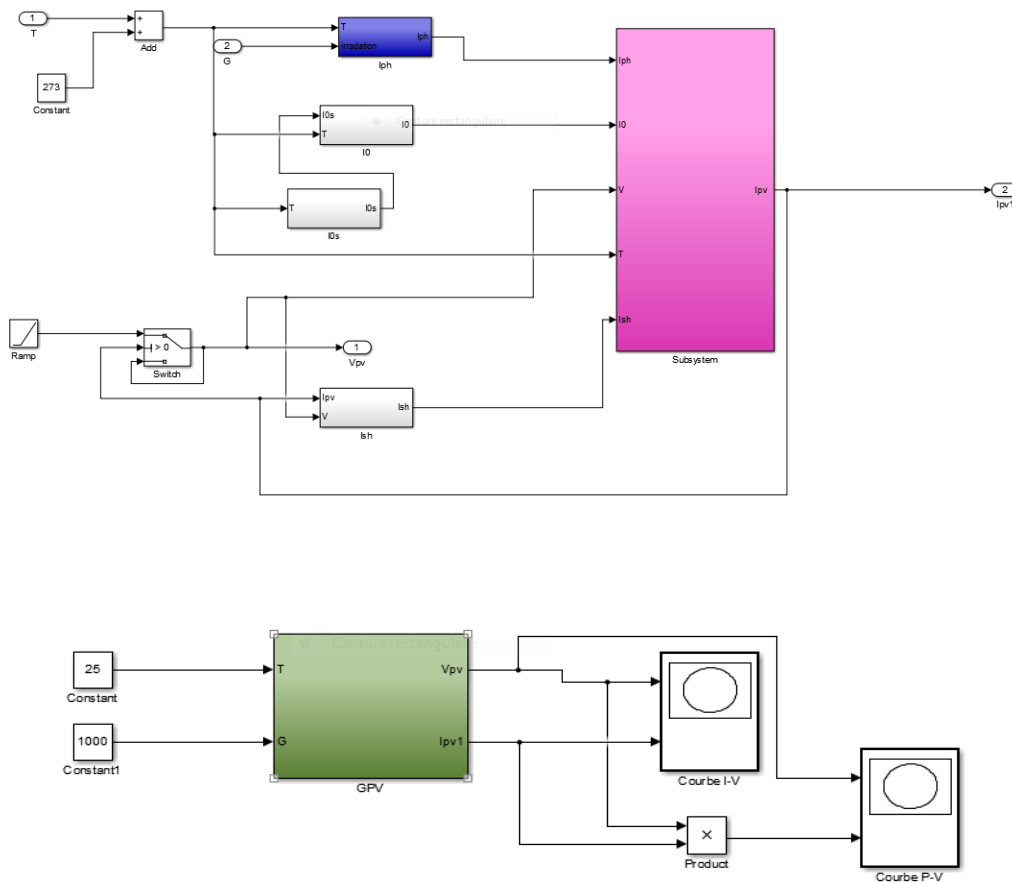


Figure II.3 : schéma bloc d'un GPV sous Matlab/Simulink

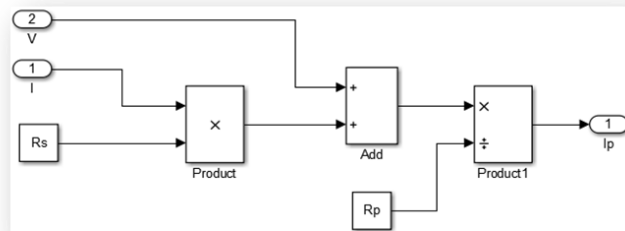
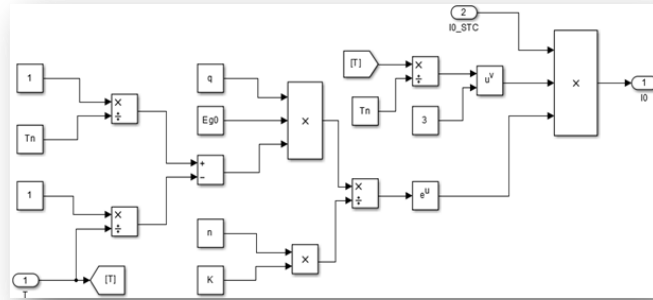
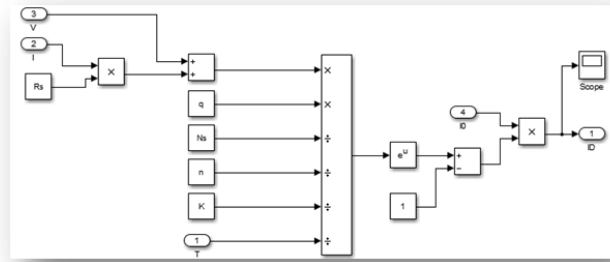


Figure II.3 : Schéma bloc du courant I_D , I_0 , I_{sh} .

la caractéristique de $P=f(V)$ et la caractéristique de $I=f(V)$ pour un éclairement de $G=1000W/m^2$ et une température de $T=25^\circ C$.

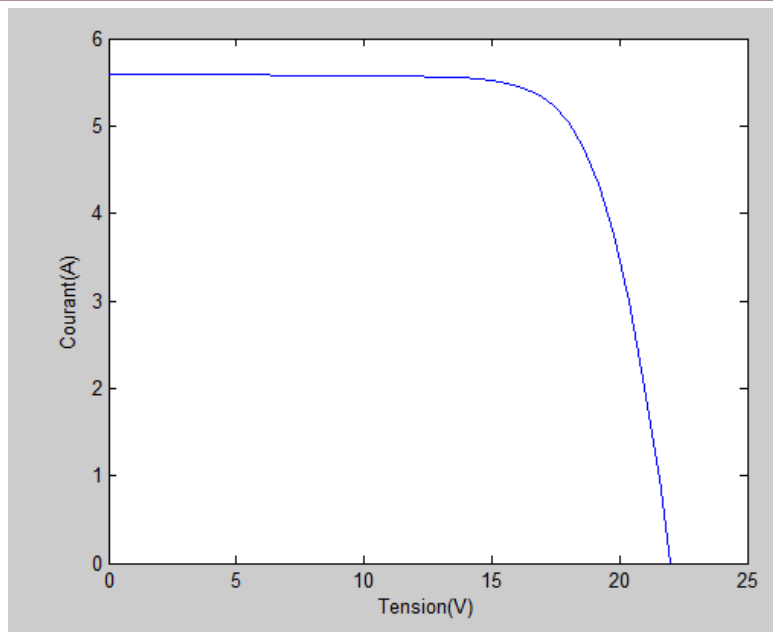


Figure II.4: caractéristique I-V d'une cellule.

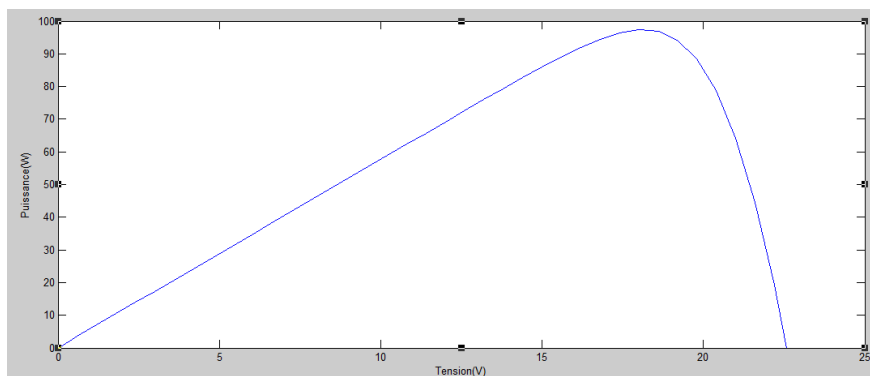


Figure II.5 : caractéristique P-V d'une cellule.

La figure (4) illustre la relation entre le courant généré par le module et la tension pour une température et un éclairement fixé à 25°C et 1000 W/m², respectivement. Nous pouvons remarquer que le courant reste constant jusqu'à ce que la tension atteigne 16 V, après quoi il diminue rapidement jusqu'à atteindre zéro. D'autre part, la figure (5) montre la relation entre la puissance générée par le module et la tension, toujours à la même température et éclairement fixés. On peut constater que la puissance augmente linéairement jusqu'à la valeur maximale de 100 W, puis diminue rapidement jusqu'à atteindre zéro.

II.3.1.1 Influence de la température et de l'éclairement sur le GPV :

Afin d'analyser l'influence des conditions externes, à savoir la température et l'éclairement

(G,T), sur les caractéristiques (I-V) et (P-V), nous avons modifié la température tout en maintenant l'éclairement constant

II.3.1.2 Cas de la variation de la température :

Les deux tests de simulation illustrés dans les figures II.5 et II.6 ont été réalisés en fonction de la température T (°C) suivante : [55, 40, 22, 15], avec un éclairement constant de G = 1000 W/m²

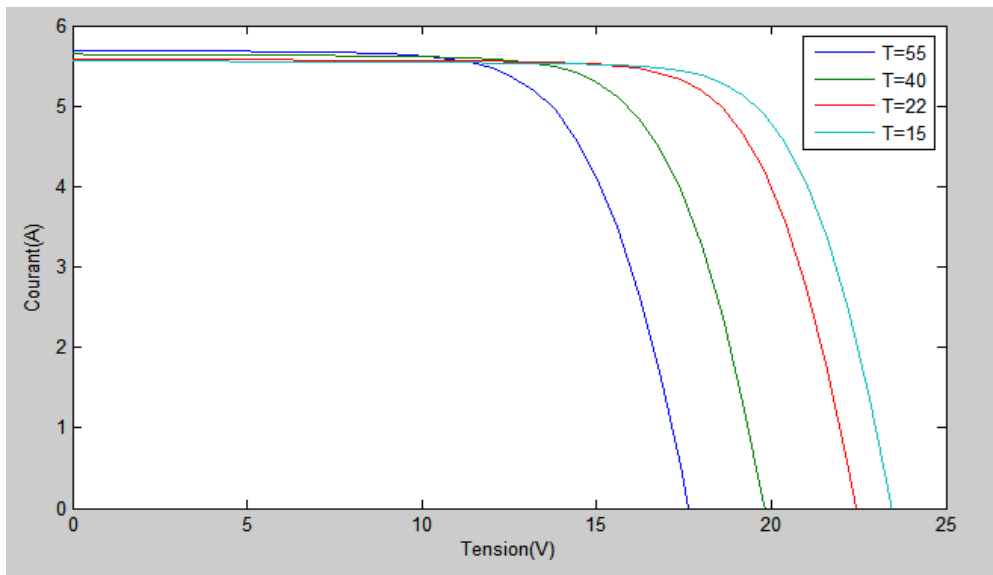


Figure II.6: Influence de température sur les caractéristiques Courant-Tension

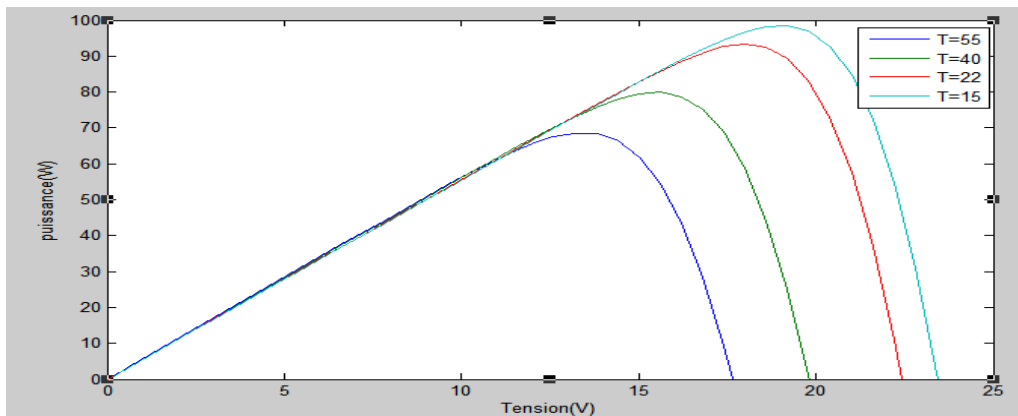


Figure II.7: Influence de température sur les caractéristiques Puissance-Tension

Les graphiques révèlent que l'élévation de la température engendre une baisse de la tension à vide (V_{co}) du module photovoltaïque, ce qui traduit une relation inverse. Toutefois, cette variation n'affecte pas le courant (I_{cc}) qui demeure constant

II.3.1.3 Cas de la variation de l'éclairement :

G (W/m²) = [1000 850 650 450 250]

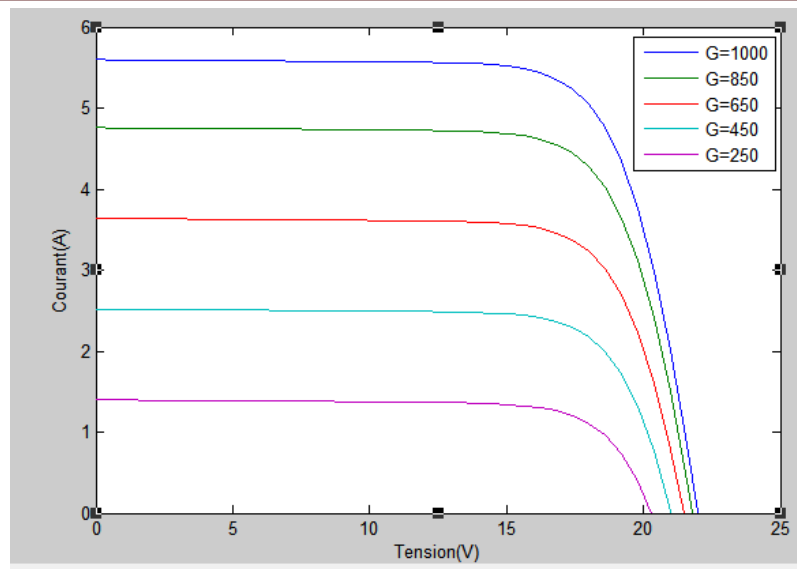


Figure II.8: Influence de l'irradiation sur les caractéristiques Courant-Tension

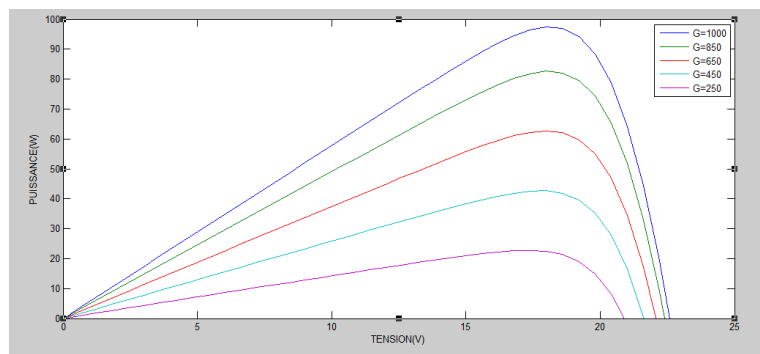


Figure II.9: Influence de l'irradiation sur les caractéristiques Puissance-Tension

En se basant sur ces schémas, il est possible de constater que la croissance de l'intensité lumineuse induit une hausse du courant de court-circuit (I_{cc}) du module photovoltaïque, et qu'il existe une relation proportionnelle entre les deux. En revanche, cette variation n'affecte guère la tension à vide (V_{co}), qui demeure pratiquement stable.

II.4 Connexion directe entre le GPV et la charge

La charge DC peut être : une charge purement résistive, une charge de type source de tension ou une charge de type source de courant. La figure (II.10) illustre les caractéristiques (I-V) et (P-V) d'un générateur photovoltaïque ainsi que celles des trois types de charges. Les points de fonctionnement A, B, C sont obtenus à partir de l'intersection entre la caractéristique I-V du GPV et celles des trois types de charge. Le fonctionnement optimal correspond au PPM qui est déterminé par la tension optimale V_{opt} et le courant optimal des trois points. Cependant, les puissances fournies par le générateur dans les points PA, PB et

PC sont inférieures à la puissance maximale disponible. Ainsi, l'ajout d'un étage d'adaptation est nécessaire pour remédier à ce problème. [18]

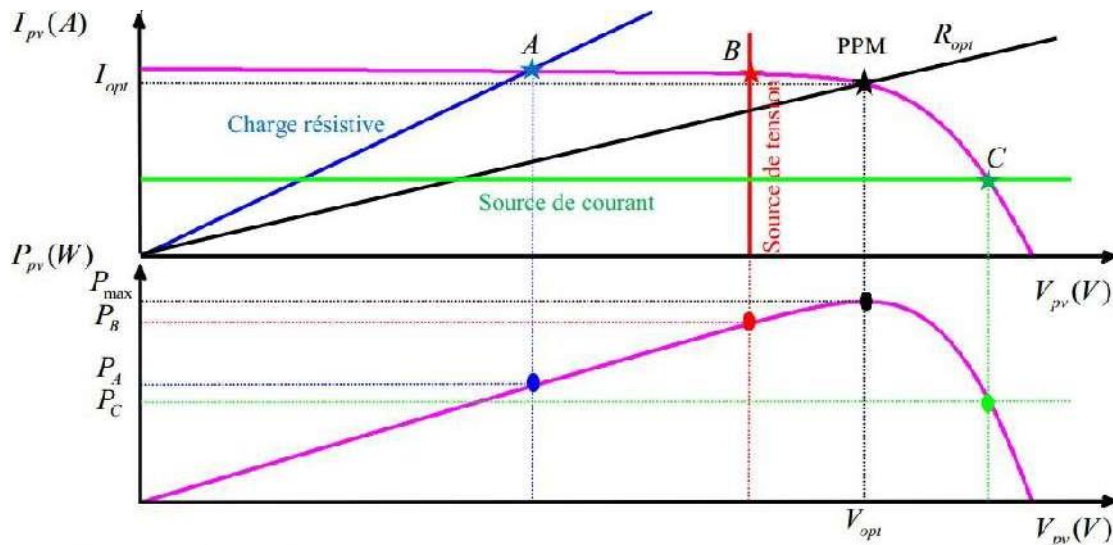


Figure II.10: Points de fonctionnement du GPV connecté directement aux charges DC [18]

Ainsi, pour que la connexion source-charge soit optimale et permette un transfert de puissance maximal, il est nécessaire que la courbe des caractéristiques électriques de la charge passe par le point (V_{opt} , I_{opt}) du générateur. Cependant, dans de nombreux cas, la courbe extraite à la sortie du GPV et connectée directement à une charge est éloignée de ce point optimal.

II.4.1 Etage d'adaptation entre un Générateur PV et une Charge

Les caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque étant non linéaires et dépendantes des conditions climatiques, il est difficile de fournir une puissance maximale pour une tension et un courant donnés. Ainsi, l'ajout d'un étage supplémentaire entre le panneau et la charge (ou le réseau électrique) est nécessaire pour assurer le transfert de la puissance maximale disponible. Cet étage joue le rôle d'interface et permet de contrôler le transfert de puissance pour qu'il soit le plus proche possible de P_{max} disponible.[19] La figure (11) illustre toute une chaîne de conversion photovoltaïque basée sur la technique MPPT.

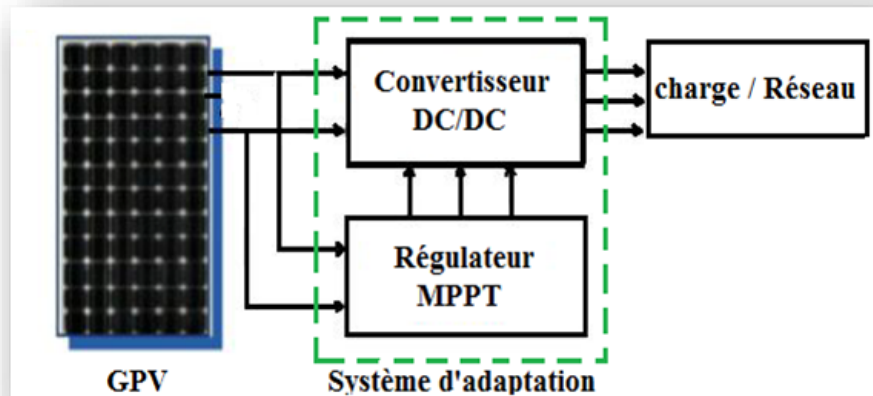


Figure II.11 : chaîne de conversion photovoltaïque avec MPPT.

Le choix de la structure de conversion va dépendre des caractéristiques électriques du module PV et de la charge qui est connectée. En PV, le convertisseur statique (convertisseur de puissance DC/DC) est couramment utilisé comme adaptateur entre le panneau photovoltaïque et la charge ou le réseau électrique. Ce convertisseur est choisi en fonction de la charge alimenter. Il peut être survolteur, dévolteur, ou même dévolteur -survolteur

Dans ce travail, nous avons utilisé le convertisseur DC-DC Boost qui le convertisseur statique est le plus fréquemment utilisé dans les systèmes de conversion solaire.

II.5 Modélisation de convertisseur statique DC-DC

Les hacheurs, également appelés convertisseurs DC-DC, sont utilisés dans les systèmes d'énergie solaire afin d'ajuster la source de courant continu à amplitude variable provenant du panneau PV à la charge qui requiert, en général, une tension DC constante.

Les trois configurations de base sont :

- Convertisseur dévolteur (ou Buck)
- Convertisseur survolteur (ou boost)
- Convertisseur dévolteur- survolteur (Buck-boost)

II.5.1 Convertisseur abaisseur (Buck)

Le convertisseur DC/DC permet d'ajuster le point de fonctionnement du panneau solaire à la charge, en particulier si la tension de sortie du convertisseur est inférieure au point nominal de fonctionnement du générateur PV [20].

Dans le cas d'un convertisseur Buck, la tension d'entrée peut être calculée à l'aide de la formule suivante :

$$V_i = \frac{V_s}{D} \quad (2.9), \text{ où}$$

V_i représente la tension d'entrée, V_s est la tension de sortie

D correspond au rapport cyclique du convertisseur.

II.5.1.1 Principe de fonctionnement :

Le convertisseur abaisseur utilise un interrupteur K (commutateur) commandé sans isolation entre la source d'entrée et la sortie (Figure II.12). Le fonctionnement de ce convertisseur peut être scindé en deux configurations [21].

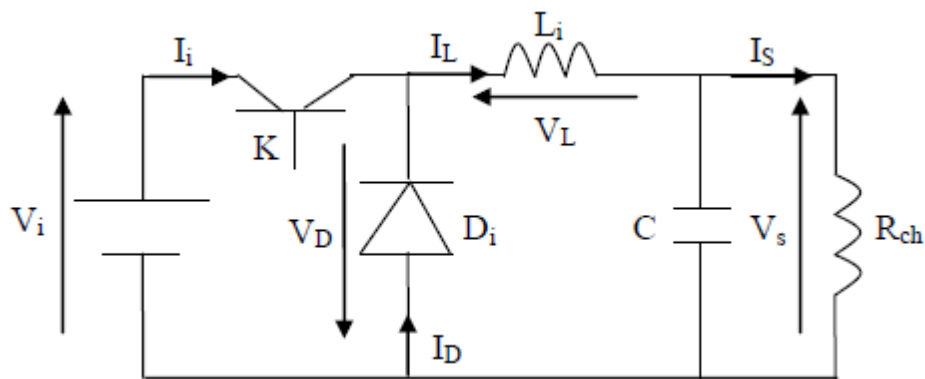


Figure II.12 : Schéma de base d'un convertisseur Buck.

L'état passant

Dans cet état l'interrupteur K est fermé, la tension aux bornes de l'inductance vaut

$$V_L = V_i - V_s \quad (2.10)$$

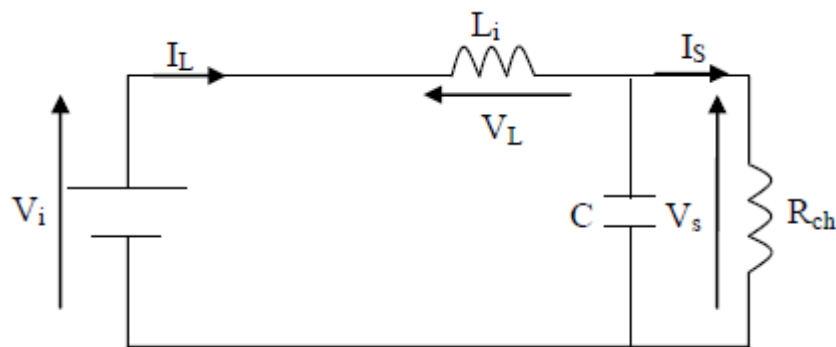


Figure II.13 : Convertisseur Buck à l'état passant

L'état bloqué

L'interrupteur K est ouvert (Figure II.14), Afin d'assurer la continuité du courant dans l'inductance, la diode devient passante.

La tension de sortie est :

$$V_S = -V_L \quad (2.11)$$

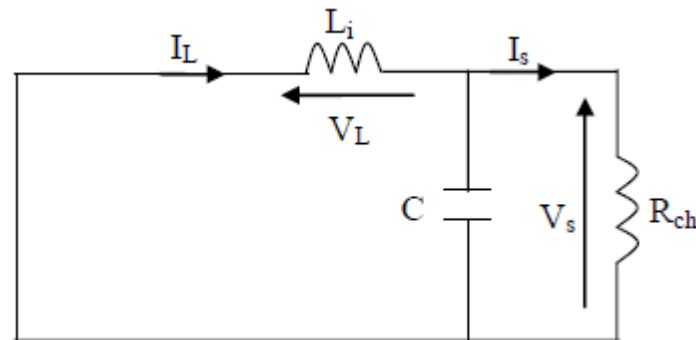


Figure II.14 : Convertisseur Buck à l'état bloqué

II.5.2 Convertisseur élévateur (Boost)

Le circuit Boost est illustré dans la figure II.15 et est fréquemment utilisé dans les systèmes alimentés par batterie qui nécessitent des tensions d'alimentation élevées [22]. Dans ce cas, le convertisseur permet de diminuer le nombre de composants nécessaires pour obtenir la tension requise. Cette fonctionnalité sera utilisée pour extraire le MPP. Le rapport entre les tensions d'entrée et de sortie peut être calculé à l'aide de la formule suivante :

$$V_S = \frac{V_e}{1-D} \quad (2.12)$$

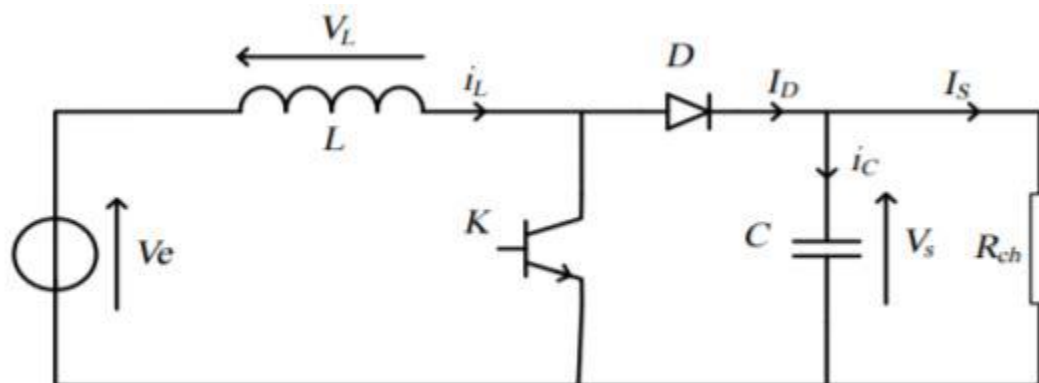


Figure II.15 : Schémas de base d'un convertisseur Boost

II.5.2.1 Principe de fonctionnement

On peut localiser le point de puissance optimale d'un générateur photovoltaïque à l'aide de ce convertisseur élévateur.

Le circuit étant alimenté par une source de tension V_i , le fonctionnement d'un convertisseur Boost peut être divisé en deux phases distinctes selon l'état de l'interrupteur K [23].

L'état passant

Une phase d'accumulation, Pendant l'interrupteur est fermée ($0 < t < DT$) (voir Figure II.16), le courant dans l'inductance augmente et l'énergie est stockée sous forme d'énergie magnétique. La diode dans ce cas est bloquée, et la charge sera déconnectée de la source.

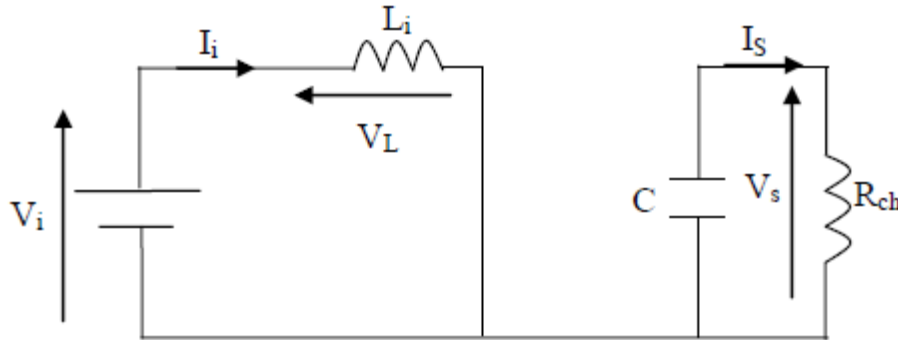


Figure II.16 : Schéma du Boost (K fermé).

La tension aux bornes de l'inductance est :

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} \quad (2.13)$$

La tension du panneau PV est égale à celle aux bornes de l'inductance :

$$V_S = V_L = L \frac{dI_L}{dt} \approx L \frac{\Delta I_L}{\Delta t_{on}} = L \frac{\Delta I_L}{T_{on}} \quad (2.14)$$

Ce qui donne :

$$\Delta I_L = \frac{V_S * T_{on}}{L} \quad (2.15)$$

L'état bloqué

A l'instant $t = DT$, l'interrupteur K s'ouvre ($DT < t < T$) Pendant la phase suivante, la diode devient passante, le courant traverse l'inductance, le condensateur et la charge, ce qui permet le transfert de l'énergie accumulée vers la capacité. et comme l'inductance est en série avec le générateur, sa tension va s'ajouter à celle du générateur : c'est l'effet survolteur

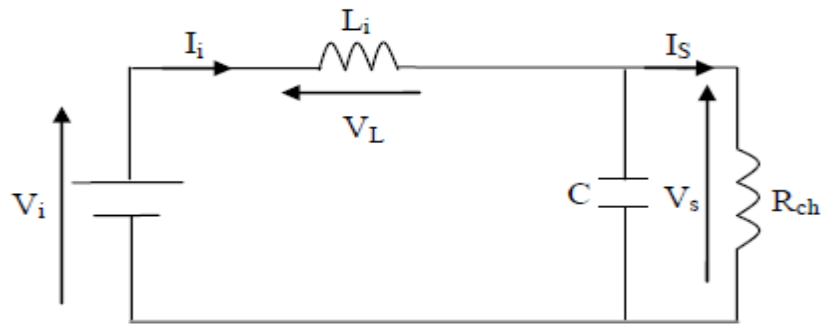


Figure II.17 : Schéma du Boost (K ouvert).

A partir de cette maille on peut écrire :

$$V_S = V_i - L \frac{dI_L}{dt} \quad (2.16)$$

Et comme le courant dans la bobine est en diminution, la quantité $\frac{dI_L}{dt} < 0$ ce qui donne

$$V_S = V_i - \left(-L \frac{dI_L}{dt}\right) = V_i + L \frac{dI_L}{dt} = V_i + L \frac{\Delta I_L}{T_{off}} \quad (2.17)$$

On remplace l'équation (2.15) dans (2.17) on obtient

$$\begin{aligned} V_S &= V_i + L \frac{V_i * t_{on}}{t_{off}} = V_i + \frac{V_i * t_{on}}{t_{off}} = V_i \left(1 + \frac{t_{on}}{t_{off}}\right) \\ &= V_i \left(\frac{t_{off} + t_{on}}{t_{off}}\right) = V_i \left(\frac{T}{T - t_{on}}\right) = V_i \left(\frac{T/T}{(T - t_{on})/T}\right) \\ V_S &= V_i \left(\frac{1}{1 - D}\right) \end{aligned} \quad (2.18)$$

II.6 Dimensionnement d'un Hacheur Boost

Cette partie décrit une approche pour le dimensionnement rapide des convertisseurs Boost. L'équation générale suivante permet de calculer la puissance fournie par un générateur photovoltaïque à la charge :

$$P_{ch} = V_{ch} I_{ch} \quad (2.19)$$

Pour une charge résistive R, la puissance peut être calculée à l'aide de l'équation :

$$P_{ch} = \frac{V_{ch}^2}{R} \quad (2.20)$$

Alors, la tension de sortie du convertisseur Boost peut être déduite à partir de l'une des deux équations suivantes :

$$V_{ch} = \frac{P_{ch}}{I_{ch}} \quad \text{ou} \quad V_{ch} = \sqrt{R \cdot P_{ch}}$$

En règle générale, le rendement des convertisseurs Boost est très élevé, proche de 100 %. Par conséquent, on peut supposer que la puissance de sortie Pch est égale à la puissance maximale du panneau photovoltaïque.

II.6.1 Calcul du rapport cyclique D

Pour calculer le rapport cyclique D, nous utilisons l'équation (2.21), ce qui donne :

$$D = 1 - \frac{V_{pv}}{V_S} = \frac{V_S - V_{pv}}{V_S}$$

II.6.2 Calcul de l'inductance L

Lors du calcul de la valeur de l'inductance, il est important de prendre en considération la valeur d'ondulation autorisée du courant. En général, cette valeur est d'environ 10% du courant nominal de la charge. on peut écrire l'équation suivante :

$$\Delta I_L = 0.1 * I_L \quad (2.22)$$

ΔI : est la valeur de l'ondulation maximale du courant.

Dans le cas où l'interrupteur est on (T_{on}):

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{pv}}{L} = \frac{\Delta I_L}{\Delta T} = \frac{\Delta I_L}{D \cdot T} \implies L = \frac{D \cdot T \cdot V_{pv}}{\Delta I_L} = \frac{D \cdot V_{pv}}{f_{sw} \cdot \Delta I_L} \quad (2.23)$$

f_{sw} : est la fréquence de découpage donnée par le cahier de charge.

II.6.3 Calcul du condensateur de sortie C

Dans le processus de calcul de la valeur du condensateur de sortie C, il est supposé que la forme de la tension est triangulaire et que l'ondulation de la tension de charge ne dépasse généralement pas 3% de sa valeur moyenne. On aura pour le cas où l'interrupteur est fermé (T_{on}):

$$C \cdot \frac{dV_S}{dt} = I_S \approx C \cdot \frac{\Delta V_S}{D \cdot T} = C \cdot \frac{\Delta V_S \cdot f_{sw}}{D} \implies C = \frac{D \cdot I_S}{\Delta V_S \cdot f_{sw}} \quad (2.24)$$

Avec : $\Delta V_S = 0.03 * V_S$

Exemple de dimensionnement d'un Boost

Dans cette partie, nous allons appliquer la méthode proposée pour dimensionner un Boost pour un panneaux solaires. (100Wc)

On a: $P_i = P_{pv} = 100w$; $V_{pv(oc)} = 22.7 V$; $f_{sw} = 10^3 Hz$. $R = 50 \Omega$

Le courant de source est $I_{sc} = I_L = \frac{P_{pv}}{V_{pv}} = 100/22.7 = 4.40A$

- De l'équation (2.20) $V_{ch} = \sqrt{R \cdot P_{ch}} = \sqrt{50 * 100} = 70.71 V$

- De l'équation (2.19) $I_{ch} = \frac{P_{ch}}{V_{ch}} = 100/70.71 = 1.414 A$

- L'équation (2.21) donne $D = \frac{V_{ch} - V_{pv}}{V_{ch}} = \frac{70.71 - 22.7}{70.71} = 0.68 = 68\%$

- De l'équation (2.23) on a $L = \frac{D \cdot V_{pv}}{f_{sw} \cdot \Delta I_L} = \frac{0.69 * 22.7}{1000 * 0.22} = 0.07016 H = 70.16 mH$

- De l'équation (2.24) $C = \frac{D \cdot I_{ch}}{\Delta V_{ch} \cdot f_{sw}} = \frac{0.68 * 1.414}{2.12 * 1000} = 453.55 \cdot 10^{-6} F = 454 \mu F$

La figure II-18 présente le schéma bloc de simulation. Ce schéma inclut une source continue avec une puissance de $P_{pv}=100 W$ et une tension de $V_{pv}=22,7 V$, ainsi qu'une charge résistive de $R=50 \Omega$. Le dimensionnement du convertisseur Boost a été effectué selon la méthode décrite précédemment et son contrôle est assuré par une technique PWM simple.

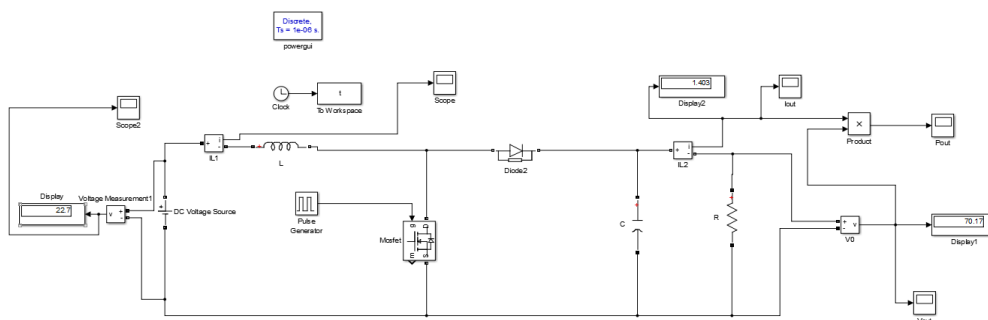


Figure II.18 : schéma bloc de simulation

Les figures suivantes présentent l'évolution temporelle du courant, de la tension et de la puissance de la charge.

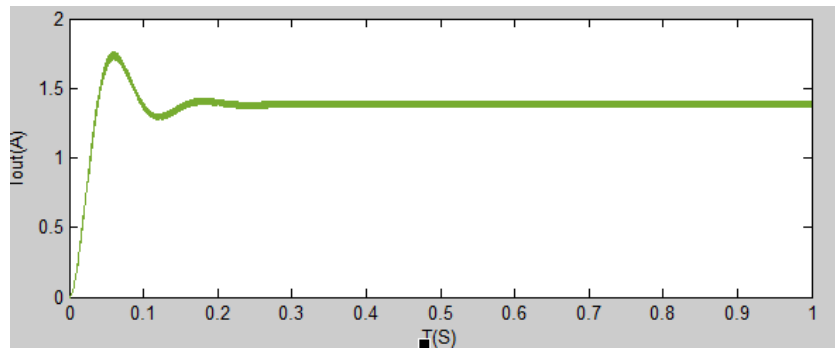


Figure II-19 : ichtarge

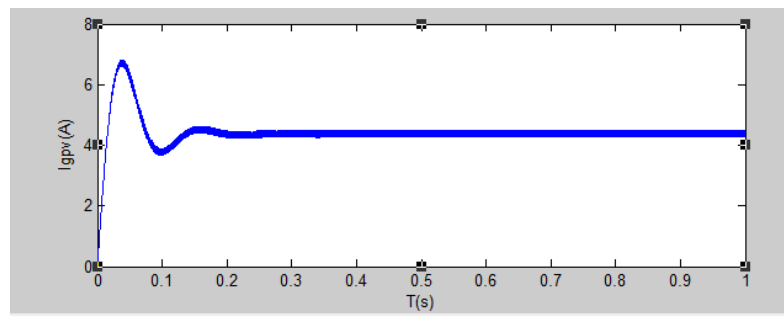


Figure II.20 : Igpv

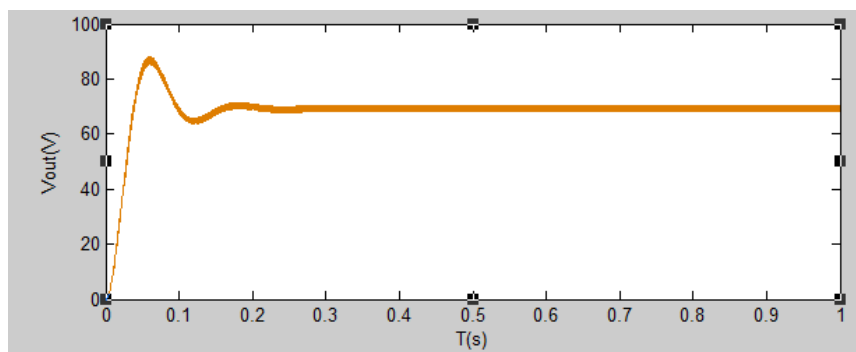


Figure II.21 : Vchrage

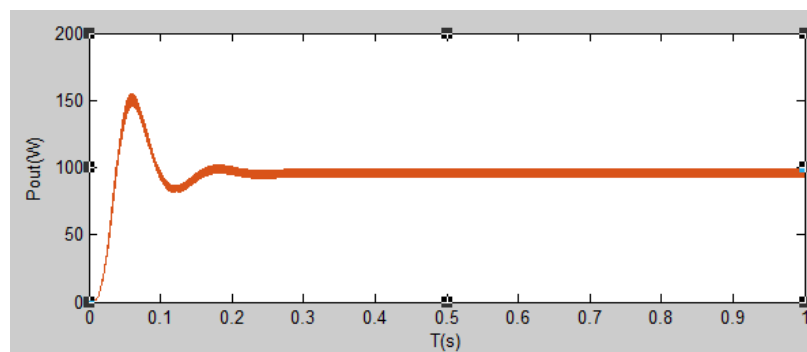


Figure II-22 : Pout

Les courbes précédentes révèlent que, suite à l'analyse effectuée :

Les résultats de simulation concordent avec les résultats obtenus par calcul. Le convertisseur survolteur joue effectivement un rôle crucial en élevant la tension d'entrée de 22.7 V à une valeur supérieure à 70.7 V, même résultat de calcul.

- La tension de charge débute à zéro car la charge (ou le condensateur C) est initialement éloignée de la source GPV lorsque l'interrupteur S est fermé (Ton).
- Entre le temps 0 et 0,2ms, la tension augmente pour atteindre un pic de 85 V, puis se stabilise à 70 V.
- Cependant, il y a de légères diminutions de la tension après chaque augmentation en raison de l'ouverture et de la fermeture de l'interrupteur S.
- Lorsque S s'ouvre (Toff), C commence à se charger.
- (D=1), S se ferme de nouveau (Ton) :
- C agit comme une source et se décharge vers la résistance jusqu'à ce que S s'ouvre de nouveau, et ainsi de suite jusqu'à environ $t \approx 0,21$ ms, où l'on entre dans le régime permanent.
- Le courant de charge suit le même comportement, avec un pic de 1,75 A avant de se stabiliser à une valeur de 1,38 A

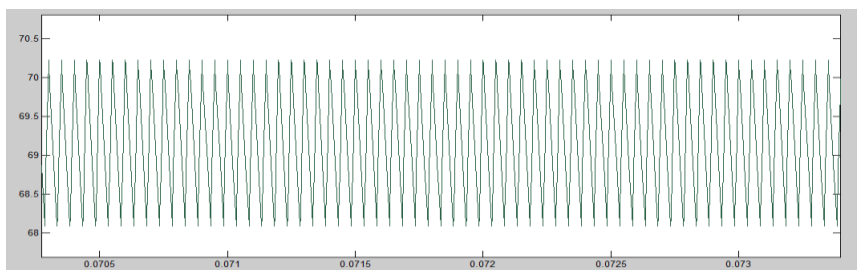


Figure II.23 : courbe de tension de charge ; zoomés au régime permanent

$\Delta V = 70.25 - 68.1 = 2.15V$ (Le résultat de calcul est 2.12). Alors la valeur de ΔV obtenue par simulation est très proche de celle supposée pour le calcul.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé la modélisation d'une chaîne de conversion photovoltaïque comprenant un panneau solaire, un hacheur Boost et une charge résistive. Nous avons également présenté une approche détaillée de dimensionnement des convertisseurs Boost, avec une application spécifique pour une puissance de 100 W. Enfin, nous avons validé les étapes précédentes en effectuant des simulations à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK.

CHAPITRE III
Simulation du Système
Photovoltaïque à MPPT

III.1 INTRODUCTION

Nous commencerons ce chapitre en présentant le principe de la commande MPPT de type P&O, suivi de son implémentation sur MATLAB/Simulink. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous aborderons l'implémentation de cette commande sur Arduino en utilisant le logiciel Proteus.

Ce chapitre se conclura par une analyse des résultats obtenus grâce à la simulation réalisée avec le logiciel Proteus

III.2 Principe de mppt

La figure (III.1) représente la chaîne d'alimentation d'un générateur photovoltaïque (GPV) dans laquelle une charge en courant continu est alimentée par un générateur via un convertisseur statique contrôlé par une commande MPPT. La commande MPPT ajuste le rapport cyclique du convertisseur statique afin que la puissance fournie par le GPV soit égale à la P_{MAX} (V_{MPP} , I_{MPP}) disponible à ses bornes, indépendamment des conditions météorologiques telles que la température et l'éclairement [24]. Bien que l'algorithme MPPT puisse varier en complexité pour atteindre le PPM, il repose généralement sur l'ajustement du rapport cyclique du convertisseur statique en fonction des variations des paramètres d'entrée du convertisseur statique (I_{pv} et V_{pv}). [25].

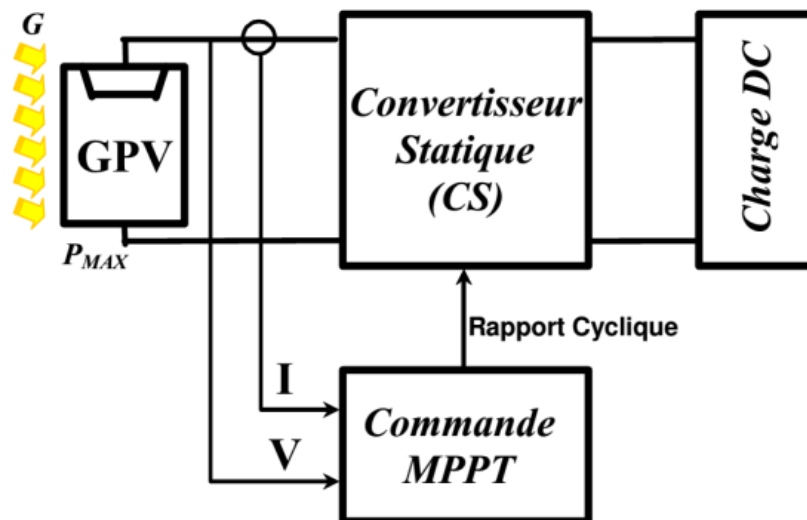


Figure III.1: Schéma de base d'une alimentation utilisant des panneaux solaires

[25]

III.3 Méthode perturbation et observation (P&O)

La méthode classique MPPT appelée Perturbation et Observation (P&O) exploite la caractéristique puissance-tension P-V pour atteindre le point de puissance maximum (PPM). L'algorithme de P&O se compose d'une phase de perturbation, où le rapport cyclique et la tension de sortie du panneau photovoltaïque sont modifiés, suivie d'une phase d'observation du point de fonctionnement. Cette observation est caractérisée par la pente de la courbe, comme illustré dans la figure III.2. En se positionnant sur la courbe P-V, des incréments ou des décréments du rapport cyclique sont effectués, ce qui permet de s'approcher progressivement du PPM. Ces deux phases sont répétées à chaque itération pour se rapprocher de plus en plus du PPM (voir figure III.2). [26]

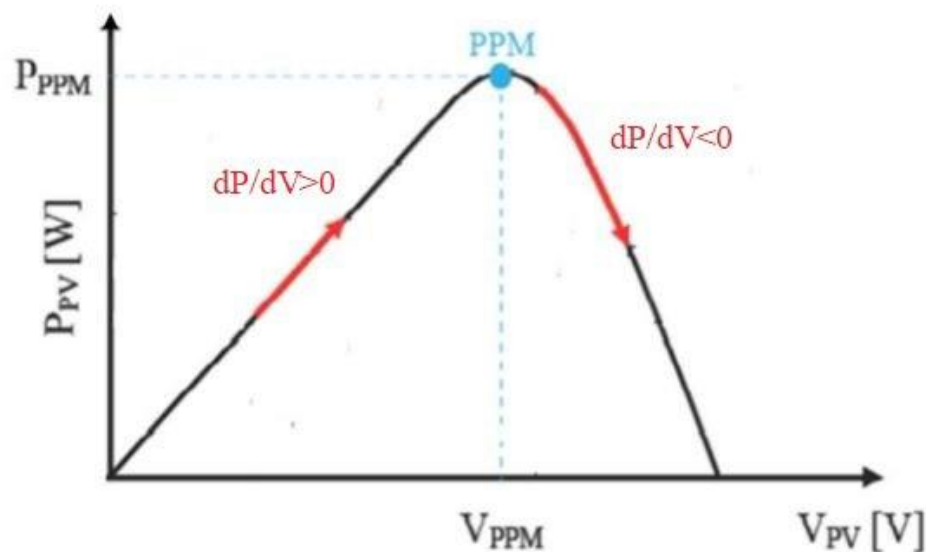


Figure III.2 : Représentation de la phase d'observation de la méthode P&O dans la caractéristique P-V [26]

L'algorithme P&O applique les deux règles suivantes :

$$1. \text{Si } \frac{dP}{dV} > 0 \text{ alors } D(i) = D(i + 1) + \Delta D$$

$$2. \text{Si } \frac{dP}{dV} < 0 \text{ alors } D(i) = D(i + 1) - \Delta D$$

Le paramètre ΔD désigne le pas d'incrément du rapport cyclique contrôlant la tension moyenne délivrée par le convertisseur Boost. L'algorithme de la méthode P&O peut donc se résumer par l'organigramme représenté par la figure

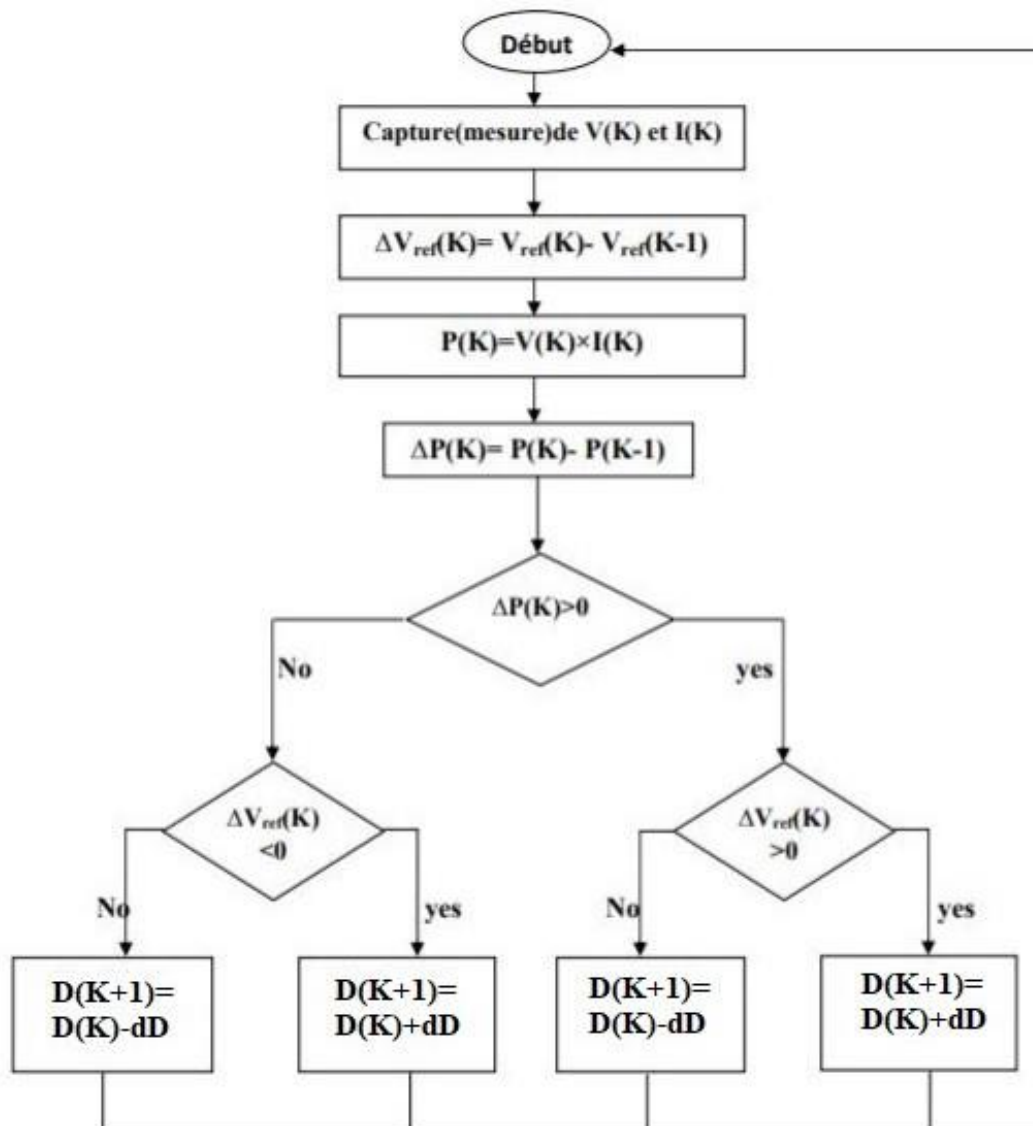


Figure III.3 : Organigramme de l'algorithme P&O [26]

III.3.1 Implémentation de la commande P&O sous MATLAB/SIMULINK

La Figure III.4 illustre l'implémentation de la commande "pando" sur MATLAB avec des panneaux solaires de 100 W et un convertisseur DC-DC.

Le tableau suivant mentionne les paramètres utilisés dans le convertisseur boost :

Puissance de panneaux	100W
Tension d'entrée	22.7 v
Tension de sortie	70v
Inductance	71mH
Condensateur	470µF
Fréquence	1000HZ
Résistance	50ohm

Tableaux III.1 : Paramètres du convertisseur Boost

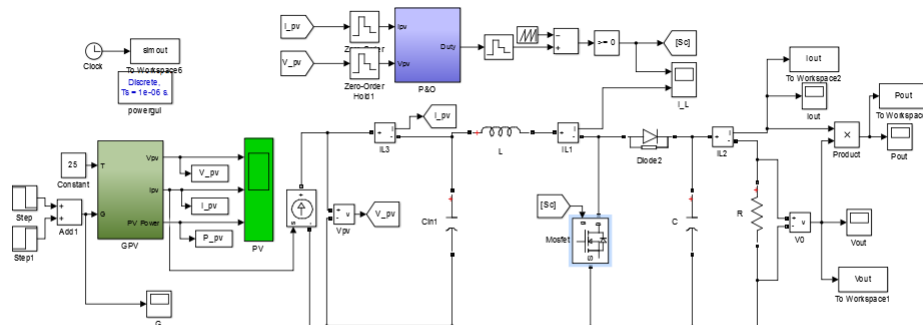


Figure III- 4 : Structure du système global « PV-Boost-Charge-MPPT »

La Figure III-5 illustre les détails du bloc de la commande P&O

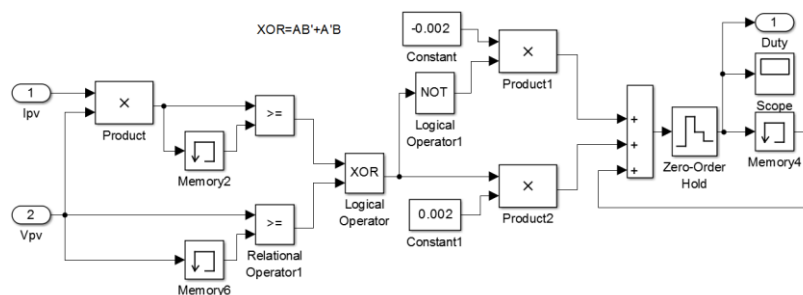


Figure III.5 : la commande P&O

Nous allons maintenant effectuer la simulation du MPPT P&O en utilisant différentes valeurs d'irradiation et à une température de 25°. Afin d'évaluer l'efficacité de la commande.

La Figure III-6 présente le profil d'irradiation sélectionné pour la simulation.

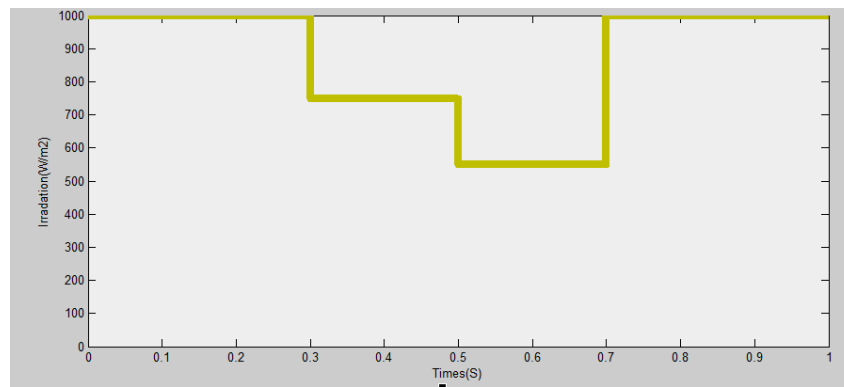


Figure III.6 : Profil de l'irradiation

Les figures III-7 et 8 représentent les variations de tension et de courant du panneau en fonction de l'irradiation. On observe clairement que la tension varie en fonction de l'irradiation, de même que le courant. Lorsque l'irradiation diminue, le courant diminue également, tandis que lorsqu'elle augmente, le courant augmente également.

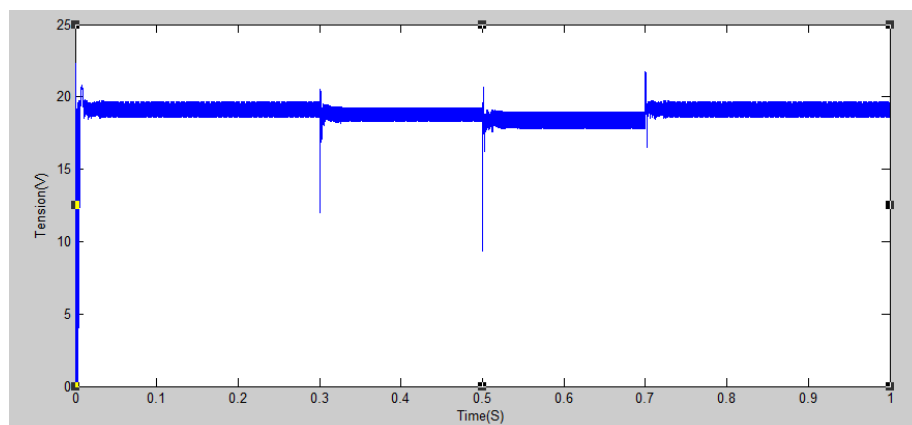


Figure III.7 : Tension du panneau

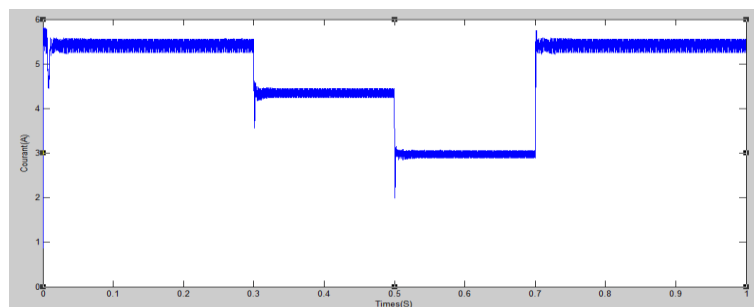


Figure III.8 : Courant du panneau

La figure III-9-10 représente la variation de la puissance du panneau en fonction du temps et de la tension à ses bornes. Dans la première figure, on observe de légères oscillations de la puissance causées par la commande P&O. Dans la deuxième figure, on peut clairement observer le fonctionnement de la commande P&O qui vise à trouver le point de puissance maximale lors de chaque variation de l'irradiation.

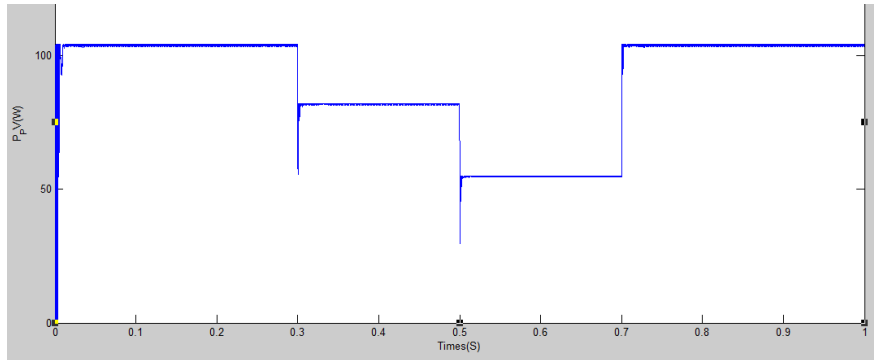


Figure III.9 : Puissance du panneau

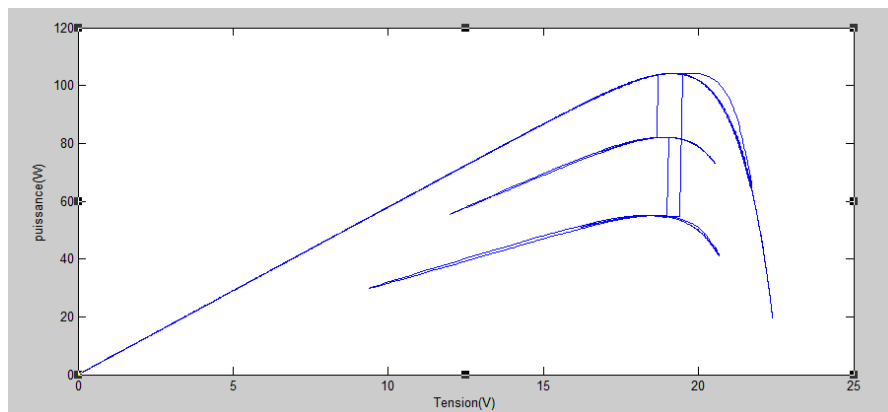


Figure III.10 : Puissance du panneau en fonction de tension

Les figures III-11, 12 et 13 représentent respectivement la tension, le courant et la puissance de charge à la sortie du convertisseur Boost. On observe clairement l'effet de l'amplification de tension jusqu'à 70 V grâce au Boost. De plus, la puissance est inférieure à celle du panneau solaire en raison des pertes engendrées par le Boost.

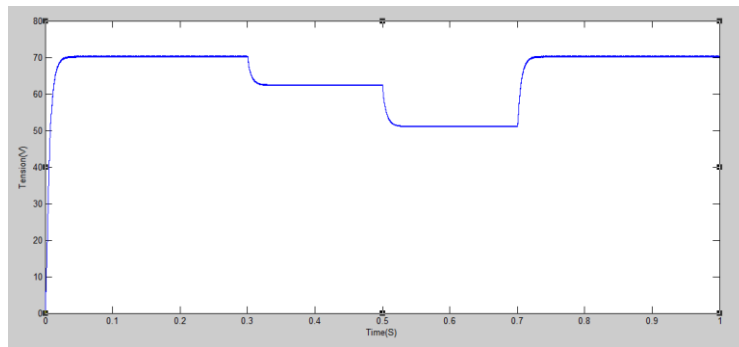


Figure III.11 : Tension de la charge

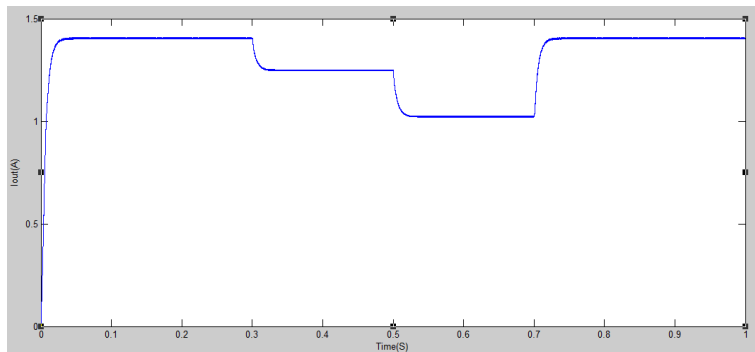


Figure III.12 : Coutant de la charge

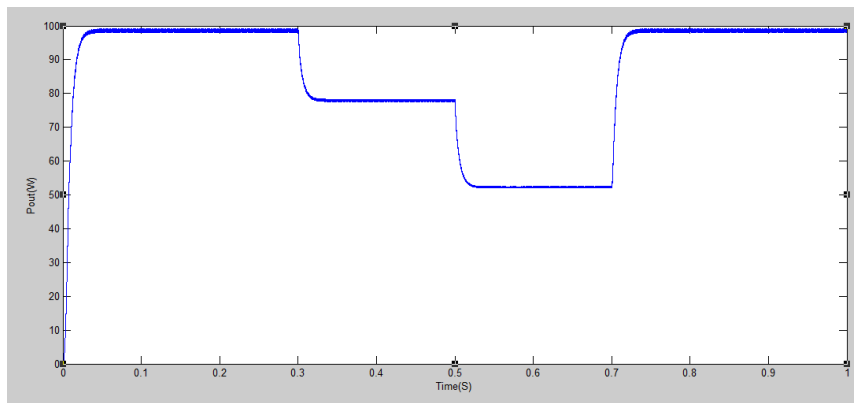


Figure III.13 : Puissance de la charge

III.4 Implémentation de la commande mppt sur arduino

III.4.1 Model de panneaux

Dans cette partie, nous simulerons notre panneau de 100W sur Proteus en utilisant le schéma équivalent tel que présenté dans la figure suivante

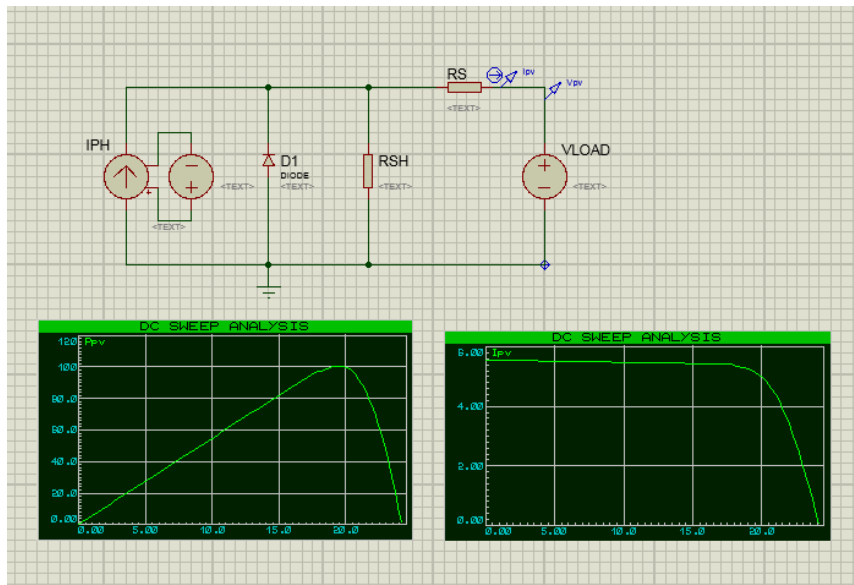


Figure III.14 : Simulation d'un panneau solaire avec ses caractéristiques

III.4.2 Capteur de courant et tension

Notre panneau a une tension à circuit ouvert (V_{oc}) de 22,7V, tandis que la tension d'entrée maximale analogique de l'Arduino est de 5V. Par conséquent, nous divisons la tension par cinq. Pour mesurer avec précision le courant, nous utilisons un capteur de courant ACS712 de +5A. Quant à la mesure de la tension, nous utilisons un diviseur de tension avec un capteur de tension

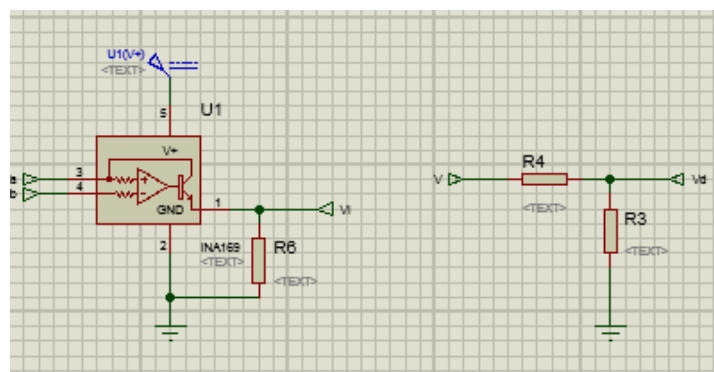


Figure III.15 Capteur de courant et Tension

III.4.3 Convertisseur DC-DC

Nous avons dimensionné le convertisseur boost de notre panneau photovoltaïque en utilisant les paramètres suivants :

Puissance (Ppv)	100 W
Tension (Vpv)	22.7 v
Fréquence (Fsw)	1000 HZ
Courant de source (Isc)	4.405 A
Mosfet	IRFZ44N
Duty cycle	0.68
Inductance	71 mh
Capacité	454 μ F
Résistance	50 ohm

Tableau III.2 : Paramètres du Boost

La figure III-16 présente la structure du Boost réalisé sur Proteus :

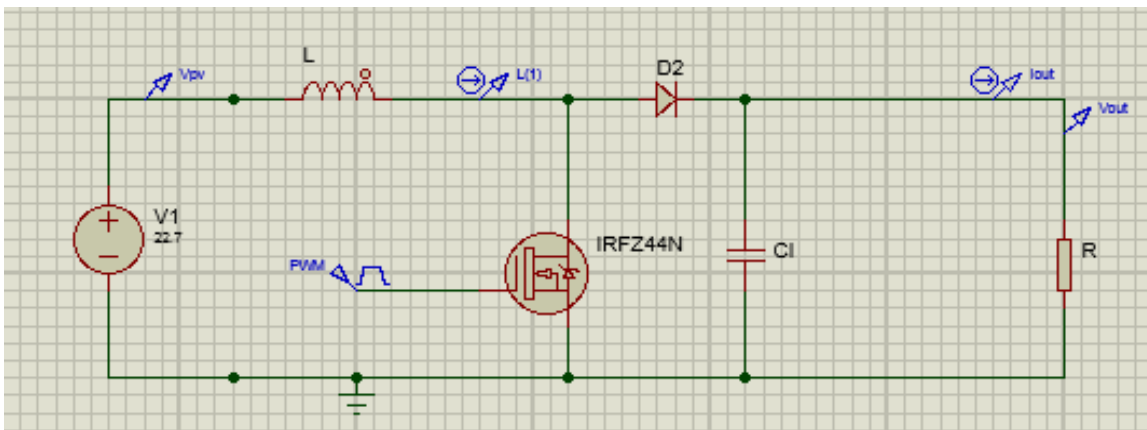


Figure III.16 : Boost réalisé sur Proteus

Le résultat suivant est produit par notre convertisseur boost :

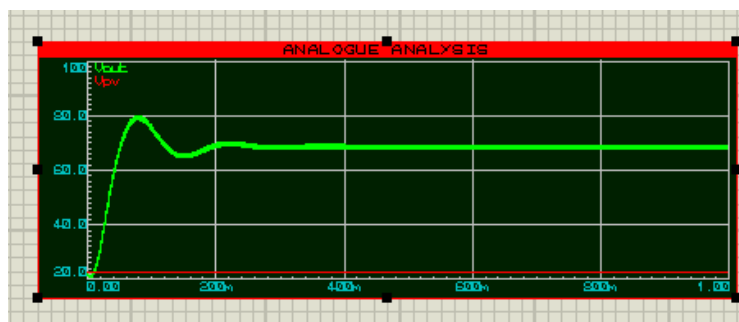


Figure III.17 : Tensions obtenues par Proteus

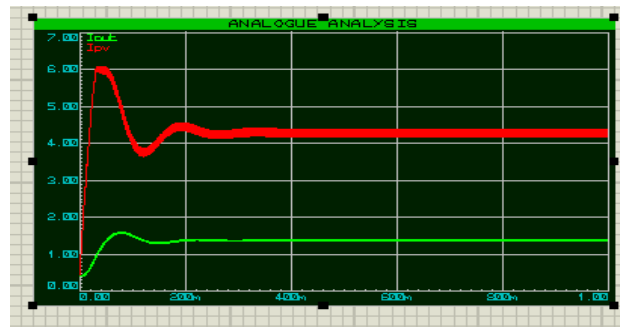


Figure III.18 : Courant obtenues par Proteus

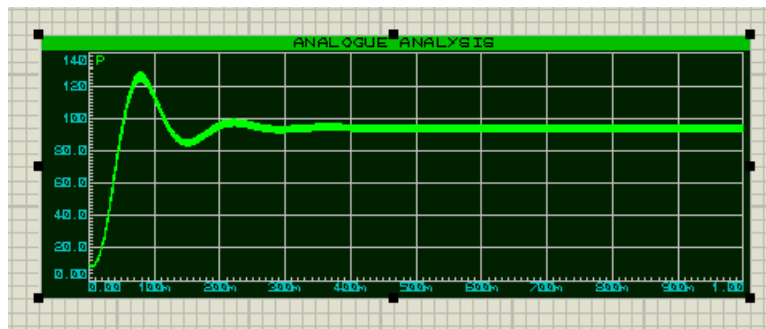


Figure III-19 : Puissance de charge obtenues par Proteus

Les résultats précédents illustrent que notre convertisseur a bien fonctionné et fourni des résultats corrects, à l'exception d'une légère diminution de la puissance de charge due aux composants utilisés tels que la diode et le MOSFET.

III.4.4 Implémentation de la commande P&O

La figure III-20 illustre l'implémentation de l'Arduino Uno avec Boost et panneaux solaires, capteur de courant, capteur de tension et afficheur LCD ce qui permet d'obtenir un schéma complet d'une commande MPPT P&O.

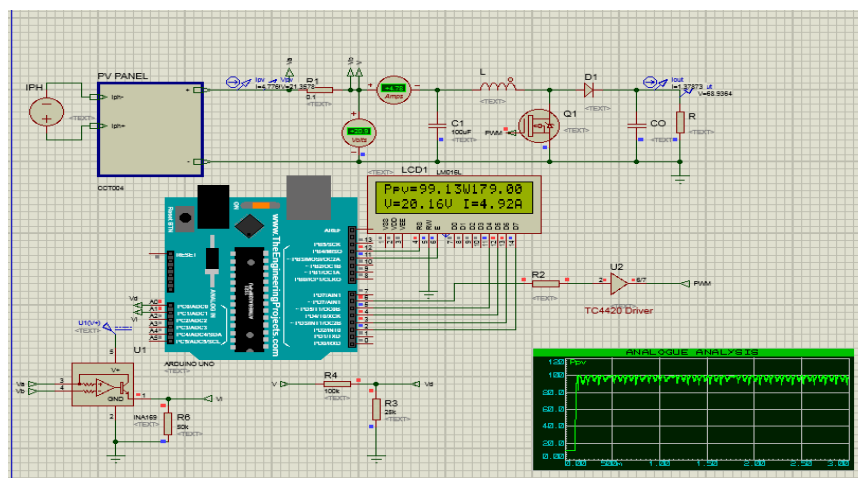


Figure III.20 : système complet : PV+Boost+Arduino+capteurs+MPPTP&O+charge

III.4.5 Analyse des résultats obtenus par Proteus

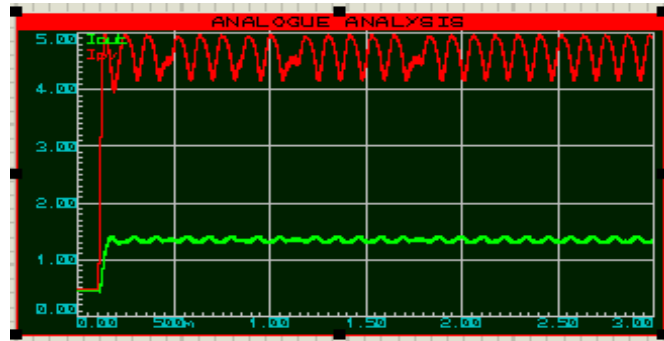


Figure III.21 : Courant du panneaux et courant de la charge

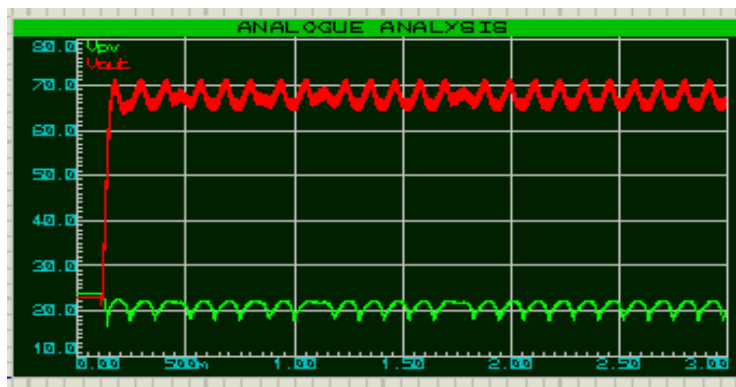


Figure III.22 : Tension de la charge et tension du panneaux

D'après la figure 20 on remarque que le panneau fournit une puissance d'environ 100 W, ce qui correspond à sa puissance maximale dans des conditions idéales ($T=25\text{ °C}$, $G=1000\text{ W/m}^2$, $AM=1.5$). En observant les deux figures 21,22 nous constatons que la tension et le courant se stabilisent après 260 ms avec de légères oscillations. Ce moment indique que l'algorithme commence dès le début à rechercher la tension (ou le courant) qui permet d'obtenir la puissance maximale

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons débuté en exposant le principe de la commande MPPT P&O, ainsi que son implémentation à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK. Les résultats de la simulation ont démontré l'efficacité de cette commande pour extraire la puissance maximale disponible, quelles que soient les conditions climatiques.

La partie la plus significative de ce chapitre s'est concentrée sur l'implémentation de la commande P&O sur une carte ARDUINO UNO. Pour ce faire, nous avons utilisé le logiciel Proteus ainsi que des bibliothèques adaptées aux cartes ARDUINO. Cette étude a révélé que l'algorithme P&O est performant et que son implémentation pratique est relativement simple.

CHAPITRE IV
Réalisation et Discussions

IV.1 Introduction

Ce chapitre exposera la mise en place expérimentale d'un système PV complet déjà mentionné dans le chapitre précédent, suivi de tests pratiques effectués sur ce système. Il portera également sur l'étude et l'analyse des caractéristiques électriques d'un module photovoltaïque fixe dans des conditions variables de rayonnement solaire et de température, sur un site situé dans la ville d'Annaba en Algérie

IV.2 Description de site

L'emplacement précis sélectionné pour l'étude expérimentale est l'Innovation Center (GRP Cluster Annaba innovation center A.I.C), situé dans la commune d'Elbouni de la ville d'Annaba, au nord de l'Algérie. Les caractéristiques géographiques et météorologiques de ce lieu sont les suivantes : latitude de $36,9^\circ$ Nord, longitude de $7,76^\circ$ Est, altitude de 23 mètres et azimut de 0° (vers le vrai sud).

IV.3 Schéma de montage utilisé

La figure IV 1 représente le schéma utilisé dans ce montage comprenant une carte Arduino Uno, un afficheur LCD, un convertisseur Boost, un capteur de tension, un capteur de courant ACS 712 et une charge de 50 ohms

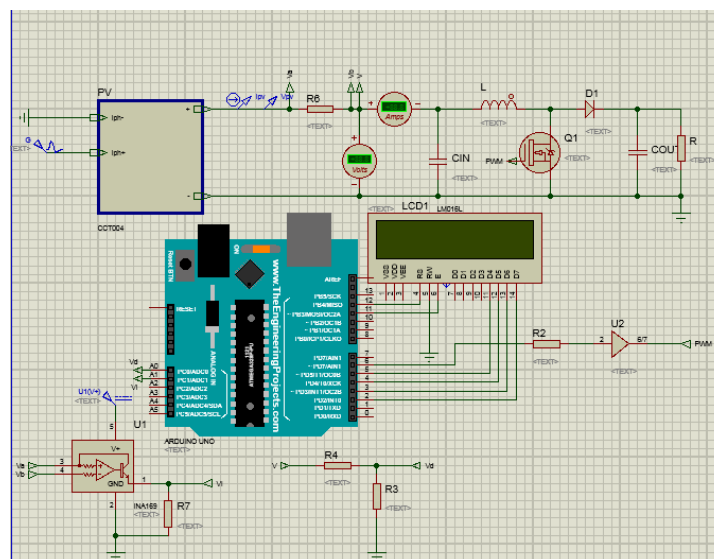


Figure IV.1 : schéma de contrôle MPPT

IV.4 Description du banc d'essais expérimental :

IV.4.1 Module Photovoltaïque

Nous avons utilisé le panneau solaire de type Divel Solar-100M (36), ayant les caractéristiques suivantes :

Puissance Maximale : 100W

I_{cc} : 5.8, et V_{oc} : 22.7



Figure IV.2 : Divel Solar-100M (36)

IV.4.2 Convertisseur survolteur

Les composants suivants sont utilisés dans notre convertisseur :

Composant	Référence
Mosfet	IRF 630
Bobine	9mh
Fréquence	7800hz
Condensateur	58 μ F

Tableaux IV.1 : Caractéristiques du boost

L'IRF 630 est un MOSFET de puissance qui présente les caractéristiques suivantes : une tension de drain-source maximale de 200V, un courant de drain maximal de 9 A.

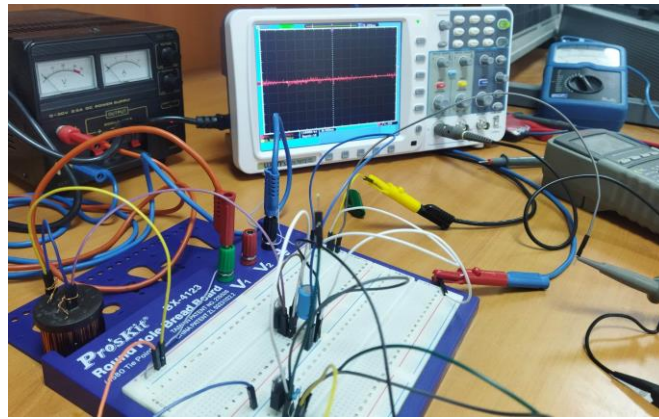


Figure IV.3 : Convertisseur DC-DC

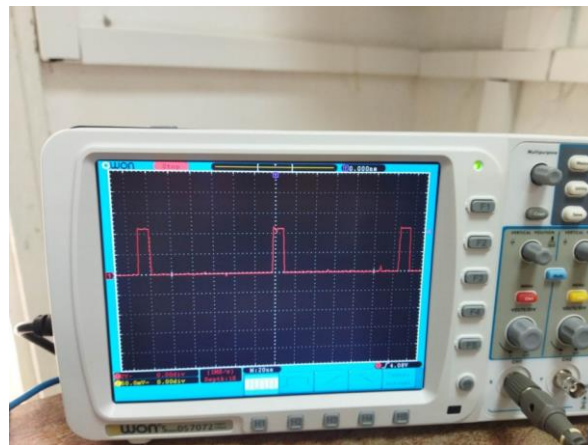


Figure IV 4 : Signal de la commande

Selon l'observation de la figure, on constate que notre commande fonctionne correctement.

IV.4.3 Capteur de Tension :

Le capteur de tension est un composant à 3 broches (VCC, GND, Signal).



Figure IV.5 : Capteur De Tension

IV.4.4 Capteur de courant ACS712

C'est un capteur de courant continu et de courant alternatif.

Le capteur de courant présente un problème de bruit sur le signal de courant. Afin de remédier à cela, nous allons procéder à un filtrage en utilisant :

$$\text{currentValue} = \text{alfa} * \text{currentValue} + (1 - \text{alfa}) * \text{current_prev};$$

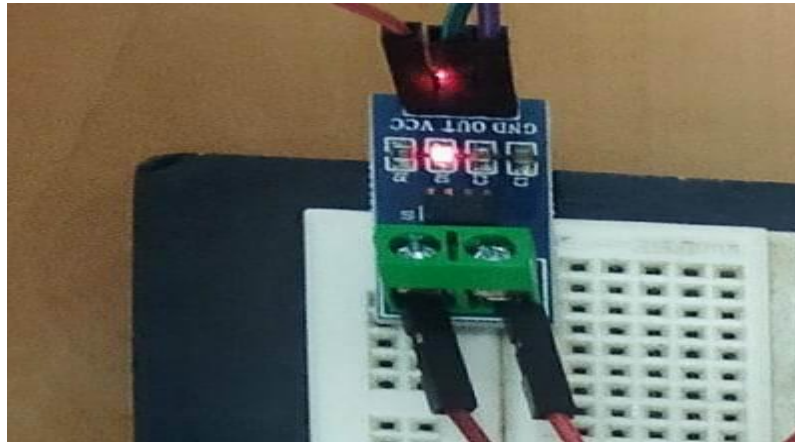


Figure IV.6 : Capteur De Courant

IV.4.5 Afficher LCD

Afin d'afficher la tension et la puissance d'entrée et de sortie, nous avons utilisé cette afficheuse qui permet d'afficher ces informations.



Figure IV.7 : Afficheur LCD

IV.4.6 Logiciel arduino

Le logiciel de programmation de la carte Arduino permet de transférer et de mémoriser le programme dans la carte via la liaison USB, une fois que le programme a été écrit



```

PandO_Code | Arduino 1.8.19
Fichier  Édition  Croquis  Outils  Aide

PandO_Code $
/*****
Copyright Bouhedid All Rights Reserved
*****/

/*****
Header Files included
*****/

/*****
PROJECT : MPPT (P&O) implementation
Function : P&O Arduino Code
*****/

*
Written by : Younes Bouhedid          Date : 09/05/2023
*
Email : younes.bouhedid@g.enp.edu.dz
*****/

/*****
#include <LiquidCrystal.h>
LiquidCrystal lcd(12, 11, 5, 4, 3, 2);

float sensorValue1 = 0;
float sensorValue2 = 0;
float voltageValue = 0;
float currentValue = 0;
float Power_now = 0, Power_anc = 0, voltage_anc = 0;

```

Figure IV.8 : Interface de logiciel

IV.5 Assemblage complet du système photovoltaïque

La figure suivante illustre le montage appliqué dans notre projet.

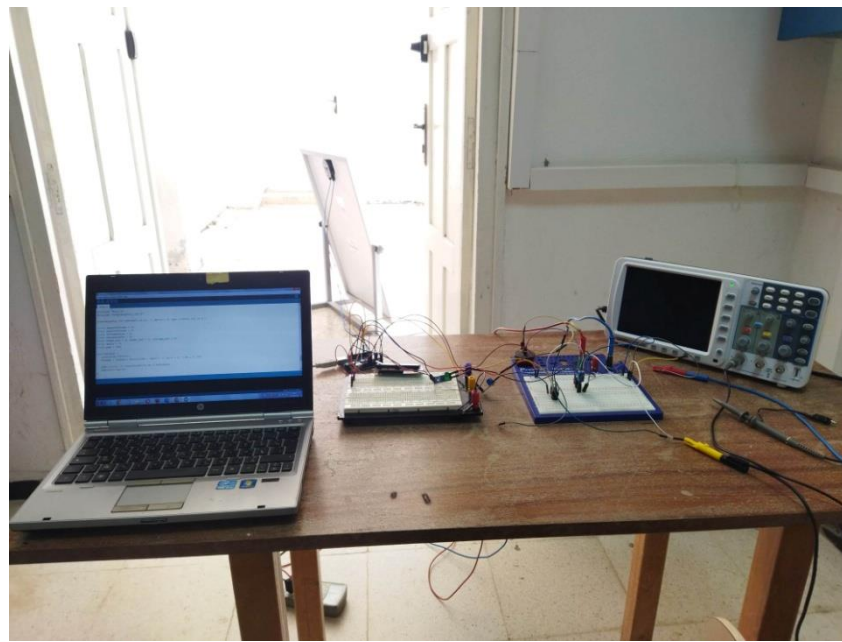


Figure IV.9 : montage du système complet

IV.6 Résultats expérimentaux du montage

L'essai de la commande a été réalisé le 22 mai 2023 de 10h à 12h (midi), avec un ensoleillement compris entre 950 W/m² et 1000 W/m² à ce moment-là. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

V_PV	P_PV	n%	V_CH	P_CH	n%
19.93	97.856	97.856	62.28	81.23	83.01
20.24	98.164	98.164	63.25	82.43	83.97
20.68	98.02	98.02	64.71	83.19	84.87
20.39	98.891	98.891	63.72	79.44	80.33
20.33	99.617	99.617	63.49	80.65	80.96
20.46	99.844	99.844	64.01	83.01	83.13

Tableau IV.2 : les relevés de résultats

Lors des essais effectués sans commande MPPT, en utilisant uniquement le circuit de puissance du panneau solaire et du convertisseur Boost, la valeur de puissance obtenue se situe autour de 58 et 60 W. Cependant, lorsqu'on utilise le circuit de commande MPPT et qu'il fonctionne correctement, il permet d'obtenir des valeurs de puissance maximale, comme le montre le tableau précédent.

IV.7 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons effectué une expérience pour mettre en œuvre expérimentalement la technique MPPT Pando à l'aide d'Arduino Uno, dans le but de trouver le point de puissance maximale des panneaux photovoltaïques. Nous avons observé des résultats similaires dans différents scénarios d'irradiation. Grâce à la commande MPPT, le générateur PV peut fonctionner de manière optimale, indépendamment des variations de température et d'irradiation.

***CONCLUSION
GENERALE***

Dans ce travail sur les régulateurs solaires photovoltaïques de type MPPT, nous avons abordé plusieurs étapes :

Tout d'abord, nous avons présenté des généralités sur les systèmes PV, tels que le principe de fonctionnement d'un générateur PV et les performances des cellules PV.

Ensuite, nous avons étudié les convertisseurs statiques et réalisé la modélisation d'un convertisseur boost. Par la suite, nous avons exploré la commande MPPT de type P&O, et modélisé les différentes parties de la chaîne de conversion photovoltaïque (GPV et hacheur boost).

Par la suite, nous avons effectué une simulation de ce système à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink, puis procédé à l'implémentation de la commande sur Arduino. Enfin, nous avons réalisé le montage proposé de manière pratique.

Les résultats obtenus ont démontré que le système a bien suivi la puissance maximale malgré les changements climatiques appliqués

Nos perspectives incluent l'étude des autres types de commande MPPT, tels que l'incrémentale (IC), la logique floue (FL) et d'autres types, afin d'approfondir notre compréhension de cette technique simple et largement utilisée.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Nadine May**. Eco-balance of a Solar Electricity Transmission from North Africa to Europe Diploma Thesis. Faculty for Physics and Geological Sciences. Braunschweig: TECHNICAL UNIVERSITY OF BRAUNSCHWEIG, 2005, P12 [1]
- [2] **Lucien Wald**, Introduction au rayonnement solaire, Paris : Presses des mines, collection, Sciences de la Terre et de l'environnement, 2020, p13
- [3] **TOUMI, ADJABI**. ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE ET SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE AUTONOME. FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE. Annaba : Université Badji Mokhtar, 2021, p3
- [4] **HAMOUDA**, Technologies des dispositifs et systèmes photovoltaïques. Batna. 2010, p3
- [5] **TIGRINE.C et Ouerdia. A**, « Etude et simulation des techniques MPPT d'un système photovoltaïque », Mémoire de Master, Université A. MIRA-BEJAIA, 2018/2019
- [6] **Fritts**. On a new form of selenium photocell. American Journal of Science, 97, 1883. G. Gomard. Cristaux photoniques pour le contrôle de l'absorption dans les cellules solaires photovoltaïques silicium ultramince. Thèse de Doctorat. Université de Lyon. 2012.
- [7] **M.Orgeret**, «*Les piles solaires, le composent et ces applications*» Préface de F.Allest.
- [8] **Angel Cid Pastor** « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques ». Thèse de Docteur. Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006.
- [9] **M. B. Askari**, M. A. V. Mirzaei et M. Mirhabibi, «Types of Solar Cells and Application, » American Journal of Optics and Photonics, 2015, p. 107.
- [10] **A. BISKER** « Commande d'un système photovoltaïque en mode isolé et connecté au réseau », projet de fin d'études, ENP, 2012.
- [11] **Stéphane Petibon** "Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques" ? Thèse de doctorat, Université de Toulouse, Janvier 2009.
- [12] **solarelectripower.org**
- [13] **www.ohmeo.com/composition-panneau-PV**
- [14] **Amrani Mohamed Nader**, « Conception d'un onduleur solaire avec MPPT intégré ». Thèse de doctorat, Université Larbi Ben M'hidi Oum El Bouaghi, Janvier 2018 .
- [15] **G. Notton et al.** « Influence d'un ombrage partiel sur la production électrique d'un module photovoltaïque en silicium monocristallin ». Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°1, pp 49-62, 2010.
- [16] **Parthiban.S et P.Karthikeyan**, chez Multistring PV inverters by fuzzy based

MPPT and CPG mode, India, Department of EEE Nandha college of technology Erode, 2019, p. 451.

- [17] **Jäger, K.-D., et al.**, Fundamentals, Technology and Systems, Solar Energy: UIT Cambridge, 2016.
- [18] **Belkaid Abdelhakim**, « Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaîne de conversion photovoltaïque autonome » thèse de doctorat université Ferhat Abbas Setif 2015.
- [19] **Angel Cid Pastor** « conception et réalisation de modules photovoltaïques électronique», thèse de doctorat, université de Toulouse, 29/9/2006
- [20] **O. Bingöl, B. Özkaya, and S. PAÇACI**, “Comparison of fuzzy logic and perturb& observe control in maximum power point tracking for photovoltaic system using buck converter,” Mugla Journal of Science and Technology, vol. 3, no. 1, pp. 51–57, 2017.
- [21] **D. Choudhary and A. R. Saxena**, “Dc-dc buck-converter for mppt of pv system,” International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, vol. 4, no. 7, pp. 813–821, 2014.
- [22] **S. R. Rex and D. M. S. R. Praba**, “Design of pwm with four transistor comparator for dc–dc boost converters,” Microprocessors and Microsystems, vol. 72, p. 102844, 2020.
- [23] **B. M. Hasaneen and A. A. Elbaset Mohammed**, “Design and simulation of dc/dc boost converter,” in 2008 12th International Middle-East Power System Conference, pp. 335–340, 2008.
- [24] **Abdelmalik Zorig** "Commandes non linéaire d'une source décentralisée photovoltaïque à base de convertisseurs de puissance entrelacés et parallèles," Thèse de doctorat, Université Amar Telidji Laghouat, novembre 2017.
- [25] **Angel Cid Pastor**, « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques » Micro et nanotechnologies/Microélectronique. INSA de Toulouse, 2006
- [26] **N.Aouchiche, M.S.Aït Cheikh, A.Malek** "Poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque par les méthodes de l'incrémentation de conductance et la perturbation & observation," Revue des Energies Renouvelables Vol.16N3,2013