

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ-BOUIRA

Faculté des Sciences Appliquées



Présenté au

Département : Génie Électrique

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Mémoire de Master

Réalisé par :

Osmani khaled

Et

Sari mazigh

Thème

Réalisation d'un régulateur mppt a base de l'Arduino

Devant le Jury composé de :

Mr. k. benaouicha	MAA	Président	Université de Bouira
Mr. M. Kherchi	MAA	Examineur	Université de Bouira
Mr. M. Touafek	MAA	Encadrent	Université de Bouira

Année Universitaire : 2025-2026



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université de Bouira, Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département de Génie électrique



Bouira le :13/06/2026

Autorisation de soutenance d'un mémoire de Master

Je soussigné(e), l'enseignant (e) : Mr Mohamed Yaakoub TOUAFEK

Encadreur des étudiants (es) :

1- Osmani khaled

2- Sari mazigh

Spécialité : électrotechnique industrielle

Les autorise à soutenir leur **mémoire** de Master.

Signature du rapporteur

Mr. Touafek Mohamed Yaakoub



Remerciements

Remerciements

Primordialement, nous adressons nos remerciements à Allah, qui nous a donné la santé, la détermination et la persévérance pour réaliser ce travail de manière efficace. Nous tenons à exprimer notre sincère reconnaissance à nos familles pour leur soutien inébranlable, leurs encouragements permanents et leur accompagnement tout au long de notre parcours académique.

Nous adressons aussi nos remerciements les plus sincères à notre superviseur, Mr TOUAFEK MOHAMED YAAKOUB, pour son accompagnement, sa disponibilité ainsi que les précieux conseils et orientations qu'il nous a prodigués durant la mise en œuvre de ce projet.

Nous voulons également exprimer notre gratitude envers les membres du jury pour avoir agréé à évaluer ce travail et avoir consacré leur temps et leur savoir-faire.

Enfin, nous adressons nos vifs remerciements à l'ensemble de nos enseignants, dont les connaissances, les efforts et l'engagement ont largement contribué à notre formation académique et professionnelle.

Résumé

La production d'énergie d'un panneau solaire dépend des facteurs environnementaux, tels que l'exposition au soleil et la température. Pour une utilisation optimale de l'énergie disponible, un régulateur MPPT fondé sur l'algorithme Perturbation et observation (P&O) a été élaboré et mis en œuvre.

Cette œuvre illustre la conception, la simulation à l'aide de Proteus, et la mise en œuvre concrète d'un système qui inclut un panneau photovoltaïque, un convertisseur Boost contrôlé par une carte Arduino Uno, ainsi que des détecteurs de tension et de courant. Les conclusions tirées démontrent que le contrôleur élaboré permet une supervision efficace du point de puissance maximale tout en optimisant les performances du système photovoltaïque.

Mots-clés : Photovoltaïque, MPPT, Arduino Uno, Convertisseur Boost, P&O, Énergie solaire.

Abstract

The production of energy from a solar panel depends on environmental factors, such as solar eclipses, etc. A. Heat. For an optimal utilization of the available energy, an MPPT regulator based on the perturbation at statement (P&O) algorithm is elaborated with mis an œuvre.

This work illustrates the principle, A simulation using Proteus, in Los Angeles exploited some concrete- d'un systems, which include a photovoltaic panel, a Boost converter controlled by an Arduino Uno board, as well as voltage and current detectors. Read conclusions made show that the elaborated controller allows an efficient control of the maximum power point while optimizing the performance of the photovoltaic system.

Keywords: Photovoltaic, MPPT, Arduino Uno, Boost Converter, P&O, Solar Energy.

ملخص

يعتمد إنتاج الطاقة من اللوح الشمسي على العوامل البيئية، مثل الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة وغيرها. وللاستفادة المثلى من الطاقة المتاحة، تم تطوير وتنفيذ منظم لتتبع نقطة القدرة العظمى (MPPT) يعتمد على خوارزمية (P&O) يوضح هذا العمل مبدأ عمل هذا المنظم من خلال محاكاة باستخدام برنامج **Proteus**، حيث يتكون النظام من لوح كهروضوئي، ومحول رافع للجهد (Boost Converter) يتم التحكم فيه بواسطة لوحة **Arduino Uno**، بالإضافة إلى حساسات لقياس الجهد والتيار. وقد أظهرت نتائج المحاكاة أن المتحكم المطور يتيح تتبعًا فعالاً لنقطة القدرة العظمى، مما يسهم في تحسين أداء النظام الكهروضوئي وزيادة كفاءة استغلال الطاقة الشمسية.

الكلمات المفتاحية : لطاقة الكهروضوئية، تتبع نقطة القدرة العظمى الطاقة الشمسية محول رافع

Introduction générale	1
Chapitre I Généralité sur le système photovoltaïque	
1 Introduction	2
2 Système photovoltaïque.....	2
2.1 Principe de la cellule photovoltaïque	2
3 Typologie de la cellule photovoltaïque	3
3.1 Cellule monocristallines	3
3.2 Cellules polycristallines.....	4
3.3 Cellules amorphes	4
4 Module au générateur photovoltaïque	5
5 Association des cellules.....	5
5.1 Association série.....	5
5.2 Association en parallèle.....	6
5.3 Association mixte	6
6 Dispositif de protection	6
6.1 Diode de blocage (anti-retour).....	7
6.2 Diode by-pass	7
7 Modélisation électrique d'une cellule	7
8 L'impact de l'éclairage et de la température sur les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$	8
8.1 Variation de la température	8
8.2 Variation du rayonnement solaire	9
Conclusion	9
Chapitre II Modélisation et simulation sur Matlab	
1 Introduction	10
2 Modélisation d'une cellule PV	10
2.1 Model à une diode	11
2.2 Model à deux diodes.....	12
2.3 Caractéristique de PV utilisée	13
3 Convertisseur CC-CC.....	13

3.1 Convertisseur Cuk	13
3.2 Convertisseur abaisseur (Buck).....	15
3.3 Convertisseur élévateur (BOOST):	17
3.3.1 Calcul paramètre de BOOST.....	18
4 Technique de commande MPPT	19
4.1 Algorithme perturbation & Observation (P&O).....	20
5 Modele de la commande P&O	22
6 Variation d'éclairement.....	23
6.1 Interprétation des Résultats de Simulation	24
7 variations de la température.....	24
7.1 Interprétation des Résultats de Simulation	25
Conclusion	25
Chapitre III Realisation du regulateur	
1 Introduction	27
2 Logiciel et matérielle	27
2.1 Logiciel PROTEUS	27
2.2 Logiciel ARDUINO IDE	27
3 Matériel.....	28
3.1 Converter BOOST	28
3.2 ARDUINO UNO R3	29
3.3 LCD i2c 16X02	29
3.4 Capteur de tension	30
3.5 Capteur de courant.....	30
4 Simulation du système sous PROTUES.....	31
4.1 Schéma équivalent.....	31
5 Partie pratique.....	32
5.1 Mesure des courants et tension.....	32
5.2 Résultat de mesure de la puissance	34
Conclusion.....	34
Conclusion générale	35

Liste des figures

Figure I.1 : Diffusion et recombinaison des électrons et trous	2
Figure I.2 : L'effet photovoltaïque	3
Figure I.3 : cellule PV mono-cristalline	3
Figure I.4 : Cellule PV poly-cristalline	4
Figure I.5 : Cellule PV type amorphe	4
Figure I.6 : générateur solaire DEC	5
Figure I.7 : a) association des cellules en série b) caractéristique $I=f(V)$	5
Figure I.8 : Schéma d'association de deux panneaux en parallèle.....	6
Figure I.9 : Schéma de panneaux photovoltaïques en position mixte	6
Figure I.10 : schéma équivalent d'une cellule PV	7
Figure I.11 : Courant-Tension.....	8
Figure I.12 : Puissance-Tension.....	8
Figure I.13 : La caractéristique $I=f(v)$ et $P=f(V)$ en fonction de température.....	9
Figure I.14 : La caractéristique $I=f(v)$ et $P=f(V)$ en fonction de l'éclairement.....	9
Figure II.1 : Modèle à une diode.....	11
Figure II.2 : Modèle à deux diodes.....	12
Figure II.3 : Caractéristique de PV ou niveau du Labo.....	13
Figure II.4 : convertisseur de type DC-DC.....	13
Figure II.5 : convertisseur Cuk.	14
Figure II.6 : Signaux de tensions et de courants du convertisseur Buck.	15
Figure II.7 : Convertisseur abaisseur.....	16
Figure II.8 : Signaux de tensions et de courants du convertisseur Buck.....	17
Figure II.9 : Convertisseur élévateur (BOOST).....	17
Figure II.10 : Configuration simple de conversion photovoltaïque intégrant une commande PPM.....	19
Figure II.11 : Organigramme de l'algorithme P&o.....	20
Figure II.12 : principe de fonctionnement d'une commande MPPT.....	21

Liste des figures

Figure II.13 : Schéma block de la commande P&O	22
Figure II.14: Structure du système global « PV-BOOST-Charge-MPPT ».....	22
Figure II.15 : Puissance en fonction du temps (Variation d'éclairement).....	23
Figure II.16: Courant en fonction du temps (Variation d'éclairement).....	23
Figure II.17: Tension en fonction du temps (Variation d'éclairement).....	23
Figure II.18: Courant en fonction du temps (Variation de température).....	24
Figure II.19: Puissance en fonction du temps (Variation de température).....	25
Figure II.20: Tension en fonction du temps (Variation de température).....	25
Figure III.1: L'interface de PROUTEUS ISIS.....	27
Figure III.2 : L'interface d'ARDUINO IDE.....	28
Figure III.3 : BOOST réalisé sur PROTEUS.....	28
Figure III.4: Arduino UNO R3 sur PROTEUS	29
Figure III.5: écran LCD i2c 16X02.....	29
Figure III.6 : capteur de tension LANGLOIS ISOL 720.....	30
Figure III.7 : capteur de courant.....	31
Figure III.8: system complete PV+BOOST+MPPT (P&O)+ARDUINO+CAPTEUR.....	32
Figure III.9: Schéma complet du prototype réalisé	32
Figure III.10: Courant d'entrée I_{in}	33
Figure III.11: Courant d'sortie I_{out}	33
Figure III.12 : Tension d'entrée V_{in}	33

Liste Des Tableaux

Tableaux I.1 : Comparaison des technologies de cellules solaires.....4

Tableaux III.1: résultat de mesure du la puissance.....34

Abréviation

PV	Photovoltaïque
MPPT	Maximum Power Point Tracking
MPP	Maximum Power Point
P&O	Perturb and Observe
DC	Direct Current (Courant continu)
DC-DC	Convertisseur continu-continu
PWM	Pulse Width Modulation
STC	Standard Test Conditions
LCD	Liquid Crystal Display
IDE	Integrated Development Environment
I2C	Inter-Integrated Circuit
AC	Alternating Current

Nomenclature

(V)	Tension	V
(I)	Courant	A
(P)	Puissance électrique	W
(Voc)	Tension à circuit ouvert	V
(Isc)	Courant de court-circuit	A
(Vmpp)	Tension au point maximal	V
(Impp)	Courant au point de puissance maximum	A
(Pmax)	Puissance maximale du panneau PV	W
(Iph)	Photocourant généré par l'éclairement solaire	A
(Id)	Courant traversant la diode	A
(Id1)	Courant id1	A
(Id2)	Courant de la deuxième diode (modèle à deux diodes)	A
(Rs)	Résistance série	Ω
(Rsh)	Résistance shunt	Ω
(Vout)	Tension d'sortie	V
(Iout)	Courant d'sortie	A
(Vin)	Tension d'entrée	V
(Iin)	Courant d'entrée	A
(D)	Rapport cyclique du convertisseur	
(L)	Inductance	H
(C)	Capacité	F
(L1, L2)	Inductances du convertisseur	H
(C1, C2)	Condensateurs du convertisseur	F
(VL)	Tension aux bornes de l'inductance	V
(IL)	Courant dans l'inductance	A
(Ns)	Nombre de cellules connectées en série	
(Np)	Nombre de cellules connectées en parallèle	
(Eg)	Énergie de bande interdite (Gap) du semi-conducteur	eV
(K)	Constante de Boltzmann	J/K
(T)	Température absolue de la cellule	K
(K _γ)	Coefficient thermique du photocourant	A/K

Nomenclature

(I_{rs})	Courant de saturation	A
(G)	Irradiation solaire effective	W/m ²
(GSTC)	Irradiation solaire aux conditions standard	W/m ²
(TSTC)	Température aux conditions standard (25 °C)	K
(ΔP)	Variation de puissance	W
(ΔV)	Variation de tension	V
(α)	Variable d'ajustement du MPPT	
(D)	Rapport de conversion du convertisseur	

Introduction générale

L'accroissement soutenu de la demande énergétique mondiale, conjugué à l'épuisement progressif des réserves d'hydrocarbures, oriente aujourd'hui les politiques énergétiques vers des sources de production alternatives et pérennes. Dans ce contexte, la filière solaire photovoltaïque émerge comme une voie particulièrement prometteuse, alliant abondance de la ressource et respect de l'écosystème. Néanmoins, le rendement des modules solaires demeure intrinsèquement tributaire des aléas climatiques en particulier de l'intensité lumineuse incidente et des fluctuations thermiques ambiantes. Pour pallier cette sensibilité et garantir un rendement énergétique optimal quelles que soient les conditions, le recours à des stratégies de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) s'avère indispensable [1].

Au nombre des approches documentées dans la littérature scientifique, la méthode dite « Perturbation et Observation » (P&O) retient l'attention par ses atouts indéniables : facilité d'implémentation, exigences computationnelles modestes et performances satisfaisantes dans le cadre des installations photovoltaïques. Son mécanisme repose sur une modification itérative du rapport cyclique de l'hacheur associé au générateur solaire, de manière à maintenir celui-ci dans la zone optimale de fonctionnement [2].

La présente étude vise à élaborer et à concrétiser un dispositif de régulation MPPT fondé sur cet algorithme P&O, en vue d'optimiser le captage de la puissance électrique issue d'un module photovoltaïque. L'architecture retenue associe un convertisseur Boost, dont la commande est assurée par une plateforme Arduino Uno chargée de l'exécution algorithmique. Une étape préalable de validation numérique sous environnement Proteus a été conduite en amont du déploiement matériel [2].

L'organisation de ce mémoire s'articule autour de trois volets. Le premier chapitre expose les principes fondamentaux régissant les systèmes photovoltaïques et développe la modélisation mathématique des cellules solaires. Le second se concentre sur la représentation du dispositif de captage, la description du convertisseur élévateur et la simulation de la boucle de commande MPPT par approche P&O.

Chapitre I

Généralité sur le système photovoltaïque

1 Introduction

La production d'énergie électrique via les systèmes solaires repose fondamentalement sur l'utilisation de cellules photovoltaïques (PV). Ces composant assurent la conversion directe de l'énergie lumineuse (photons) en électricité. Toutefois, une cellule individuelle génère une puissance limitée, estimée autour de 3 WATTS pour une tension approximative de 0.5 VOLT.

Afin d'atteindre les niveaux de puissance requis pour les applications domestiques et industrielles, un assemblage de ces cellules est indispensable. Cet assemblage, en série et/ou en parallèle, forme ce qu'on appelle un module ou un panneau photovoltaïque, qui peut à son tour être intégré dans un générateur PV plus vaste [3].

Dans ce chapitre, nous présenterons tout ce qui est lié au système photovoltaïque ainsi que (la conversion, les types et le modèle de la cellule PV).

2 Système photovoltaïque

2.1 Principe de la cellule photovoltaïque

La cellule PV fonctionne comme une jonction PN capable de générer un courant continu Lorsqu'elle est exposée à la lumière.

Le matériau de base le plus courant est le silicium, un semi-conducteur, Le procédé de fabrication implique un dopage pour créer deux zones distinctes :

- **Zone N (négatives) :** Obtenues par l'ajout d'atomes de phosphore (5 électrons de valence), créant un excès d'électrons libres.
- **Zone P (positive) :** Obtenu par l'ajout d'atome de bore (3 électrons de valence), créant un déficit d'électrons ou « trous » [4]

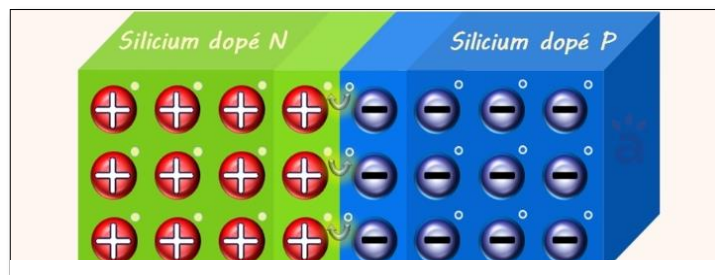


Figure I.1: Diffusion et recombinaison des électrons et trous [5].

Lors de la mise en contact de ces deux zones, un champ électrique interne se crée à la jonction. Sous l'effet du rayonnement solaire, les photons d'énergie supérieure à l'énergie du gap (E_g) transmettent leur énergie aux électrons, les libèrent et créant des paires électron-trou. Le champ électrique de la jonction sépare ces porteurs de charge, dirigent les électrons vers la zone N et les trous vers la zone P, générant ainsi une différence de potentiel [6].

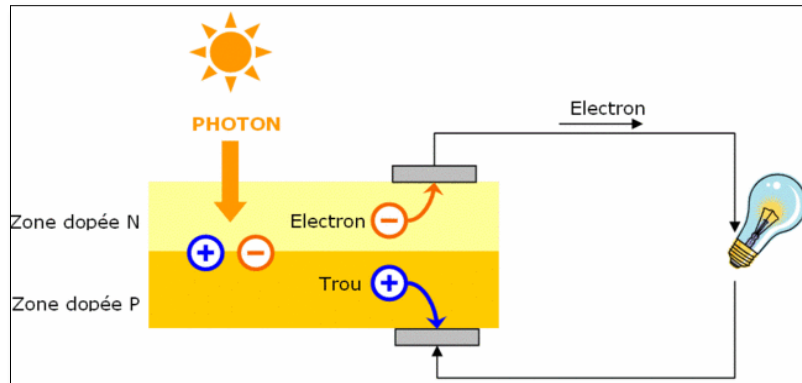


Figure I.2: l'effet photovoltaïque [5].

3 Typologie de la cellule photovoltaïque

Les cellules sont classées selon la structure cristalline du matériau utilisé :

3.1 Cellule monocristallines

Issues d'un cristal de silicium unique et pur, elles offrent le meilleur rendement (environ 16%) et une longévité élevée. Leur procédure de fabrication complexe les rend toutefois plus coûteuse [7].



Figure I.3: cellule PV monocristalline [8].

3.2 Cellules polycristallines

Formées à partir de plusieurs cristaux de silicium, elles sont plus simples à fabriquer et moins Chères, avec un rendement varient entre 12% et 14%.

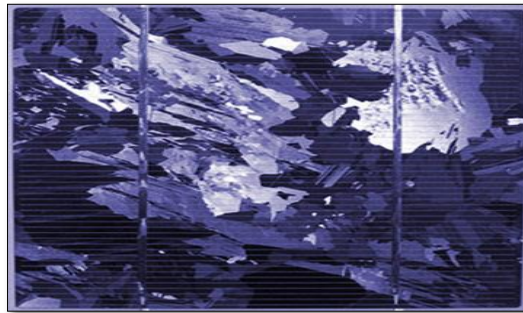


Figure I.4: Cellule PV polycristallin [8].

3.3 Cellules amorphes

Composées de couches minces de silicium non cristallisé, elles sont économiques mais présentent un rendement plus faible (6 % à 10%) et une usure plus rapide.

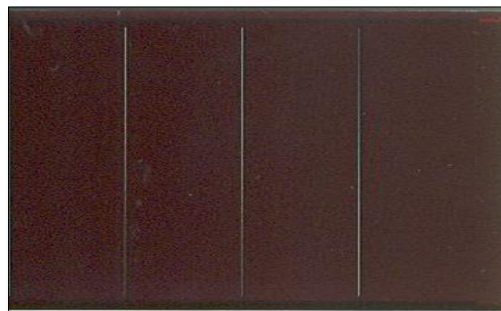


Figure I.5: Cellule PV type amorphe [8].

Le tableau ci-après synthétise les principales distinctions:

Type de cellule	Rendement	cout	Durée de vie	Application
monocristallin	16%	Elevé	Longue	Puissance moyenne et grandes
Poly-cristallin	12-14%	Moyen	Longue	Puissance moyenne et grandes
Amorphe	6-10%	Faible	Courte	Faibles puissances

Tableau I.1 : Comparaison des technologies de cellules solaires [9].

4 Module au générateur photovoltaïque

Le module photovoltaïque et l'unité fonctionnelle commercialisée. Il est constitué de plusieurs cellules interconnecté pour obtenir les caractéristiques électriques souhaitées.

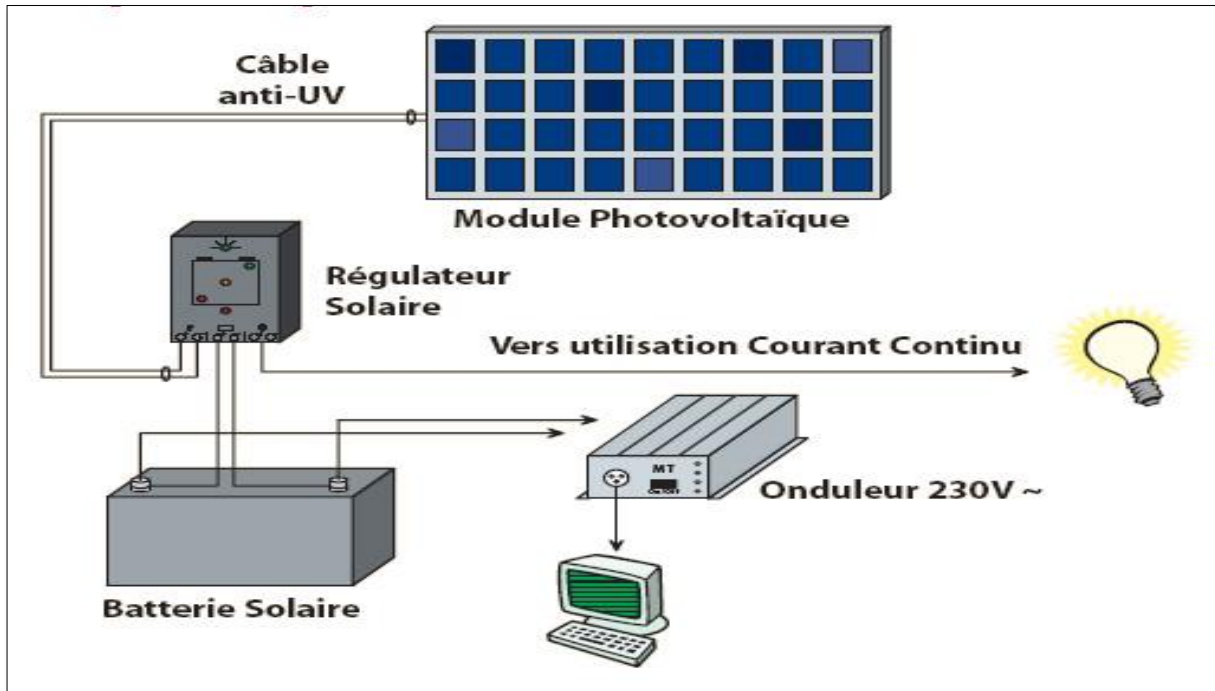


Figure I.6 : générateur solaire-DEC [10].

5 Association des cellules

5.1 Association série

Le raccordement en série de cellules N_s augmente la tension d'un générateur photovoltaïque. Dans ce cas, chaque cellule est parcourue par le même courant, et les caractéristiques finales du circuit série s'obtiennent en additionnant la tension de chaque cellule. L'équation suivante résume les caractéristiques électriques d'un circuit série de cellules N_s [11].

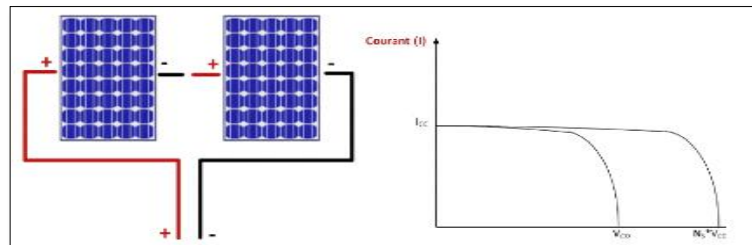


Figure I.7: a)association des cellules en série b) caractéristique $I = f(V)$.

5.2 Association en parallèle

Le raccordement en parallèle de panneaux NP permet d'augmenter le courant généré à la sortie de la chaîne, qui est égal à la somme des courants de chaque panneau, tandis que la tension à la sortie est égale à la tension unitaire entre les bornes de chaque panneau.

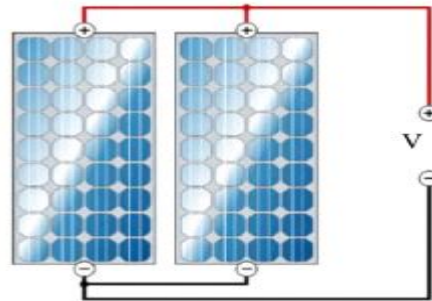


Figure I.8: Schéma d'association de deux panneaux en parallèle [11].

5.3 Association mixte

les caractéristiques courant-tension globales d'un générateur PV peuvent théoriquement être déduites des caractéristiques des unités de base identiques qui le composent. Cette combinaison repose sur deux relations, proportionnelles à N_s (sur l'axe des tensions) et N_p (sur le long l'axe des courants), où N_s et N_p représentent respectivement le nombre total

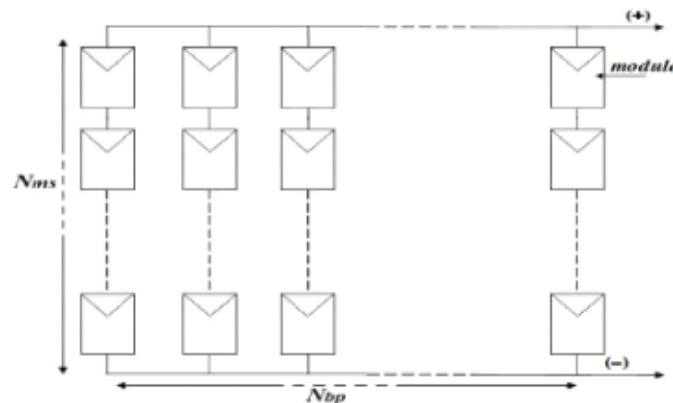


Figure I.9: Schéma de panneaux photovoltaïques en position mixte [11].

6 Dispositif de protection

Pour assurer la durabilité et la sécurité des installations, deux types de diode sont couramment utilisées:

6.1 Diode de blocage (anti-retour)

Placée en série avec le panneau, elle empêche le courant de circuler en sens inverse (de la charge vers le panneau), ce qui peut survenir la nuit ou lors de connexions parallèles [12].

6.2 Diode by-pass

Placée en parallèle inversé avec des groupes de cellules, elle permet de contourner les cellules ombrées ou défaillantes, évitant ainsi la surchauffe (effet de point chaud) et la perte de puissance significative de l'ensemble du module [13].

7 Modélisation électrique d'une cellule

Pour simuler le comportement d'un panneau solaire, on utilise un modèle équivalent électrique. Le modèle le plus répandu est celui à une diode et cinq paramètres. Il compose d'une source de courant de photo-courant (I_{ph}), d'une diode modélisant la jonction PN, d'une résistance série (R_s) représentant les pertes ohmiques, et d'une résistance shunt (R_{sh}) représentant les courantes fuites [14].

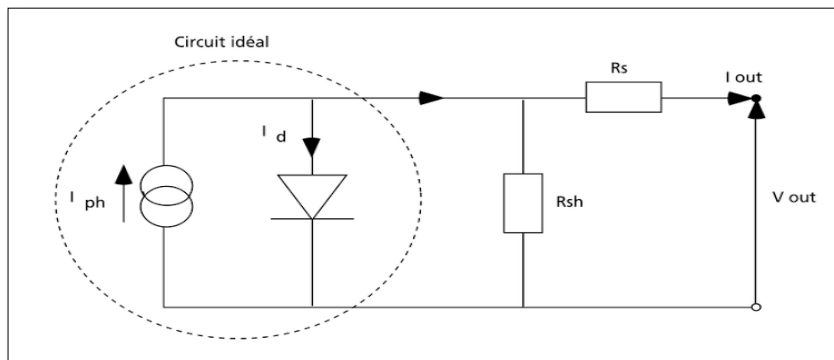


Figure I.10: schéma équivalent d'une cellule PV [15].

L'équation du courant de sortie I_{out} est donnée par la relation :

$$I_{ph} = I_{out} - I_d \left[e^{\left(\frac{q(V_{out} + R_s I_{out})}{n N_s K T} \right)} - 1 \right] - \frac{V_{out} + R_s I_{out}}{R_{sh}}$$

Où :

- I_d : Courant de saturation .
- n : Facteur idéalité .
- K : Constant de Boltzmann.
- T : Température absolue de la cellule.

Les caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) issues de ce modèle révèlent un point de fonctionnement optimal appelé point de puissance Maximale (PPM ou MPP).

Ce point correspondant au maximum de puissance que le panneau peut délivrer pour es conditions d'ensoleillement et de température données [16].

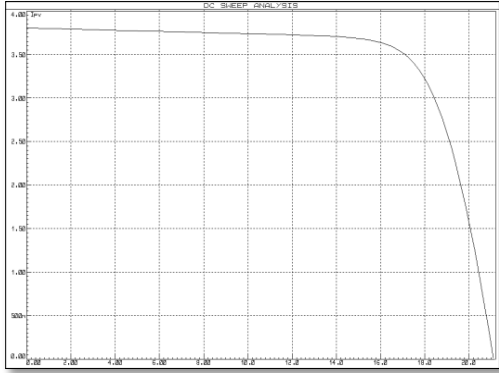


Figure I.11: Courant-Tension.

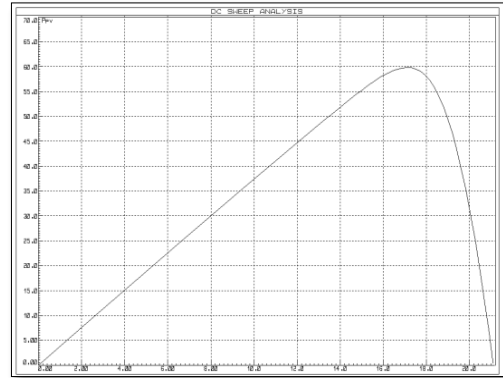


Figure I.12: Puissance-Tension.

8 L'impact de l'éclairage et de la température sur les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$

8.1 Variation de la température

La figure (I.14) présent l'effet de la température sur les caractéristiques courant-tension $I=f(V)$. Il est essentiel d'étudier l'impact des fluctuations de température sur le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

On remarque que le courant change en fonction de la température : quand la température s'élève, le courant présente une petite hausse. Par contre, la tension à circuit ouvert est négativement influencée, car elle se réduit avec la hausse de température. Par conséquent, cette réduction de la tension conduit à une diminution de la puissance optimale fournie par le générateur photovoltaïque [17].

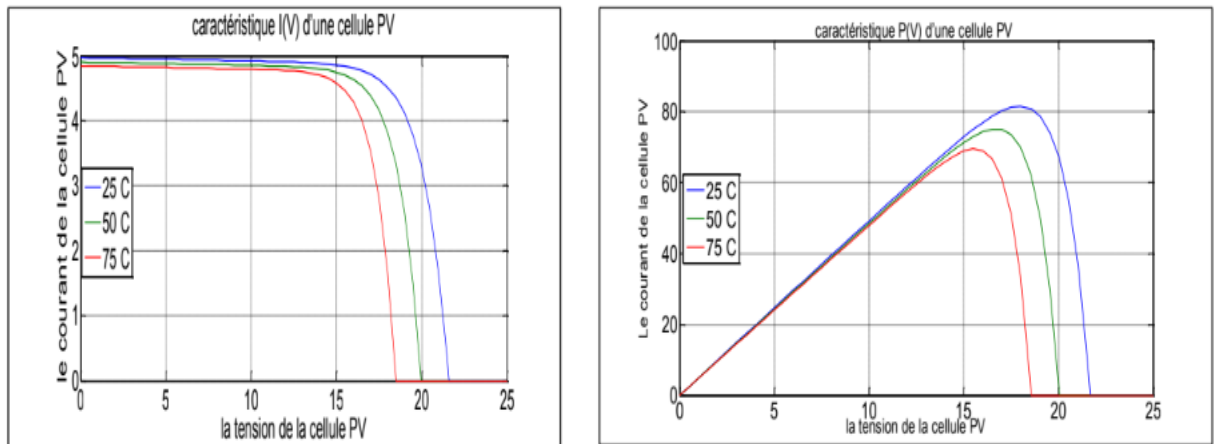


Figure I.13: La caractéristique $I=f(v)$ et $P=f(V)$ en fonction de température.

8.2 Variation du rayonnement solaire

La figure (I.15.a) présente l'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$ pour une température maintenue constante. On remarque que le courant varie de manière significative avec l'augmentation de l'éclairement, tandis que la tension ne subit qu'une faible variation. Par ailleurs, la figure (I.15.b) montre l'évolution de la puissance fournie par le générateur en fonction de la tension pour plusieurs niveaux d'éclairement. Les résultats indiquent que la puissance produite augmente lorsque l'éclairement devient plus important.

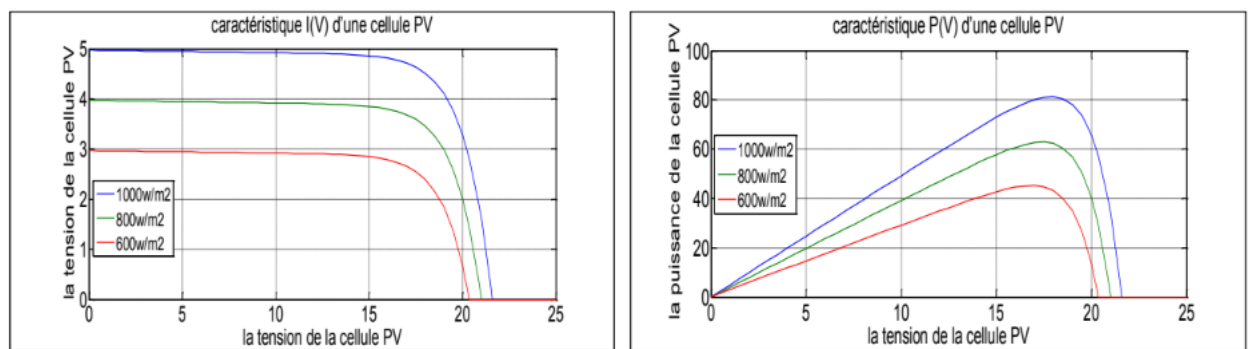


Figure I.14: La caractéristique $I=f(v)$ et $P=f(V)$ en fonction de l'éclairement [17].

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons explicité le principe de fonctionnement des cellules, leurs différentes technologies ainsi que les modes d'association et de protection. Enfin, le modèle mathématique présenté servira de base pour les simulations dans les chapitres ultérieurs, notamment pour l'étude des variations de puissance et la recherche du point maximal (MPPT).

chapitre II

Modélisation et simulation

sur MATLAB

1 Introduction

L'élaboration des systèmes photovoltaïques est une étape cruciale pour les ingénieurs développeurs, leur offrant la possibilité de réaliser des installations à la fois fonctionnelles et efficaces en termes d'énergie.

Quand un générateur solaire est associé à une batterie électrochimique, la régulation des cycles de charge et de décharge de la batterie s'avère indispensable. Un régulateur de charge solaire est chargé de cette tâche, sa mission étant de maintenir la qualité de la batterie et de maximiser sa longévité.

De plus, pour garder le champ photovoltaïque dans sa zone de performance optimale, il est courant d'intégrer une étape de conversion statique généralement un hacheur qui fonctionne comme un lien d'adaptation entre la source d'énergie et la charge.

Ce chapitre aborde la modélisation et la gestion d'une chaîne de conversion [18].

2 Modélisation d'une cellule PV

Il est crucial de modéliser mathématiquement les cellules solaires pour toute tentative d'améliorer l'efficacité. Elle constitue une étape déterminante et a mené à une variété accrue des modèles présentés. Un circuit équivalent peut être utilisé pour modéliser le comportement des cellules photovoltaïques. Ce circuit est adapté à une utilisation pour une cellule unique, un module regroupant plusieurs cellules ou un champ photovoltaïque. Nous procéderons à la modélisation et à la simulation de la cellule photovoltaïque, ce qui nous donnera la possibilité de décrire les comportements du générateur photovoltaïque dans des conditions requises. Plusieurs modèles ont été suggérés pour illustrer une cellule photovoltaïque, nous discuterons de deux d'entre eux [19].

2.1 Model à une diode

On peut modéliser de manière rudimentaire une cellule photovoltaïque parfaite comme une source de courant idéal, dont l'intensité est corrélée directement à l'éclairement capté, positionnée en parallèle avec une diode de jonction p.-.

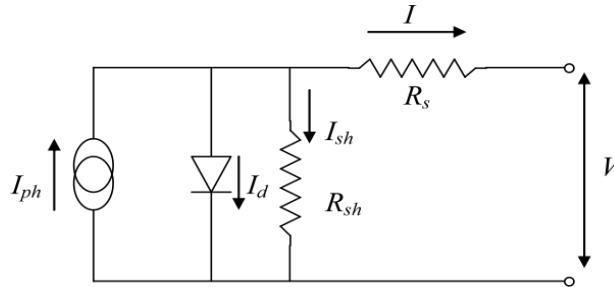


Figure II.1: Modèle à une diode [19].

Le modèle réel affine cette représentation en y incorporant les pertes ohmiques internes de la cellule. Ces imperfections manifestent une résistance série qui encadre les résistances de contact et la mobilité restreinte des semi-conducteurs, de même qu'elles se traduisent par une résistance shunt qui simule les courants de fuite à travers les irrégularités de la jonction p-n.

Au-delà du modèle idéal, le modèle effectif prend en compte les propriétés résistives de la cellule, qui sont représentées par une résistance en série, ainsi que les courants de fuite, représentés par une résistance shunt.

L'équation caractéristique est dérivée directement de la loi de Kirchhoff.

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (II.1)$$

ensuite

$$I_{ph} = [I_{cc} + K_i (T - T_{ref})] \frac{G}{G_{ref}} \quad (II.2)$$

G Et G_{STC} : éclairement W/m^2 .

T Et T_{STC} : Température en K.

$I_{ph, c}$ (I_{cc}) : Le courant photonique A.

K_i : Coefficient de température en A/K.

Le courant de jonction I_d (courant traversant la diode) est donné

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{V + R_s I}{V_t}} - 1 \right) \quad (II.3)$$

Est on a

$$I_0 = (I_{cc} - I_m) \left(e^{\frac{-(V_m + R_s I_m)}{V_t}} \right) \quad (II.4)$$

Où :

E_g : l'énergie de Gap(eV).

I_{rs} : le courant réversible: 10^{-10} A.

- Le courant de la résistance shunt :

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

Les conditions de référence, identifiées par G et G ref, se réfèrent aux conditions environnementales qui déterminent les caractéristiques électriques fondamentales du module. Ces paramètres, à savoir la tension en circuit ouvert (V_{oc}), le courant de court-circuit (I_{cc}), ainsi que la tension et le courant à la puissance maximale (V_{mpp} , I_{mpp}), représentent soit les spécifications techniques du fabricant, qui sont définies selon les STC (Conditions de test standard : 1000 W/m^2 , 25°C , spectre AM 1,5), soit les valeurs obtenues à partir d'une campagne de mesures expérimentales effectuée sur le module.

C'est ce modèle que nous avons employé pour simuler le générateur photovoltaïque dans notre étude, avec les paramètres ci-après [20].

2.2 Model à deux diodes

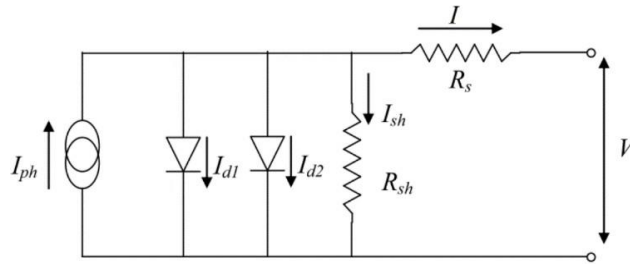


Figure II.2: Modèle à deux diodes.

$$\bullet \quad I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{sh} \quad (II.6)$$

2.3 Caractéristique de PV utilisée

Model Number	STP
Rated Maximum Power	(P_{max}) 85W
Output Tolerance	$\pm 5\%$
Current at Pmax	(I_{mp}) 4.80A
Voltage at Pmax	(V_{mp}) 17.8V
Short-Circuit Current	(I_{sc}) 5.15A
Open-Circuit Voltage	(V_{oc}) 22.2V
Nominal Operating Cell Temp.	(T_{NOCT}) $45^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$
Weight	8kg
Dimension	1195mm $\times$ 541mm $\times$ 30mm
Maximum System Voltage	1000V
Maximum Series Fuse Rating	15A
Cell Technology	mono-Si
Application Class A	
All technical data at standard test condition AM=1.5 E=1000W/m ² Tc=25°C	
WARNING Hazardous electricity can shock, burn or cause death. Do not touch terminals.	
 	
Add: 17-6 ChangJiang South Road, New District Wuxi, China 214028	
Customer Service Hot Line: +86 400 8888 009 Fax: +86 510 8534 3321	
Made in China	

Figure II.3: Caractéristique de PV ou niveau du Labo.

3 Convertisseur CC-CC

Les hacheurs, ou convertisseurs DC-DC, offrent un contrôle de la puissance électrique dans un circuit à courant continu avec une flexibilité élevée et une grande efficacité. Ils trouvent leur application dans les systèmes énergétiques.

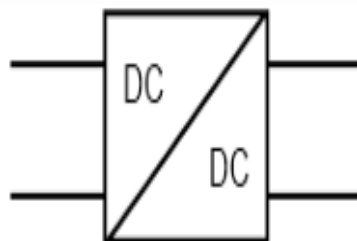


Figure II.4: convertisseur de type DC-DC.

Nous présentons ici les principaux types de convertisseurs :

- Convertisseur Cuk
- Convertisseur abaisseur (Buck)
- Convertisseur élévateur (BOOST) [21].

3.1 Convertisseur Cuk

Le convertisseur Ćuk, introduit par Slobodan Ćuk en 1977, est un dispositif DC-DC de type continu à continu, capable d'opérer en tant qu'élévateur ou réducteur. Il offre également la possibilité d'inverser la polarité de la tension de sortie. Ce convertisseur se démarque par une faible ondulation du courant ainsi qu'une efficacité supérieure comparativement à d'autres topologies

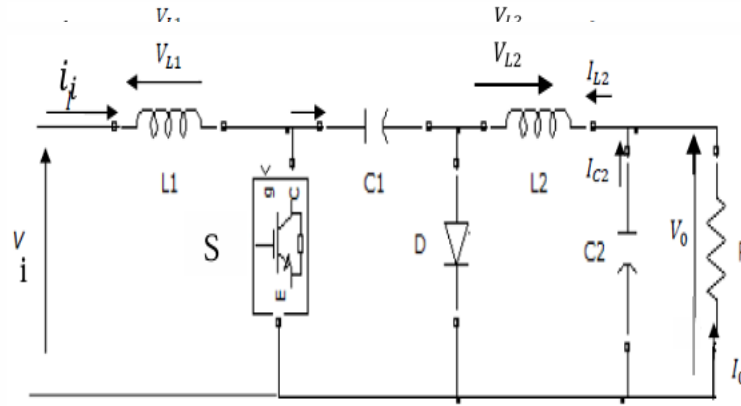


Figure II.5: convertisseur Cuk. [21].

Pour $t \in [0, DT]$, l'enclenchement de S provoque la charge de la self L1 par la tension d'alimentation primaire, la self L2 étant quant à elle reliée en série aux capacités C1 et C2. Nous avons :

$$V_{L1}(t) = V_i(t)$$

$$V_{L2}(t) = V_o - V_{C1}(t) \quad (II.8)$$

Pour $t \in [DT, T]$, la diode est passante :

$$V_{L1}(t) = V_i(t) - V_{C1}(t) \quad (II.9)$$

$$V_{L2}(t) = V_o \quad (II.10)$$

Les valeurs V_{L1} et V_{L2} sont obtenues par :

$$V_{L1} = V_i \times D + (V_i - V_{C1}) \times (1 - D) = 0 \quad (II.11)$$

$$V_{L2} = (V_o - V_{C1}) \times D + (1 - D) \times V_o = 0 \quad (II.12)$$

Le rapport de conversion $M(D)$ est calculé comme suit :

$$M(D) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{D}{1-D} \quad (\text{II.13})$$

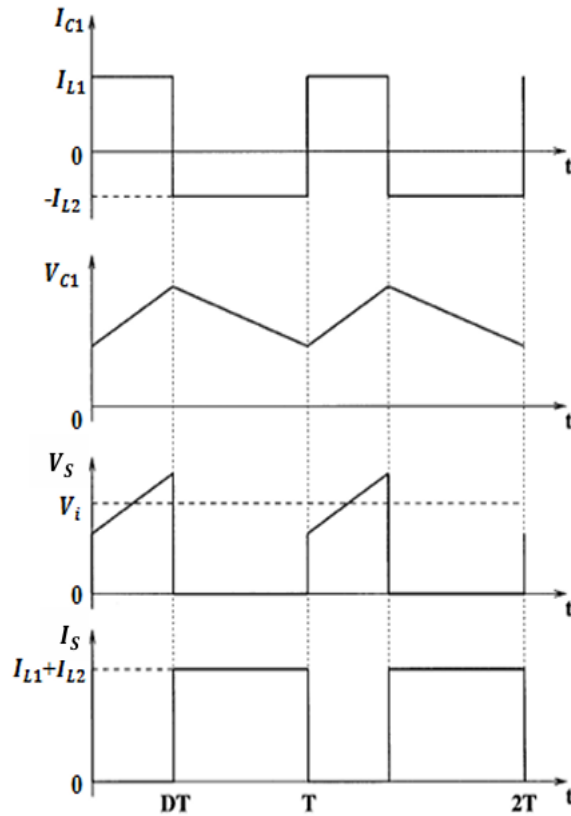


Figure II.6: Signaux de tensions et de courants du convertisseur Buck [21].

3.2 Convertisseur abaisseur (Buck)

Le convertisseur abaisseur, souvent appelé dans la littérature hacheur abaisseur ou encore chopper série, est principalement utilisé pour obtenir une tension de sortie inférieure à la tension d'entrée. La valeur de cette tension dépend directement du rapport cyclique appliqué au commutateur.

Ce type d'hacheur série permet de contrôler le transfert d'énergie dans les conditions suivantes :

- Lorsque la source est un générateur de tension dont la valeur reste toujours positive ;

- Lorsqu'il alimente un récepteur de courant qui ne peut circuler que dans un seul sens (courant non négatif).

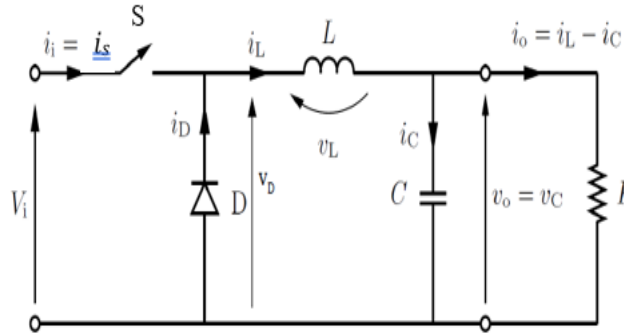


Figure II.7: Convertisseur abaisseur [22].

Pendant la phase où l'interrupteur est fermé, une tension est appliquée à l'inductance :

$$V_L = V_i - V_o \quad (\text{II.14})$$

En revanche, lorsque l'interrupteur est ouvert, la tension à ses bornes change de valeur

$$V_L = -V_o \quad (\text{II.15})$$

La variation du courant dans l'inductance est directement liée à la tension appliquée à celle-ci, comme l'indique la relation

$$V_L = \frac{L di_L}{dt} \quad (\text{II.16})$$

Ainsi, le courant évolue de manière périodique : il augmente avec une pente positive constante lorsque l'interrupteur est fermé

$$i_L = \frac{V_i - V_o}{L} t \quad (\text{II.17})$$

Puis diminue avec une pente négative constante lorsqu'il est ouvert

$$i_L = -\frac{V_o}{L} t \quad (\text{II.18})$$

À l'état stable, l'inductance présente une tension moyenne nulle à ses bornes.

$$D = (V_i - V_o) - (1 - D) \times V_o \quad (\text{II.19})$$

On en déduit alors la relation :

$$V_o = D \times V_i \quad (\text{II.20})$$

Par conséquent, la tension de sortie reste toujours inférieure ou égale à la tension d'entrée, puisque le rapport cyclique D est compris entre 0 et 1.

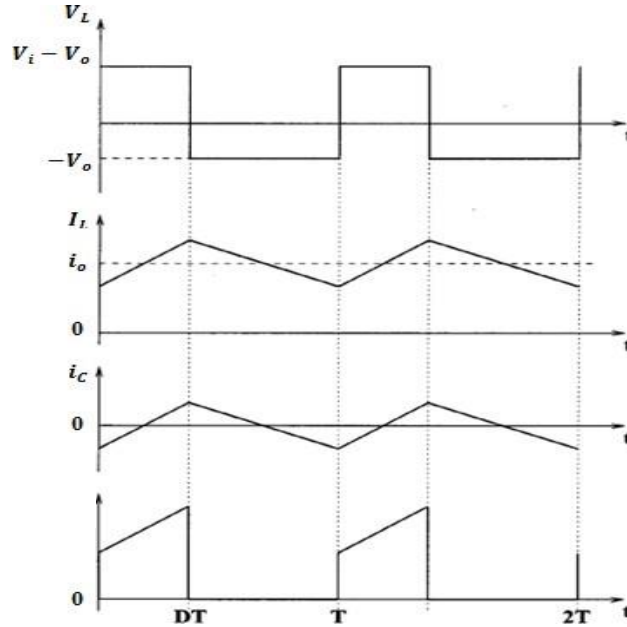


Figure II.8: Signaux de tensions et de courants du convertisseur Buck [21].

3.3 Convertisseur élévateur (BOOST):

Le convertisseur élévateur, également appelé survolteur ou encore « BOOST », est un type de hacheur parallèle. Il est principalement utilisé pour transformer une tension. Ce type assure le transfert d'énergie dans des conditions spécifiques : il est alimenté par une source de courant dont l'intensité reste toujours positive, et il alimente un récepteur de tension dont la tension ne peut pas devenir négative.

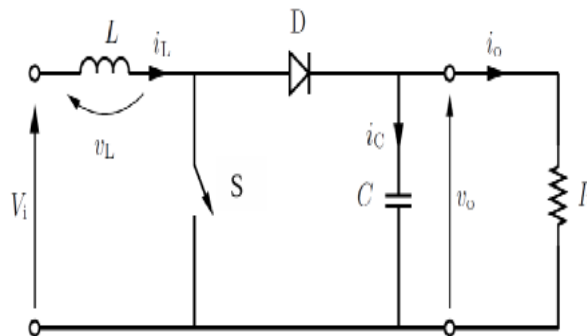


Figure II.9: Convertisseur élévateur (BOOST) [23].

Lorsque l'interrupteur se ferme, le courant dans l'inductance croît suivant la relation

$$V_L = V_i$$

En revanche, lorsque l'interrupteur est ouvert, la tension aux bornes de l'inductance change de signe, ce qui provoque une diminution du courant avec une pente définie par les relations

$$V_L = V_i - V_o \quad (\text{II.21})$$

Et

$$I_L = \frac{(V_i - V_o)}{L} < 0 \quad (\text{II.22})$$

À l'état stable, l'inductance présente une tension moyenne nulle à ses bornes, la valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance est nulle, comme l'indique la relation

$$D V_i + (1 - D) \times (V_i - V_o) = 0 \quad (\text{II.23})$$

À partir de cette condition, on obtient la relation

$$V_o = \frac{1}{(1-d)} \times V_i \quad (\text{II.24})$$

On en déduit alors que la tension de sortie est supérieure ou égale à la tension d'entrée, conformément à la relation, puisque le rapport cyclique D est compris entre 0 et 1.

3.3.1 Calcul paramètre de BOOST

- **Duty cycle**

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out}} \quad (\text{II.25})$$

$$D = 1 - \frac{17.8}{35} = 0.5$$

- **Courant d'entrée**

$$I_{in} = \frac{P}{V_{in}} \quad (\text{II.26})$$

$$I_{in} = \frac{85}{17.8} = 4.8$$

- **Inductance Boost**

$$L = \frac{V_{in} \times D}{\Delta I \times f} \quad (II.27)$$

$$L = \frac{17.8 \times 0.5}{1.5 \times 2000} = 2.9 \text{ mh}$$

- **Condensateur sortie**

$$C_{out} = \frac{I_{out} \times D}{\Delta V \times f} \quad (II.28)$$

$$C_{out} = \frac{2.4 \times 0.5}{1 \times 2000} = 617 \mu f$$

4 Technique de commande *MPPT*

La technique MPPT optimise l'alimentation solaire en Localisant le point de puissance maximale du panneau photovoltaïque. Elle repose sur une adaptation dynamique du rapport cyclique pour maintenir la tension de sortie au niveau de V_p^M , où P est maximal. L'approche perturbe V_p^M dans un intervalle contrôlé et observe les variations de puissance pour ajuster $\alpha(k)$. Cette méthode améliore l'efficacité énergétique sans surcharger le système. Elle s'appuie sur des modèles dynamiques simples mais précis.

Son implémentation en microcontrôleur est robuste et fiable. L'algorithme est largement utilisé dans la régulation DC-DC photovoltaïque [24].

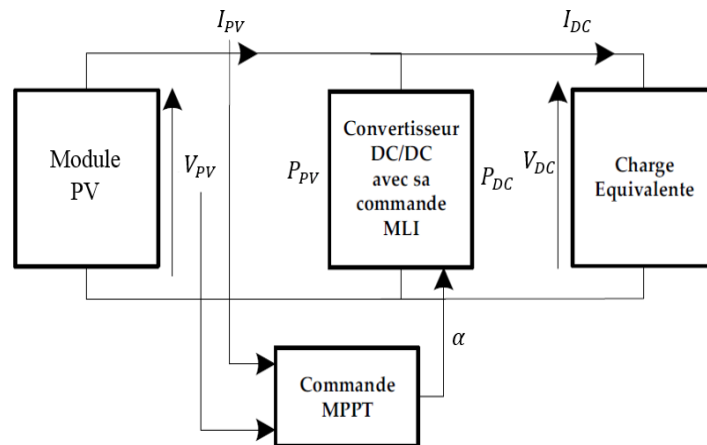


Figure II.10: Configuration simple de conversion photovoltaïque intégrant une commande *PPM*.

4.1 Algorithme perturbation & Observation (P&O)

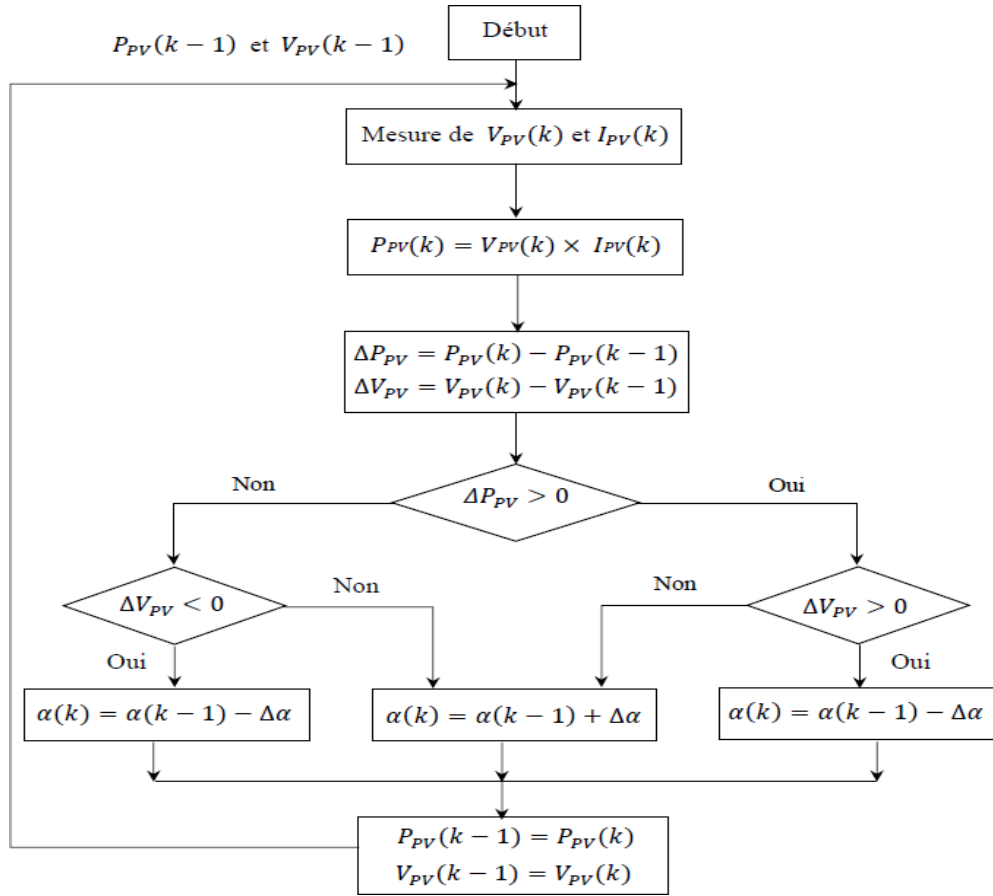


Figure II.11: Organigramme de P&O

Le protocole (Perturbation & Observation) constitue de recherche adaptative appliquée au suivi du point optimal de puissance, où le rapport cyclique est ajusté itérativement en fonction des variations observées. Cette approche systématique évite les heuristiques non validées en assurant un contrôle rigoureux sur chaque étape d'optimisation. Elle s'inscrit dans une logique computationnelle fondée sur l'observation directe du comportement dynamique. Son implémentation repose sur des calculs fiables et reproductibles, Le principe s'appuie sur des lois physiques bien établies, rendant la solution intrinsèquement robuste [25].

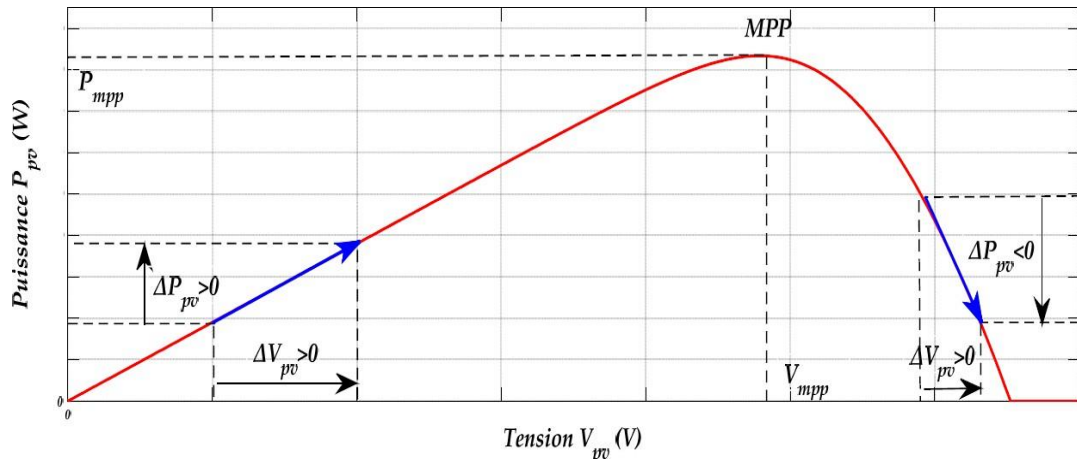


Figure II.12: Principe de fonctionnement d'un command MPPT.

- **Premier cas : $\Delta P_{pv} > 0$ et $\Delta V_{pv} > 0$**

Lorsque ΔV_{PV} dépassé zéro et $\Delta V > 0$, l'état de fonctionnement se situe à gauche du point optimal, indiquant une réduction possible de la tension. Le rapport cacique est donc ajusté en conséquence, selon une formule conditionnelle qui reflète ce déplacement dynamique. La prochaine étape consiste à renforcer cette action par une modulation adaptée.

- **Deuxième cas : $\Delta P_{pv} > 0$ et $\Delta V_{pv} < 0$**

Lorsque ΔV_{PV} reset positive alors que $\Delta V < 0$, suggérant un dépassement du point maximal de puissance. Ainsi, l'ajustement implique une variation opposée au précédent : on augmente V_{PV} en modulant le rapport cyclique avec un signe opposé.

- **Troisième cas : $\Delta P_{pv} < 0$ et $\Delta V_{pv} < 0$**

Le troisième cas, marqué par ΔV_{PV} négatif et $\Delta V < 0$, confirmer que le system se trouver à gauche du MPP, bien qu'avec une puissance décroissante, l'ajustement correspond alors à une modification de sens en faveur d'un retour progressive vers l'état optimal.

- **Quatrième cas : $\Delta P_{pv} < 0$ et $\Delta V_{pv} > 0$**

Dans le dernier scenario, ΔV_{PV} est positive mais $\Delta V < 0$, ce qui indique un dépassement du point maximal. La stratégie consiste à diminuer la tension afin d'atteindre l'équilibre, c'est-à-dire de faire évoluer le rapport cyclique dans la direction oppose au precedent [26].

5 Modele de la commande P&O

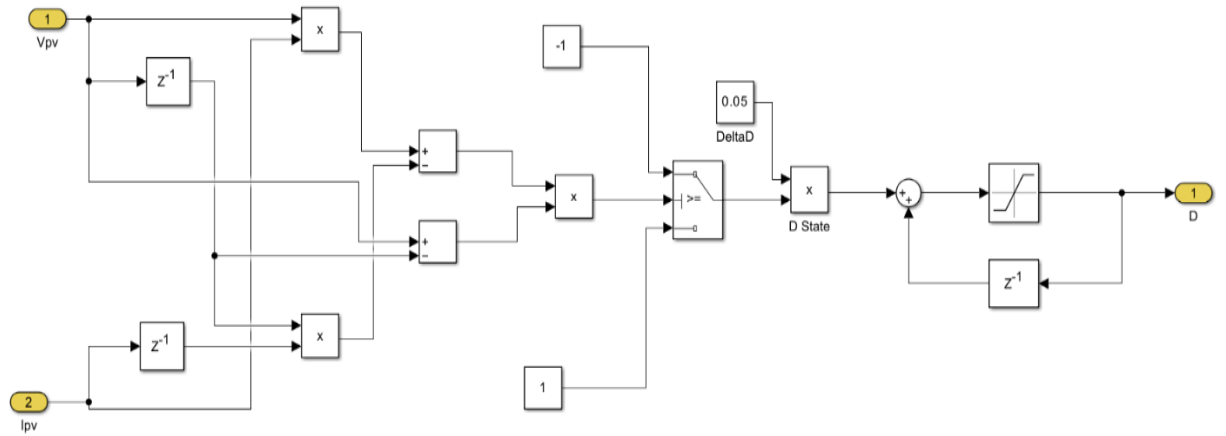


Figure II.13: Schéma block de la commande P&O

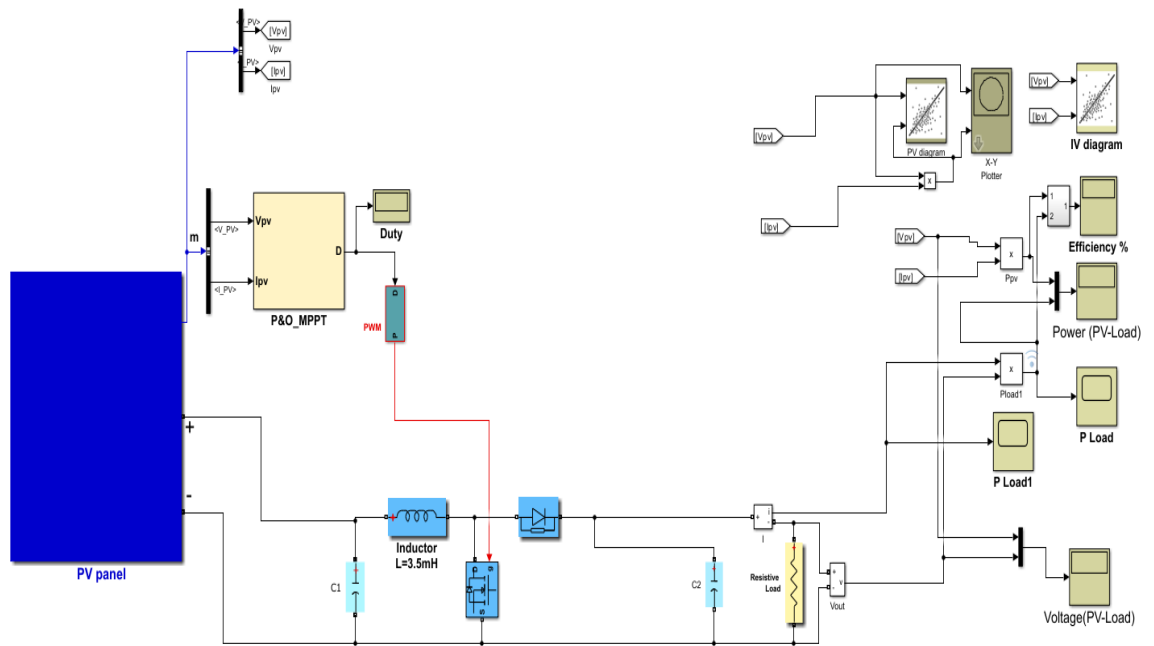


Figure II.14: Structure du système global « PV-BOOST-Charge-MPPT ».

6 Variation d'éclairement

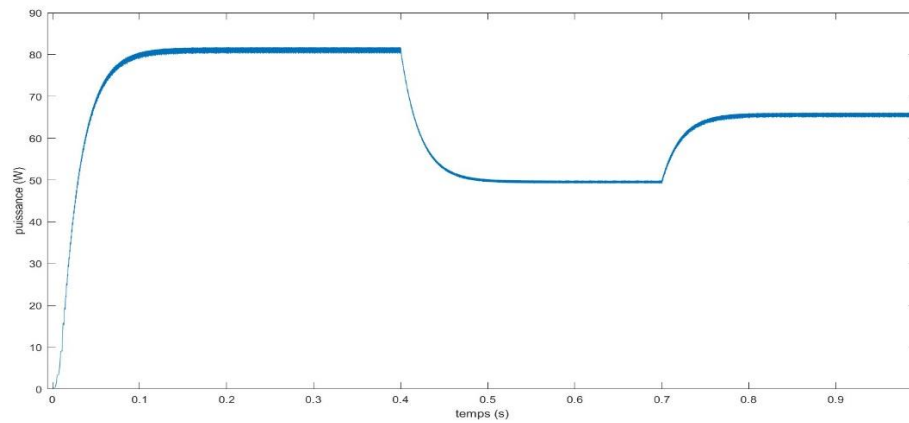


Figure II.15: Puissance en fonction du temps (Variation d'éclairement).

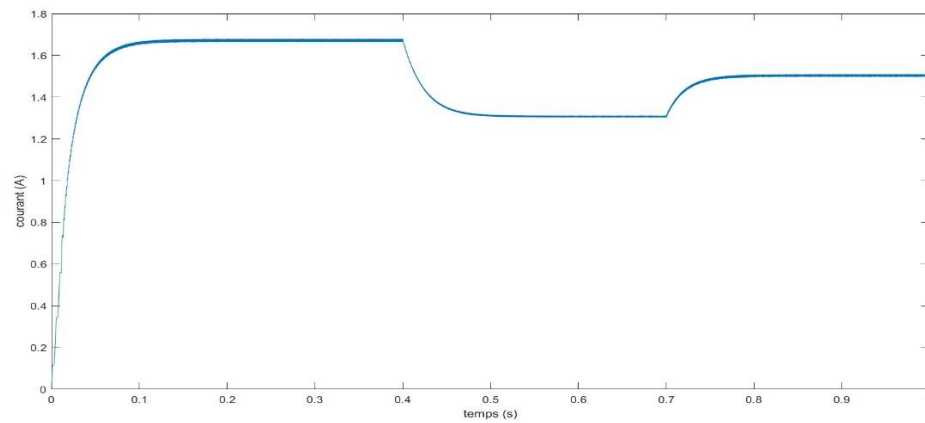


Figure II.16: Courant en fonction du temps (Variation d'éclairement).

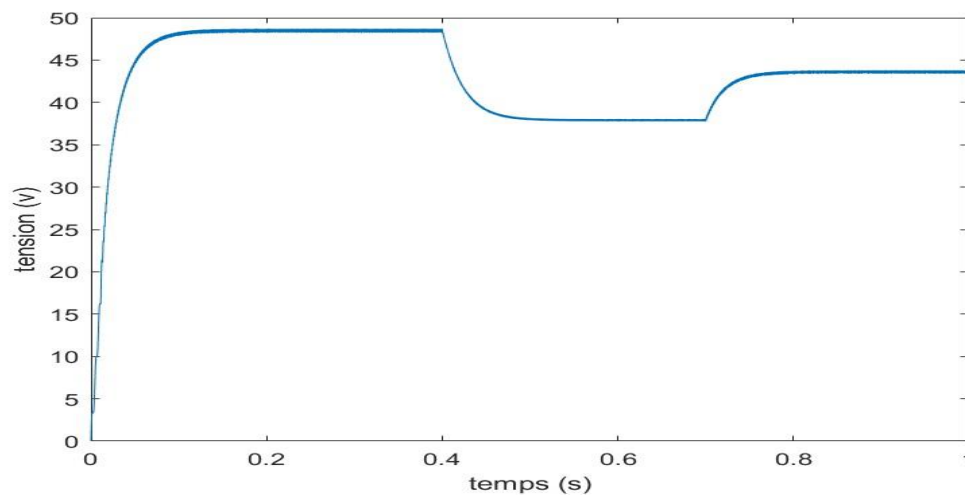


Figure II.17: Tension en fonction du temps (Variation d'éclairement).

6.1 Interprétation des Résultats de Simulation

- De 0 à 0,4 (Éclairement maximal/initial=1000) :

Le système démarre et l'algorithme P&O converge rapidement vers le Point de Puissance Maximale (MPP). La puissance se stabilise à environ **81 W**, le courant à **1,67A** et la tension à **48,5V**.

- À $t = 0$, (Chute d'éclairement) :

L'éclairement subit une baisse soudaine (ex. passage de 1000W/m^2 à 600W/m^2), La puissance chute instantanément avant de se stabiliser à **50W**. On remarque que le courant subit une baisse très linéaire et proportionnelle (il tombe à environ 1,3A, tandis que la tension baisse de manière plus modérée (autour de 38 V), ce qui est tout à fait caractéristique des propriétés physiques d'une cellule PV.

- À $t = 0,7$ (Augmentation partielle d'éclairement) :

L'éclairement remonte à un niveau intermédiaire 800W/m^2 . La puissance augmentée pour atteindre un nouveau palier stable à environ **65 W**.

7 variations de la température

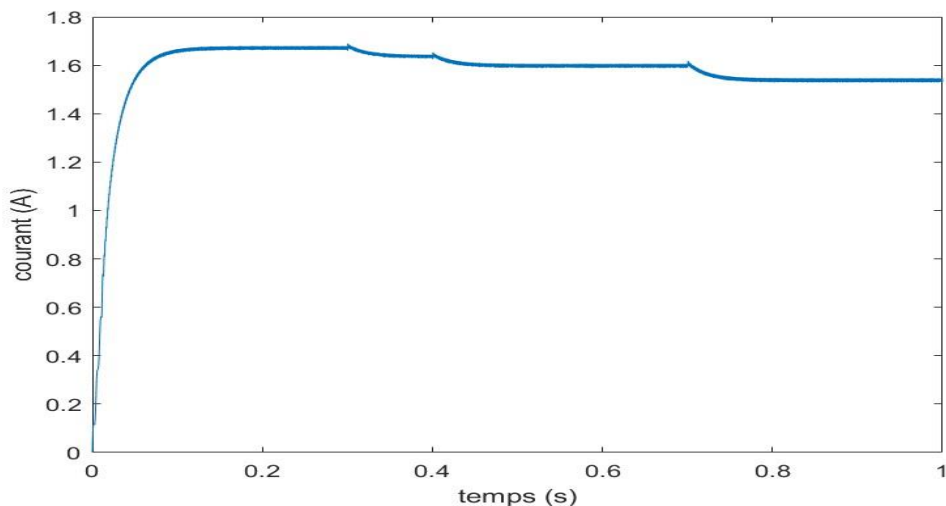


Figure II.18: Courant en fonction du temps (Variation de température).

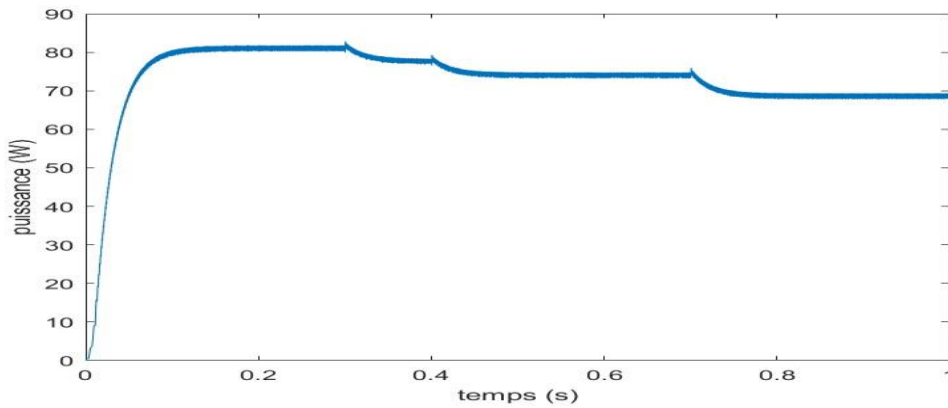


Figure II.19: Puissance en fonction du temps (Variation de température).

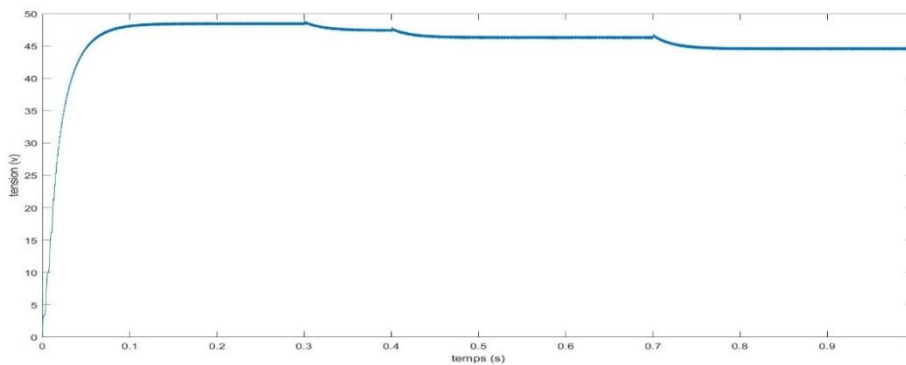


Figure II.20: Tension en fonction du temps (Variation de température).

7.1 Interprétation des Résultats de Simulation

0 à 0,3 s : le système reste à sa température initiale (environ 25 °C dans les conditions STC). Durant cette phase, la puissance maximale nominale est maintenue à 81 W.

Aux instants $t=0,3s$, $0,4s$ et $0,7s$: L'élévation graduelle de la température provoque une diminution de la puissance maximale disponible. Celle-ci évolue ainsi de 81 W à 78 W, puis 74 W et enfin 69 W.

Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'élaboration des bases théoriques et des outils mathématiques requis pour la synthèse d'une chaîne complète de conversion d'énergie solaire. Deux formalismes ont été développés pour caractériser la cellule photovoltaïque : d'une part, le modèle monocristallin à diode unique, privilégié pour notre application du fait de son équilibre entre rigueur et facilité de mise en œuvre ; d'autre part, le modèle bicristallin à deux diodes, davantage représentatif des mécanismes physiques intrinsèques. L'approche retenue le modèle à diode unique complété par les résistances de conduction et de fuite a permis de restituer de manière satisfaisante le comportement électrique du générateur photovoltaïque sous des

conditions variables d'irradiation et de température, en s'appuyant sur les caractéristiques du module de 85 W utilisé expérimentalement.

Ensuite, nous avons examiné les principales topologies de convertisseurs DC-DC (Buck, BOOST et Ćuk), en mettant l'accent sur le convertisseur élévateur (Boost). Les calculs détaillés des composants passifs (inductance de 2,9 mH et condensateur de sortie de 617 μ F) ont été présentés pour un fonctionnement optimal avec un rapport cyclique de 0,5, permettant d'élever la tension du module PV (17,8 V) vers la tension requise par la charge (35 V).

Enfin, nous avons abordé la technique de commande MPPT par l'algorithme Perturbation & Observation (P&O). Les simulations réalisées sous MATLAB/Simulink ont démontré l'efficacité de cette stratégie dans le suivi du point de puissance maximale, tant lors de variations d'éclairement que de température. Les résultats obtenus confirment la robustesse de l'algorithme convergence rapide vers le MPP nominal (81 W), adaptation aux chutes et reprises d'éclairement, ainsi que gestion des dérives thermiques avec une dégradation progressive de la puissance extraite conforme aux caractéristiques physiques des cellules PV.

Chapitre III

Réalisation du régulateur

1 Introduction

Après avoir étudié l'ensemble des notions théoriques indispensables à l'élaboration de notre régulateur, ce chapitre sera consacré à sa conception détaillée. Nous y présenterons les différents composants constituant le système ainsi que les critères retenus pour leur choix et leur dimensionnement. L'objectif principal est d'assurer un fonctionnement stable, fiable et performant du régulateur dans les conditions d'utilisation prévues.

2 Logiciel et matérielle

2.1 Logiciel PROTEUS

PROTEUS constitue un environnement intégré destiné aux concepteurs de systèmes électroniques, qu'il s'agisse d'ingénieurs, d'étudiants ou de professionnels du secteur. Cette plateforme unifie au sein d'une interface conviviale les fonctionnalités de simulation de circuits et de conception assistée par ordinateur.

Par ailleurs, le logiciel ISIS de PROTEUS, principalement reconnu pour l'édition de schémas électriques, offre également des fonctionnalités de simulation essentielles [27].

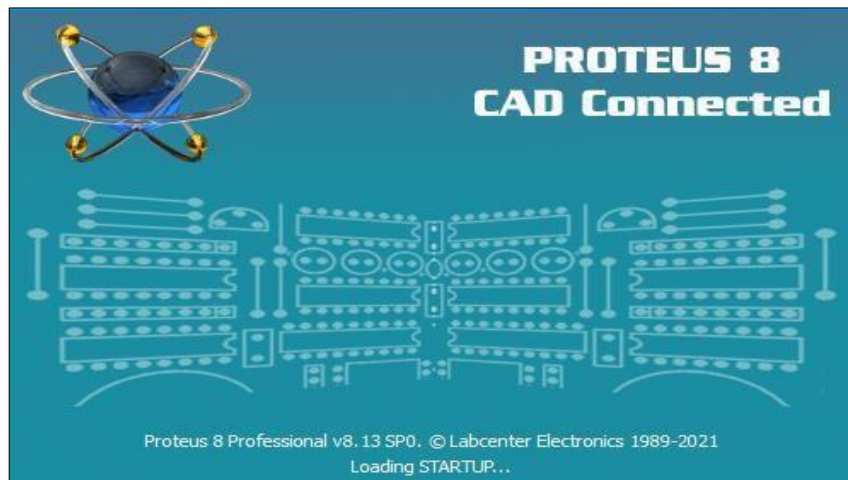


Figure III.1: L'interface de PROUTEUS ISIS.

2.2 Logiciel ARDUINO IDE

La plateforme de programmation ARDUINO (IDE) met à disposition un éditeur de code, une interface de messagerie, une console de sortie, une barre d'outils fonctionnelle et des menus

Dédiés ,Elle assure la liaison avec le circuit ARDUINO afin d'y charger les programmes et d'établir un dialogue interactif avec le dispositif [28].

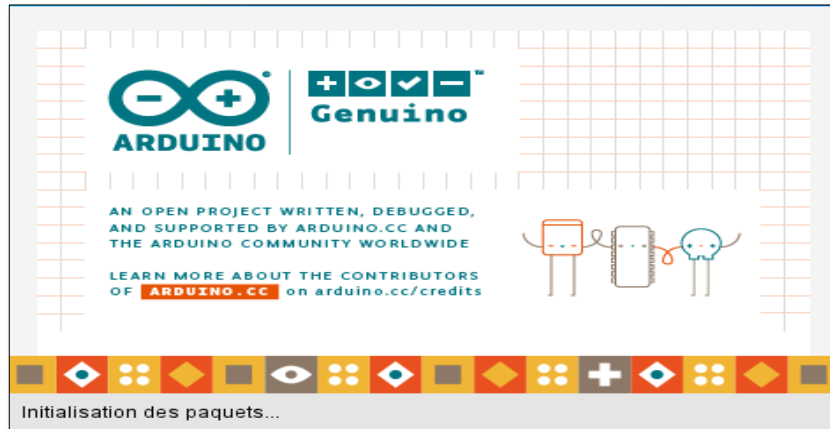


Figure III.2 : L'interface d'ARDUINO IDE

3 Matériel

3.1 Convertter BOOST

Ce circuit permet d'obtenir une tension stable et régulée grâce à un interrupteur électronique (IRFZ44N), une diode, une conductance et un condensateur.

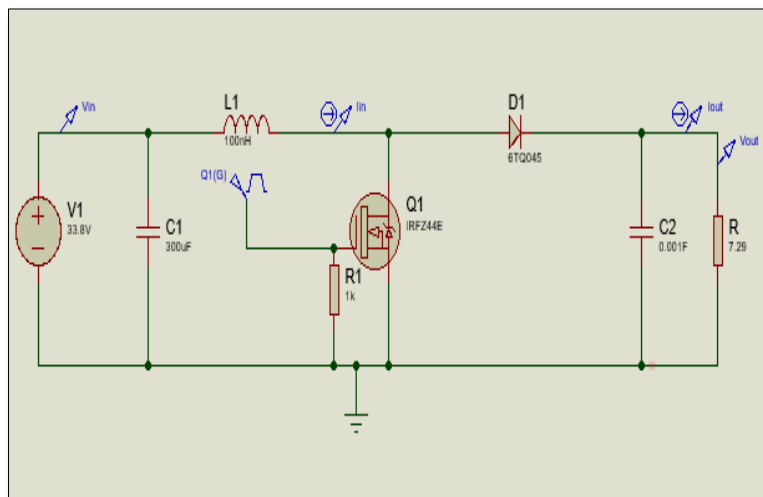


Figure III.3 : BOOST réalisé sur PROTEUS.

3.2 ARDUINO UNO R3

Dans un système MPPT pour un panneau photovoltaïque, la carte ARDUINO UNO R3 est utilisée pour mesurer la tension et le courant. Elle génère ensuite un signal PWM pour commander le convertisseur DC-DC et optimiser l'énergie extraite du panneau.

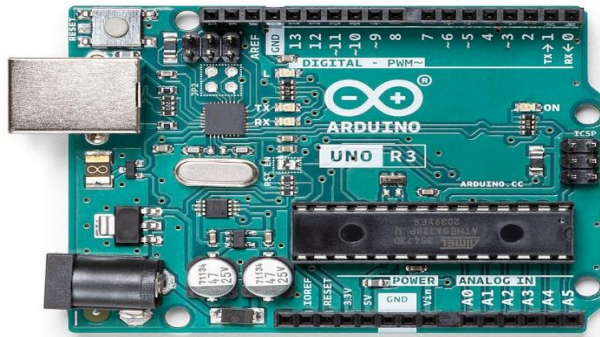


Figure III.4: ARDUINO UNO R3 sur PROTEUS [29].

3.3 LCD i2c 16X02

Le LCD I2C 1602 est un écran alphanumérique de 2 lignes et 16 caractères qui communique avec le microcontrôleur via le protocole I2C, nécessitant seulement deux lignes de communication (SDA et SCL). Il permet d'afficher facilement les informations du système tout en réduisant le nombre de connexions matérielles. Dans ce projet, cet écran est utilisé pour la lecture et l'affichage en temps réel des valeurs de puissance mesurées

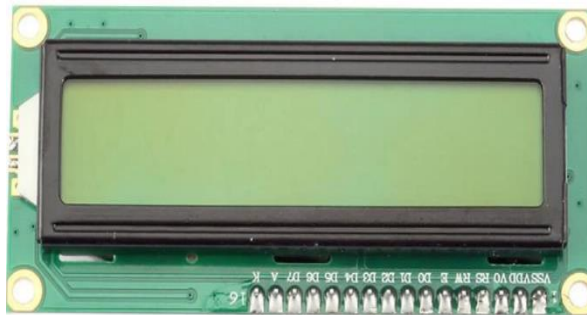


Figure III.5: écran LCD i2c 16X02.

3.4 Capteur de tension

La sonde différentielle haute tension est un instrument de mesure destiné à être connecté à un oscilloscope afin de mesurer la différence de potentiel entre deux points d'un circuit sans les référencer directement à la terre. Elle assure une isolation galvanique entre le circuit testé et l'appareil de mesure, permettant ainsi l'analyse sécurisée de signaux à haute tension, notamment dans les systèmes électroniques de puissance, les convertisseurs statiques et les installations industrielles. La sonde différentielle réduit la tension mesurée selon un rapport d'atténuation déterminé (par exemple 1/20 ou 1/200) avant de l'appliquer à l'entrée de l'oscilloscope.



Figure III.6 : capteur de tension LANGLOIS ISOL 720.

3.5 Capteur de courant

a pince de courant (ou pince ampèremétrique) est un capteur permettant de mesurer le courant sans nécessiter de connexion directe au circuit. Son principe de fonctionnement repose sur la détection du champ magnétique généré par le courant traversant le conducteur. Associée à un oscilloscope ou à un système d'acquisition, elle convertit le courant mesuré en une tension proportionnelle, facilitant ainsi l'analyse des signaux électriques en courant continu (DC) et en courant alternatif (AC).



Figure III.7 : capteur de courant.

4 Simulation du système sous PROTUES

Afin de valider le fonctionnement du régulateur MPPT avant sa réalisation pratique, nous avons fait une simulation sur Protues. Cette étape permet de vérifier l'interaction entre les différents composants du système, notamment le panneau photovoltaïque, le convertisseur Boost, la carte Arduino Uno et les capteurs de mesure. Elle permet également d'évaluer les performances de l'algorithme MPPT de type Perturb and Observe (P&O) dans des conditions de fonctionnement proches de la réalité.

4.1 Schéma équivalent

Le système simulé comprend un panneau photovoltaïque, un convertisseur Boost, une carte Arduino Uno ainsi que des capteurs de tension et de courant. L'Arduino mesure en temps réel les grandeurs électriques du panneau, calcule la puissance produite et exécute l'algorithme MPPT de type P&O afin d'ajuster le rapport cyclique du signal PWM commandant le convertisseur Boost. Cette commande permet d'assurer le fonctionnement du panneau au voisinage de son point de puissance maximale.

Chapitre III Réalisation du régulateur

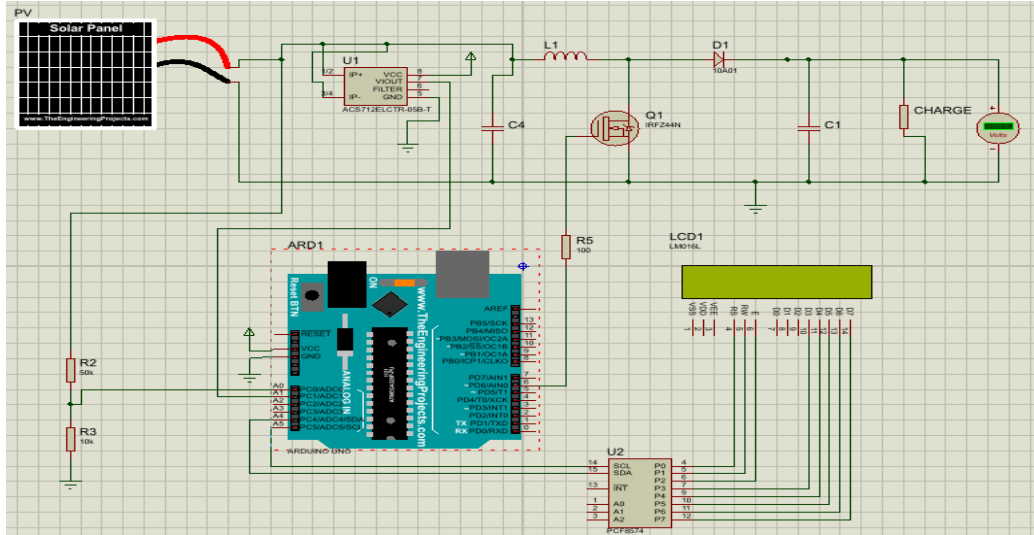


Figure III.8: system complete PV+BOOST+MPPT (P&O) +ARDUINO+CAPTEUR.

5 Partie pratique

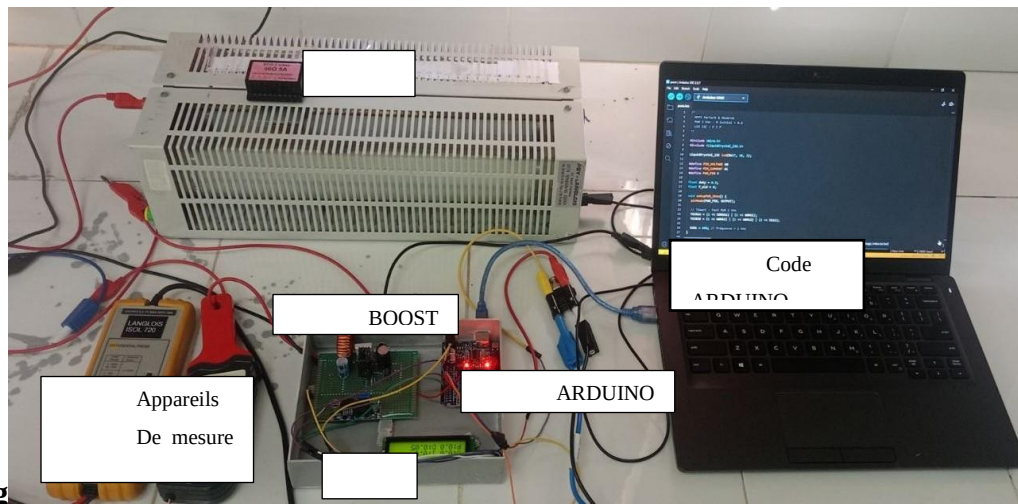


Figure III.9: Schéma complet du prototype réalisé.

5.1 Mesure des courants et tension

connecté le panneau solaire au convertisseur élévateur à l'aide de l'algorithme P&O et d'une carte ARDUINO équipée d'un code spécifique pour piloter le MOSFET. Pour visualiser les courbes nous avons utilisé un oscilloscope.

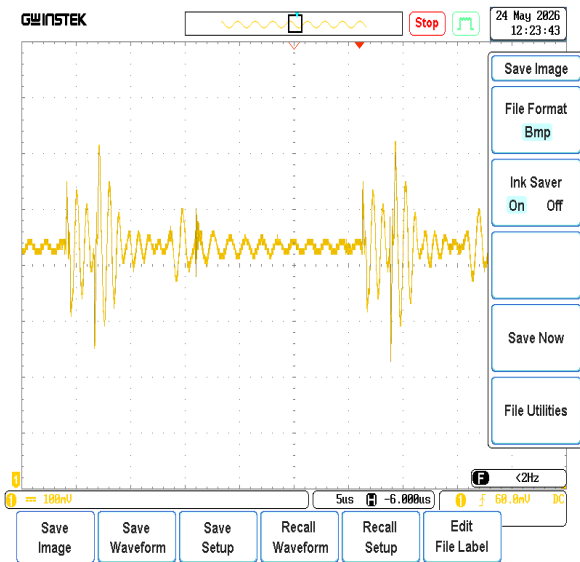


Figure III.10: Tension d'entrée.

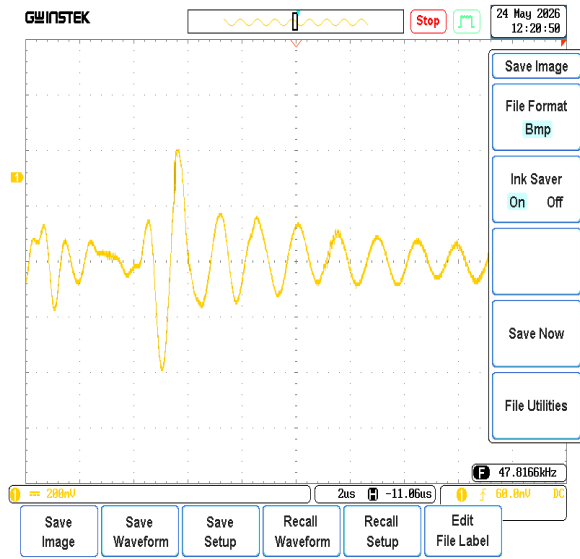


Figure III.11: Courant d'entrée.

La figure III.12 représente le courant d' sortie (I_{out}) obtenu à partir de la sortie du BOOST vers la charge.

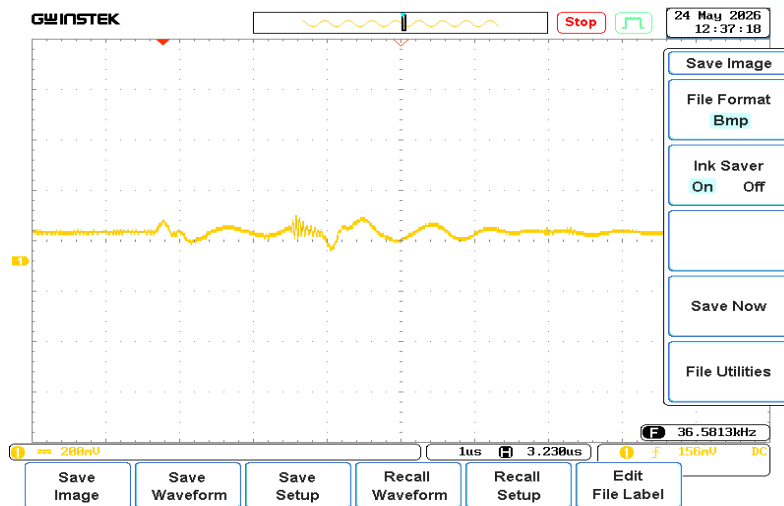


Figure III.12: Courant d' sortie.

5.2 Résultat de mesure de la puissance

Ce résultat a obtenu le 28 /06 /2026 à différents paramètres de panneau solaire (température et l'éclairement) et différents valeurs de puissance.

Temps	Tempurature	Irradiation	Puissance	wattmètre	Rendement
11 h	29	840	55 W	58 w	94%
12 h	30	890	60 W	64 w	93%
14 h	32	910	63 W	66 w	95%

Tableaux III.1: Mesure de la puissance.

Conclusion

Ce chapitre a porté sur la conception d'un dispositif d'optimisation énergétique pour installations solaires. La stratégie de commande adoptée consiste à perturber le point de fonctionnement du générateur et observer sa réponse, avant d'ajuster la tension en conséquence. Cette logique a été intégrée dans un microcontrôleur de type UNO, puis testée virtuellement à l'aide d'un environnement de simulation électronique. Une maquette physique a ensuite été assemblée, incluant un étage d'élévation de tension, afin de vérifier empiriquement le comportement de l'ensemble. Les essais confirment que la solution développée permet d'accroître significativement le rendement du captage photovoltaïque.

Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail était l'étude, la modélisation et la réalisation d'un régulateur MPPT destiné à améliorer l'exploitation de l'énergie produite par un générateur photovoltaïque. Face à la variation permanente des conditions climatiques, notamment l'irradiation solaire et la température, l'utilisation d'une technique de suivi du point de puissance maximale apparaît comme une solution essentielle pour augmenter le rendement énergétique des systèmes photovoltaïques.

Dans un premier temps, une étude théorique a été menée sur les systèmes photovoltaïques. Cette étude a permis de présenter le principe de fonctionnement des cellules solaires, les différentes technologies utilisées ainsi que les méthodes d'association des modules photovoltaïques. Une attention particulière a également été portée à l'influence des paramètres environnementaux sur les caractéristiques électriques du panneau, mettant en évidence les variations du courant, de la tension et de la puissance délivrée.

Dans un second temps, une modélisation de la chaîne de conversion photovoltaïque a été réalisée sous MATLAB/Simulink. Le modèle du générateur photovoltaïque a été associé à un convertisseur DC-DC de type BOOST ainsi qu'à une commande MPPT basée sur l'algorithme Perturbation and Observation (P&O). Les simulations effectuées ont permis d'analyser le comportement du système dans différentes conditions de fonctionnement. Les résultats obtenus ont montré que l'algorithme adopté assure un suivi satisfaisant du point de puissance maximale et permet une adaptation rapide aux variations de l'éclairement et de la température.

La dernière partie de ce travail a été consacrée à la réalisation pratique du régulateur. À travers l'utilisation d'une carte Arduino UNO, d'un convertisseur BOOST, de capteurs de tension et de courant ainsi que d'un afficheur LCD, il a été possible de mettre en œuvre expérimentalement le système étudié. La simulation réalisée sous Proteus a permis de vérifier le bon fonctionnement de l'ensemble avant sa mise en œuvre pratique. Les mesures expérimentales effectuées ont confirmé la validité de l'approche proposée et ont montré que le système est capable d'extraire efficacement la puissance disponible du panneau photovoltaïque.

Les résultats obtenus démontrent que la combinaison du convertisseur BOOST avec l'algorithme MPPT de type P&O constitue une solution simple, fiable et économique pour améliorer les performances d'un système photovoltaïque. Malgré la simplicité de sa structure et

Conclusion générale

de son implantation, cette méthode offre des performances satisfaisantes pour le suivi du point de puissance maximale et contribue à une meilleure valorisation de l'énergie solaire disponible.

- [1] T. Eswam and P. L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 2, pp. 439–449, June 2007.
- [2] D. P. Hohm and M. E. Ropp, "Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 11, no. 1, pp. 47–62, Jan. 2003.
- [3] M. A. Green, *Solar Cells: Operating Principles, Technology, and System Applications*. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall, 1982
- [4] J. J. Loferski, "Theoretical considerations governing the choice of the optimum semiconductor for photovoltaic solar energy conversion", *Journal of applied Physics*, vol ; 27, pp. 777-784, 1956.
- [5] <https://acsolue-energie.fr/2021/08/01/au-coeur-de-la-cellule-solaire-pour-comprendre-leffet-photovoltaique-dopage-du-silicium-cristallin-production-delectricite/>.
- [6] A. Goetzberger et V. U. Hoffmann, *photovoltaic solar Energy Generation*, Springer, Berlin, 2005.
- [7] S. R. Wenham et al., *Applied photovoltaics*, Earthscan publications, Londers, 2007.
- [8] <https://www.ecosources.org/types-de-cellules-photovoltaiques>
- [9] M. A. Green, *Solar Cells : Operating principales, technology, and system applications*, Prentice-Hall, New Jersey, 1982.
- [10] <https://www.dec-industrie.com/Generateur-solaire>.
- [11] <https://www.mcours.net/fra18/fra18meeyrp574.pdf>.
- [12] E. Lorenzo, *Solar Electricity : Engineering of Photovoltaic Systems*, progensa, seville, 1994.
- [13] N. H. Reich et al., "The risk pf hot spots in crystallinesilicon solar modules", 25th European Photovoltaic solar Energy Conference, Valence, 2010.
- [14] D. sera, R. Teodorescu et P. Rodriguez, "PV panel model based on datasheet values", *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2007.
- [15] <https://www.researchgate.net/figure/Schema-equivalent-dune-cellule-photovoltaique>.
- [16] SaadMOTAHHIR, Abdelilah Chalh, "Modeling of photovoltaic panel by using Proteus", *Journal of Engineering Science and Technology Review*, Vol. 10 ; No. 2, pp. 8-13, 2017.
- [17] Piegari, L., Rizzo, R., Spina, I., & Tricoli, P. (2015). Optimized adaptive perturb and observe maximum power point tracking control for photovoltaic generation. *Energies*, 8(5), 3418–3436.

- [18] C. Alonso, Énergie solaire photovoltaïque : principes et applications, Éditions Dunod, Paris, 2017.
- [19] Lemdak Kaima, Kiouas Nabila, « Simulation et Etude expérimentale d'un système PV au milieu aride », mémoire de Master, Université de Ghardaïa, 2019.
- [20] Villalva, M. G., Gazoli, J. R., & Filho, E. R. (2009). Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(5), 1198–1208.
- [21] M.H.RASHID, “Power electronics handbook”, Academic Press Series in Engineering, 2001.
- [22] N.AOUCHICHE, « Conception d'une commande MPPT optimale à base d'intelligence artificielle d'un système photovoltaïque », thèse de Doctorat, Université Bourgogne Franche-Comté, 2020.
- [23] E.OMORUYI, « Modélisation du comportement transitoire des génératrices distribuées raccordées au réseau électrique de distribution à l'aide de convertisseurs », Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées, Ecole polytechnique de Montréal, 2017.
- [24] Erickson, R. W., & Maksimović, D. (2020). *Fundamentals of Power Electronics* (3rd ed.). Springer.
- [25] Femia, N., Petrone, G., Spagnuolo, G., & Vitelli, M. (2005). Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 20(4), 963–973.
- [26] Hohm, D. P., & Ropp, M. E. (2003). Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 11(1), 47–62.
- [27] Elgendy, M. A., Zahawi, B., & Atkinson, D. J. (2012). *Assessment of perturb and observe MPPT algorithm implementation techniques for PV systems*. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, 3(1), 21-33.
- [28] Molder, C. (2017). *Proiectarea circuitelor electronice vol.1: Proteus 8 – ISIS Schematic Capture*. University Press
- [29] Arduino.(2024).*Arduino IDE Documentation*. Arduino Official Website:
<https://www.arduino.cc/en/software>