

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية
الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث
العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريريج

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département Electromécanique

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Electromécanique

Spécialité : énergie renouvelable

Par : Bahmed mohamed said

Benmessaoud mohamed amine

Sujet

Étude sur les traceurs de caractéristiques (P/V et I/V) d'un générateur
PV.....

Soutenu publiquement, le / / , devant le jury composé de :

M/Meddad Mounir

M/Khenfer Riad

M/Benhadouga seddik

Grade

Grade

Grade

Univ-BBA

Univ-BBA

Univ-BBA

Président

Examineur

Encadrant

2023/2024



Remercier :

Nous exprimons notre gratitude envers ALLAH pour nous avoir donné la force et la patience nécessaires pour mener à bien ce travail. Tout d'abord, nous souhaitons remercier chaleureusement M. Benhaddouga Seddik pour sa disponibilité totale, son soutien et ses conseils précieux. Nous tenons également à exprimer notre reconnaissance envers les membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail. Nous adressons nos sincères remerciements à nos familles, en particulier à nos parents, pour leur aide et leur soutien inestimables. Enfin, nous souhaitons remercier tous nos collègues et toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail. Nous leur sommes reconnaissants à tous.

Dédicace

J'ai le grand honneur de dédier ce modeste travail :
A Mes parents pour leurs amours, leur bonté, leur Sacrifice,
leurs
Encouragements perpétuels, leur soutien. Puisse Dieu
prolonger leur vie dans
Le bonheur. A mes chères frères et sœurs A tout ma famille A
tous mes
Proches A tous ceux qui m'ont aidé de loin ou de près durant
les moments
Difficiles Pendant les études et pendant ce travail

Benmessaoud mohamed amine

Dédicace

À nos très chères mères, la lumière des nuits et notre chemin
vers le paradis.

A nos très chers pères, symbole de sagesse, et la cause de
notre existence dans cette vie,

Que ce modeste travail, soit l'expression des vœux que vous
n'avez cessé de formuler dans vos prières, que dieu vous
préserve santé et longue vie.

Nous tenons aussi à dédier ce Modeste travail à

Nos chers frères et sœurs

Toutes nos familles, petites et grandes,

Tous nos amis,

En fin à vous qui prenez la peine de lire ce mémoire.

Bahmed mohamed said

Résumé

Résumé :

Nous avons examiné les énergies solaires en général, puis avons étudié six façons de suivre les propriétés I-V et P-V. Trois traceurs différents ont été choisis :

Un traceur basé sur une résistance variable, un traceur basé sur un condensateur et un traceur basé sur un convertisseur DC-DC.

En conclusion, notre thèse propose de se concentrer sur les réalisations des méthodes restantes afin de mieux améliorer les caractéristiques IV et PV du générateur PV.

Summary:

We have examined solar energies in general and then studied six ways to track the I-V and P-V properties.

Three different trackers were chosen: one based on a variable resistor, one based on a capacitor, and one based on a DC-DC converter.

In conclusion, our thesis proposes to focus on implementing the remaining methods in order to further enhance the IV and PV characteristics of the PV generator

ملخص :

درسنا حول الطاقات الشمسية بشكل عام ، ثم قمنا بدراسة ستة طرق لتتبع الخصائص IV و P-V . تم اختيار ثلاثة أجهزة تتبع مختلفة: جهاز تتبع يعتمد على مقاومة متغيرة، جهاز تتبع يعتمد على مكثف وجهاز تتبع يعتمد على محول (DC-DC). في الختام، نقترح أطروحتنا التركيز على إنجازات الطرق المتبقية من أجل تحسين خصائص IV و PV للمولد الكهروضوئي بشكل أفضل.

Liste des abréviations

Liste des abréviations

GPV : générateur photovoltaïque

PV : photovoltaïque

VCELL : la tension aux bornes de la cellule

Vcc : tension de circuit ouvert

ICELL : le courant fourni par la cellule

Icc : le courant produit par la cellule lorsqu'elle est mise en court-circuit

R shunt : la résistance modélisant les courants de fuites de la jonction, et finalement

R série : la résistance série caractérisant les diverses résistances de contacts et de connexions

MPPT: maximum power point tracking

PWM: Pulse width modulation

PPM : point de puissance maximum

I_{sa} : le courant de saturation de la Jonction.

K : la constante de Boltzmann (1.381 10⁻²³ Joules/Kelvin).

T : la température de la cellule en kelvin, e : est la charge d'un électron.

N : le facteur de non idéalité de la jonction,

V_D : la tension de diode

R_s : la résistance série

I_{ph} : photo de courant généré

I_D : le courant de diode

D : le rapport cyclique

N : Le dopage de type N consiste à avoir un excès d'électrons dans le matériau

P : Le dopage de type P consiste à avoir un excès de trous dans le matériau.

DC : direct current

AC : alternative current

MOSFET : transistors à effet de champ d'oxyde de métal

IGBTs : transistors bipolaires à gâchette isolée

E_c : l'énergie alternative consommée

B_j : les besoins énergétiques journaliers

Liste des tableaux

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES CELLULES SOLAIRES A BASE DE SILICIUM[7] [8]	7
TABLEAU 2 CARACTERISTIQUES DES DIFFERENTES METHODES.	40
.TABLEAU 3 DE CARACTERISTIQUE DE PANNEAU SOLAIRE	43
TABLEAU 4 RECAPITULATIF DES RESULTATS OBTENUS.	55

Liste des figures

Liste des figures

FIGURE 1 SCHEMA SIMPLIFIE DE PRINCIPE DE JONCTION PN. [2]	2
FIGURE 2 CARACTERISTIQUES RESULTANTES D'UN GROUPEMENT DE NS CELLULES EN SERIE. [4]	3
FIGURE 3 CARACTERISTIQUES RESULTANT D'UN GROUPEMENT DE NP CELLULES EN PARALLELE.[4].....	4
FIGURE 4 MODULE DE 36 CELLULES PROTEGE PAR DEUX DIODES DE BY-PASS.[5].....	5
FIGURE 5 SCHEMA D'UN CHAMP PHOTOVOLTAÏQUE AVEC DIODES BY-PASS ET DIODE ANTI- RETOUR.[5]	5
FIGURE 6 LA CELLULE MONOCRISTALLINE.[6].....	6
FIGURE 7 LA CELLULE POLY CRISTALLINE. [6].....	6
FIGURE 8 LA CELLULE AMORPHE A COUCHE MINCE.....	7
FIGURE 9 SCHEMA ELECTRIQUE D'UN MODULE PV COMPORTANT UNE DIODE.[9]	8
FIGURE 10 COMPOSITION D'UN PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE. [10].....	10
FIGURE 11 LA REPRESENTATION SYMBOLIQUE D'UN CONVERTISSEUR DC/DC. [11].....	11
FIGURE 12 LA REPRESENTATION SYMBOLIQUE D'UN CONVERTISSEUR DC/AC. [11].....	11
FIGURE 13 INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE AUTONOME. [14].....	13
FIGURE 14 INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE COUPLEE AU RESEAU. [14]	14
FIGURE 15 SCHEMA DE SYSTEME HYBRIDE.[15].....	15
FIGURE 16 CHAINE DE CONVERSION D'ENERGIE SOLAIRE COMPRENANT UNE COMMANDE MPPT. [16].....	15
FIGURE 17 VARIATIONS DU POINT DE PUISSANCE MAXIMALE EN FONCTION DE L'ENSOLEILLEMENT.....	16
FIGURE 18 VARIATIONS DU POINT DE PUISSANCE MAXIMALE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE.	16
FIGURE 19 FLUCTUATIONS DE LA COURBE I-V POUR T CONSTANTE ($T=25^{\circ}\text{C}$), ET G VARIABLE.	17
FIGURE 20 FLUCTUATIONS DE LA COURBE P-V POUR T CONSTANTE ($T=25^{\circ}\text{C}$), ET G VARIABLE.	17
FIGURE 21 FLUCTUATIONS DE LA COURBE I-V POUR G CONSTANTE ($G=1000\text{W/M}^2$), ET T VARIABLE.	18
FIGURE 22 FLUCTUATIONS DE LA COURBE P-V POUR G CONSTANTE ($G=1000\text{W/M}^2$), ET T VARIABLE.....	18
FIGURE 23 CARACTERISTIQUES I-V.	21
FIGURE 24 CARACTERISTIQUE P-V.	22
FIGURE 25 TRACEURS A BASE DE CHARGE ELECTRONIQUE.[20].....	24

Liste des figures

FIGURE 26 TRACEURS A BASE D'AMPLIFICATEUR DE PUISSANCE BIPOLAIRE. [20].....	25
FIGURE 27 SCHEMA DU TRACEUR QUATRE QUADRANTS.[20]	26
FIGURE 28 SCHEMA D'UN TRACEUR AVEC UNE CHARGE RESISTIVE. [20]	27
FIGURE 29 TRACEURS A BASE DE RESISTANCE VARIABLE SUR MATLAB.....	27
FIGURE 30 CARACTERISTIQUE I-V RESISTANCE VARIABLE SUR MATLAB.	28
FIGURE 31 CARACTERISTIQUE P-V RESISTANCE VARIABLE SUR MATLAB.....	28
FIGURE 32 MODULE PV CHARGE PAR UN CONDENSATEUR. [20].....	30
FIGURE 33 TRACEUR A BASE D'UNE CHARGE CAPACITIVE.[25].....	30
FIGURE 34 TRACEURS A BASE DE CHARGE CAPACITIVE SUR MATLAB.....	32
FIGURE 35 CARACTERISTIQUE I-V CHARGE CAPACITIVE SUR MATLAB.....	32
FIGURE 36 CARACTERISTIQUE P-V CHARGE CAPACITIVE SUR MATLAB.....	33
FIGURE 37 TRACEURS A BASE D'HACHEURS. [20]	34
FIGURE 38 CIRCUIT D'UN CONVERTISSEUR ABAISSEUR (BUCK). [29].....	35
FIGURE 39 CIRCUIT D'UN CONVERTISSEUR ABAISSEUR (BUCK)	35
. FIGURE 40 CARACTERISTIQUE I-V CONVERTISSEUR ABAISSEUR (BUCK) SUR MATLAB.	36
. FIGURE 41 CARACTERISTIQUE P-V CONVERTISSEUR ABAISSEUR (BUCK) SUR MATLAB.....	36
FIGURE 42 CIRCUIT D'UN CONVERTISSEUR ELEVATEUR (BOOST).....	37
FIGURE 43 CONVERTISSEUR ELEVATEUR (BOOST) SUR MATLAB.	37
FIGURE 44 CARACTERISTIQUE I-V CONVERTISSEUR ELEVATEUR (BOOST) SUR MATLAB.	38
FIGURE 45 CARACTERISTIQUE P-V CONVERTISSEUR ELEVATEUR (BOOST) SUR MATLAB.	38
FIGURE 46 CIRCUIT D'UN CONVERTISSEUR ABAISSEUR-ELEVATEUR (BUCK-BOOST). [29].....	39
FIGURE 47 PANNEAU SOLAIRE UTILISE DANS LES EXPERIENCES.	42
FIGURE 48 PROGRAMME ARDUINO UTILISE DANS CE MODELE.....	44
FIGURE 49 SCHEMA DE PRINCIPE DU TRACEUR A BAS RESISTANCE VARIABLE.....	45
FIGURE 50 TRACEUR A BASE D'UNE RESISTANCE VARIABLE.	45
FIGURE 51 MESURE DE CARACTERISTIQUE I-V PAR RESISTANCE VARIABLE.....	46
FIGURE 52 MESURE DE CARACTERISTIQUE P-V PAR RESISTANCE VARIABLE.	46
FIGURE 53 LA COMPARAISON ENTRE PRATIQUE ET SIMULATION	47
FIGURE 54 TRACEUR A BASE D'UN CONDENSATEUR.....	48
FIGURE 55 MESURE DE CARACTERISTIQUE I-V PAR CONDENSATEUR.	48
FIGURE 56 SCHEMA DE PRINCIPE DU TRACEUR A BAS CONDENSATEUR.....	49
FIGURE 57 MESURE DE CARACTERISTIQUE P-V PAR CONDENSATEUR.	50
FIGURE 58 LA COMPARAISON ENTRE PRATIQUE ET SIMULATION.	50
FIGURE 59 MONTAGE D'HACHEUR (BOOST).	51

Liste des figures

FIGURE 60 PROGRAMME SOUS ARDUINO CONCERNE LE TRACEUR HACHEUR (BOOST).....	52
FIGURE 61 SCHEMA DE PRINCIPE DU TRACEUR A BAS HACHEUR (BOOST)	52
FIGURE 62 MONTAGE D'AMPLIFICATEUR DE TENSION.	53
FIGURE 63 MONTAGE DE TRACEUR A BASE D'HACHEUR (BOOST).	54
FIGURE 64 CARACTERISTIQUES I-V ET P-V MESURES PAR MULTIMETRE.....	56
FIGURE 65 MESURE DE CARACTERISTIQUE I-V PAR HACHEUR (BOOST).	56
FIGURE 66 MESURE DE CARACTERISTIQUE P-V PAR HACHEUR (BOOST).	57
FIGURE 67 LA COMPARAISON ENTRE PRATIQUE ET SIMULATION	57

Table des matières

Table des matières

INTRODUCTION GÉNÉRALE	0
Chapitre 1 : généralités sur photovoltaïque	1
1.1 INTRODUCTION :.....	1
1.2 L'ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE :.....	1
1.3 L'EFFET PHOTOVOLTAÏQUE :	1
1.4 CELLULE PV :	2
1.4.a Association de cellules :	2
1.4.a.1 Mise en série :.....	2
1.4.a.2 Mise en parallèle :	3
1.4.b Système de protection :.....	4
1.4.b.1 Diode bypass :	4
1.4.b.2 Diode anti-retour :	5
1.4.c Les différentes technologies des cellules photovoltaïques :	6
1.4.c.1 La cellule monocristalline :	6
1.4.c.2 La cellule poly cristalline :	6
1.4.c.3 La cellule amorphe à couche mince :	7
1.4.d Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque :	8
1.5 MODULE PV :	10
1.5.a LES CONVERTISSEURS :	10
1.5.b Convertisseur DC/DC :.....	10
1.5.c Convertisseur DC/AC :.....	11
1.5.c.1 Les onduleurs sont utilisés afin de :	12
1.5.c.2 Dimensionnement de l'onduleur :.....	12
1.5.c.3 Les paramètres de dimensionnement :	12
1.6 CABLAGE ET BOITE DE JONCTION :.....	12
1.7 LES DIFFERENTS TYPES DE SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES :.....	13
1.7.a Système PV autonome :.....	13
1.7.b Système PV connecte directement au réseau :	13
1.7.c Systèmes hybrides :	14

Table des matières

1.8	PRINCIPE DU MPPT :	15
1.8.a	Variations du point de puissance maximale en fonction de l'ensoleillement :	16
1.8.b	Variations du point de puissance maximale en fonction de la température :	16
1.9	IMPACT ENVIRONNEMENTAL SUR LES PERFORMANCES D'UN GPV :	17
1.9.a	Influence du faible éclaircissement :	17
1.9.b	Influence de la température sur un module PV :	18
1.10	AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE :	19
1.10.a	Avantages :	19
1.10.b	Inconvénients :	19
1.11	CONCLUSION :	19
Chapitre 2	:	20
Les Traceurs		20
Photovoltaïques		20
2.1	INTRODUCTION :	21
2.2	LES CARACTÉRISTIQUES I-V/P-V D'UN GÉNÉRATEUR PHOTOVOLTAÏQUES	21
2.2.a	Caractéristiques I-V :	21
2.2.b	Caractéristique P-V :	22
2.3	LES DIFFÉRENTES MÉTHODES POUR TRACER LES CARACTÉRISTIQUES I-V/P-V D'UN GÉNÉRATEUR PHOTOVOLTAÏQUE :	22
2.3.a	Traceurs à base de charge électronique :	22
2.3.a.1	Les avantages :	24
2.3.a.2	Les inconvénients :	24
2.3.b	Traceurs à base d'Amplificateur de Puissance Bipolaire :	24
2.3.b.1	Les avantages :	25
2.3.b.2	Les inconvénients :	25
2.3.c	Traceurs à base d'amplificateur de puissance à quatre quadrants	25
2.3.d	Traceurs à base de résistance variable :	26
2.3.d.1	Simulation sur Matlab Traceurs à base de résistance variable :	27

Table des matières

2.3.d.1.1	La caractéristique tension-courant :	27
2.3.d.1.2	La caractéristique tension-puissance :	28
2.3.e	Traceurs à base de charge capacitive :	29
2.3.e.1	Fonctionnement de la charge capacitive :	29
2.3.e.2	Dimensionnement de la capacité de condensateur	30
2.3.e.3	Simulation sur Matlab Traceurs à base de charge capacitive :	32
2.3.e.3.1	La caractéristique tension-courant :	32
2.3.e.3.2	La caractéristique tension-puissance :	33
2.3.f	Traceurs à base d'Hacheurs :	33
2.3.f.1	. Types des convertisseurs DC-DC :	34
2.3.f.1.1	Convertisseur abaisseur (Buck convertir) :	34
II.3.6.1.2.	Convertisseur élévateur (Boost converter) :	36
2.3.f.1.2	Convertisseur abaisseur-élévateur (Buck-Boost converter) :	39
2.4	COMPARAISON ENTRE LES DIFFÉRENTES MÉTHODES :	39
2.5	CONCLUSION :	40
Chapitre 3	:	41
réalisation du traceur photovoltaïque		41
3.1	INTROUDITION :	42
3.2	DESCRIPTION DU BANC D'ESSAI EXPERIMENTAL :	42
3.3	MATERIEL UTILISE DANS TOUTES LES MANIPULATIONS :	43
3.4	LE PROGRAMME UTILISE :	43
3.5	TRACEUR PAR RESISTANCE VARIABLE :	44
3.5.a	Explication de l'expérience :	45
3.5.b	Résultats obtenus le 15/05/2024 :	46
3.5.c	Discussion des résultats :	47
3.5.d	Comparaison entre pratique et simulation :	47
3.6	TRACEUR A BASE D'UN CONDENSATEUR :	48
3.6.a	Explication de l'expérience :	49
3.6.b	Résultats obtenus le 17/05/2024 :	49
3.6.c	Discussion des résultats :	50
3.6.d	Comparaison entre les résultats pratiques et de simulations :	50
3.7	TRACEUR A BASE D'UN HACHEUR (BOOST) :	51

Table des matières

3.7.a	Schéma de principe du traceur á bas hacheur (boost) :.....	52
3.7.b	Premier Test du traceur à base d'un hacheur boost :	53
3.7.c	Premier Test du traceur à base d'un hacheur boost:	54
3.7.d	Dimensionnement des composants :	54
3.7.d.1	Calcul de l'inductance :	54
3.7.d.2	Calcul de la capacité :	55
3.7.d.3	Choix du MOSFET :	55
3.7.e	Test pratique de fonctionnement d'un d'hacheur boost changeant la valeur PWM :	55
3.7.e.1	Résultats de traçage manuel des caractéristiques P-V et V-I :	55
3.7.e.2	Résultats Automatisement Acquis par un Programme Arduino le 29/05/2024 :	56
3.7.f	Discussion des résultats :	57
3.7.g	Comparaison entre les résultats pratiques et simulations :	57
3.8	COMPARAISON ENTRE LES TROIS TRACEURS :	58
3.8.a	Résistance variable :	58
3.8.b	Condensateur :	58
3.8.c	Hacheur (boost) :	58
3.9	CONCLUSION :	59
	CONCLUSION GENERALE	60
□	References	64

INTRODUCTION

GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Un générateur photovoltaïque (GPV) est un système qui convertit l'énergie solaire en électricité. Il est composé de plusieurs panneaux photovoltaïques interconnectés. Chaque panneau photovoltaïque est constitué de plusieurs cellules solaires, qui sont des dispositifs électroniques capables de convertir la lumière du soleil en électricité.

Les panneaux photovoltaïques sont généralement connectés en série ou en parallèle pour obtenir la puissance souhaitée. Lorsqu'ils sont connectés en série, la tension de sortie de chaque panneau s'additionne, tandis que le courant reste constant. Lorsqu'ils sont connectés en parallèle, le courant de sortie de chaque panneau s'additionne, tandis que la tension reste constante.

En plus des panneaux photovoltaïques, un GPV comprend également d'autres composants essentiels tels que des câbles, des boîtiers de jonction, des diodes de contour, des régulateurs de charge et des onduleurs. Ces éléments permettent de connecter les panneaux entre eux, de réguler la charge de la batterie ou du réseau électrique, et de convertir le courant continu produit par les panneaux en courant alternatif utilisable.

L'ensemble du système du GPV est conçu pour être durable, efficace et capable de produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire pendant de nombreuses années.

La simulation et la pratique des traceurs de caractéristiques PV offrent un avantage significatif dans le développement et l'optimisation des systèmes photovoltaïques. En effet, en simulant les performances des différents éléments du GPV dans des conditions diverses, les ingénieurs peuvent anticiper les comportements et les rendements du système dans différentes situations. Cela permet d'identifier les configurations les plus efficaces, d'optimiser la conception du système, et de prendre des décisions éclairées pour maximiser la production d'électricité solaire.

Dans ce mémoire, le travail effectué est présenté dans les trois chapitres suivants :

Chapitre 1 : Introduction au domaine photovoltaïque

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Dans ce premier chapitre, nous commencerons par présenter une vue d'ensemble du domaine photovoltaïque. Nous nous intéresserons tout d'abord à l'unité de base du générateur photovoltaïque, la cellule photovoltaïque. Nous étudierons ensuite l'influence de différents facteurs tels que la température, l'éclairement, la résistance série et la résistance parallèle sur les performances de cette cellule.

Chapitre 2 : Caractérisation théorique du système photovoltaïque

Le deuxième chapitre sera consacré à l'étude théorique des caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) d'un système photovoltaïque. La première partie abordera la mesure et la définition de ces caractéristiques. Dans la seconde partie, nous présenterons en détail six types de dispositifs utilisés pour tracer ces courbes, en effectuant des simulations à l'aide du logiciel Matlab. Enfin, nous comparerons les performances de ces différents types de traceurs.

Chapitre 3 : Étude pratique et comparative des traceurs photovoltaïques

Dans ce troisième chapitre, nous nous concentrons sur une étude pratique et comparative des performances des traceurs photovoltaïques. Cette étude est réalisée en deux volets distincts : d'une part, une comparaison entre les résultats des traceurs obtenus en simulation et les résultats pratiques des traceurs mis en œuvre sur le terrain, et d'autre part, une étude comparative entre différents types de traceurs réalisée au niveau de notre laboratoire.

-Comparaison entre les résultats en simulation et en pratique : Dans cette première partie, nous analyserons les performances des traceurs photovoltaïques en comparant les résultats obtenus en simulation avec ceux mesurés sur le terrain. Les traceurs étudiés incluent ceux basés sur une résistance variable, sur un condensateur, et sur un hacheur boost. Nous examinerons en détail les écarts éventuels entre les prédictions théoriques et les résultats pratiques, afin de mieux comprendre les limitations et les avantages de chaque méthode de suivi.

-Étude comparative des traceurs au niveau du laboratoire : Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous mènerons une étude comparative entre les différents types de traceurs réalisée au sein de notre laboratoire. Nous mettrons en œuvre ces traceurs dans des conditions contrôlées afin de comparer leurs performances en termes d'efficacité de suivi, de stabilité et

INTRODUCTION GÉNÉRALE

de réactivité aux variations de conditions environnementales. Cette étude nous permettra d'identifier les points forts et les faiblesses de chaque traceur, et de déterminer les meilleures pratiques pour leur mise en œuvre dans des applications réelles.

Chapitre 1 :

généralités sur

photovoltaïque

CHAPITER I : généralités sur photovoltaïque

1.1 INTRODUCTION :

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du Rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque.

Dans ce chapitre, nous concentrerons sur l'étude de la cellule solaire et de son principe de fonctionnement. Nous parlerons également des types de cellules solaires avec leurs différentes caractéristiques et des matériaux de base utilisés. Nous concentrerons également sur le schéma électrique de la cellule photovoltaïque et l'effet des conditions météorologiques sur la production d'énergie. Nous verrons également l'effet des connexions des panneaux solaires en parallèle ou en série sur la tension (U) et le courant (I).

1.2 L'ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE :

Définition : L'énergie solaire photovoltaïque est une forme d'énergie renouvelable. Elle permet de produire de l'électricité par transformation d'une partie du rayonnement solaire grâce à une cellule photovoltaïque. [1]

1.3 L'EFFET PHOTOVOLTAÏQUE :

Les cellules photovoltaïques fonctionnent grâce à l'effet photovoltaïque, un phénomène physique essentiel. Elles sont fabriquées à partir de semi-conducteurs, tels que le silicium, et présentent une structure similaire à celle d'une diode classique. Composées de deux couches distinctes, une dopée N et l'autre dopée P, elles forment une jonction PN qui crée une barrière de potentiel. Lorsque les photons de la lumière solaire frappent la surface du matériau, ils transfèrent leur énergie aux atomes, libérant ainsi des électrons et des trous. Cette séparation des charges crée une différence de potentiel entre les couches, générant un champ électrique qui conduit les porteurs de charge vers les contacts métalliques. Cela produit un courant électrique et une tension dans la cellule photovoltaïque. [2]

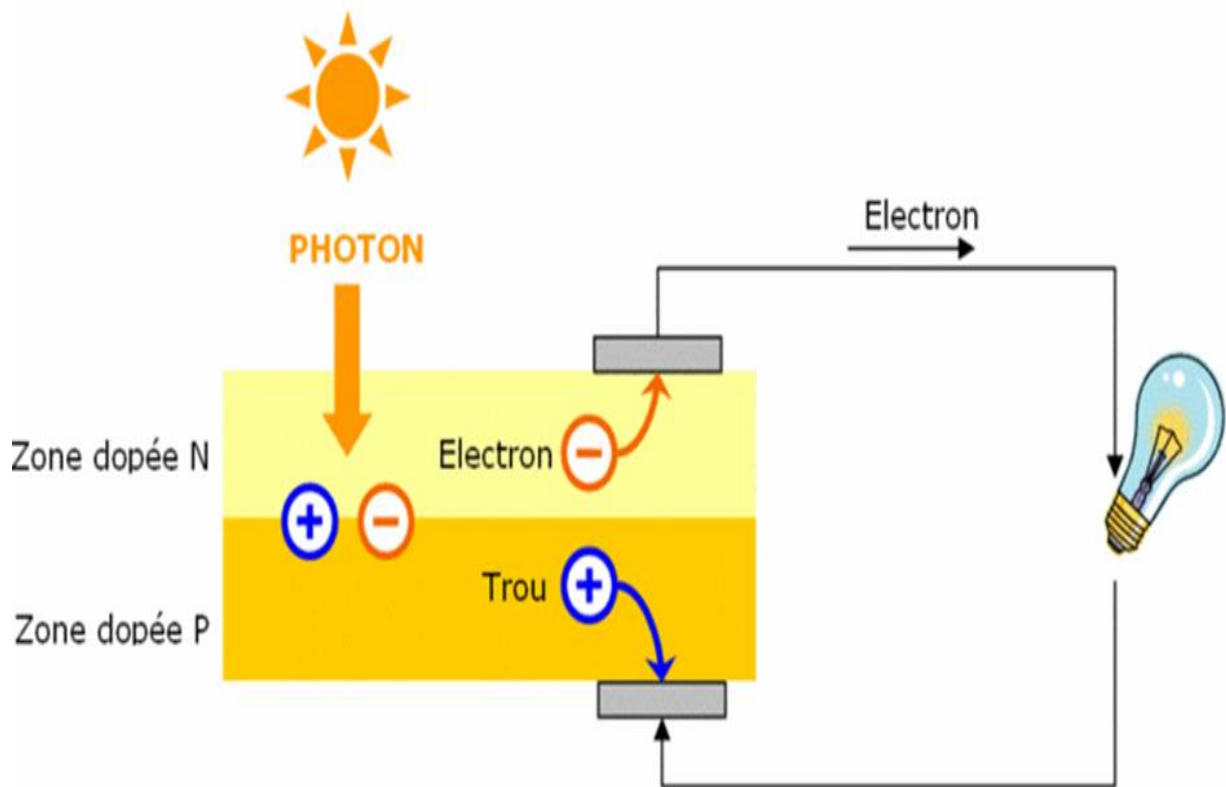


Figure 1 Schéma simplifié de principe de jonction PN. [2]

1.4 CELLULE PV :

Une cellule photovoltaïque, le composant élémentaire d'une installation photovoltaïque, est constitué de matériaux semi-conducteurs. Elle convertit directement l'énergie lumineuse en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque, permettant ainsi aux panneaux solaires de produire de l'électricité. [3]

1.4.a Association de cellules :

1.4.a.1 Mise en série :

L'association en série de N cellules dans un générateur photovoltaïque (GPV) a pour effet d'augmenter sa tension. Dans ce schéma, toutes les cellules sont parcourues par un courant identique, et la caractéristique globale résultante de cet agencement est obtenue en additionnant les tensions individuelles de chaque cellule.

Figure 2 L'équation (I-1) résume les caractéristiques électriques d'une association série de ns cellules

$$V_{oc} = N_s.V_{oc} \quad (I-1)$$

Avec :

V_{oc} : la tension du circuit ouvert

Cette configuration, couramment employée dans les modules photovoltaïques du commerce, permet de tirer parti de l'augmentation constante du courant produit par chaque cellule à mesure des avancées technologiques, tandis que leur tension reste généralement basse.

L'association en série offre ainsi la possibilité d'accroître la tension globale du système, ce qui se traduit par une augmentation de sa puissance totale. Par exemple, les panneaux commerciaux, souvent constitués de cellules de première génération, sont fréquemment agencés en associant 36 cellules en série (ce qui donne une tension de consigne $V_{cons}=0.6V*36=21.6V$), afin d'obtenir une tension optimale du panneau (V_{op}) proche de celle d'une batterie standard de 12V. [4]

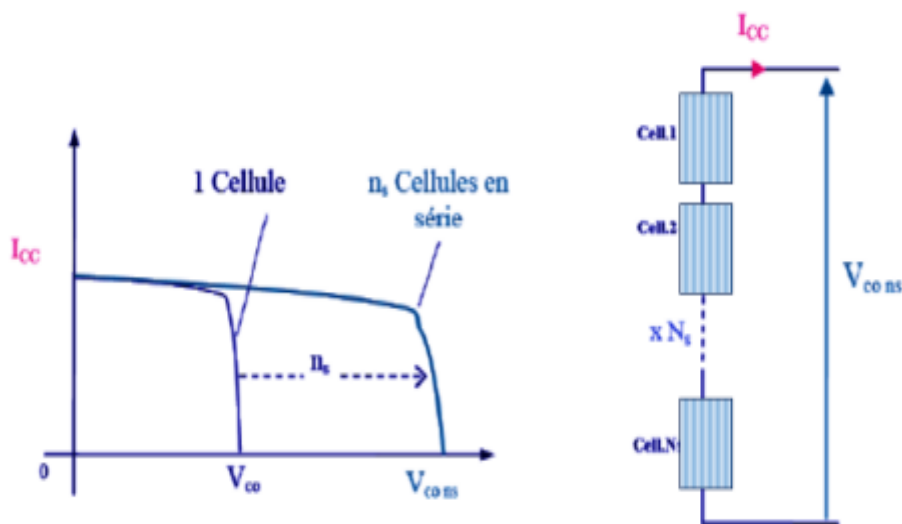


Figure 2 Caractéristiques résultantes d'un groupement de N_s cellules en série. [4]

1.4.a.2 Mise en parallèle :

D'autre part, une association parallèle de N_p cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques

CHAPITER I : généralités sur photovoltaïque

connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants, Figure 3 L'équation (I-2) résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de N_p cellules. [4]

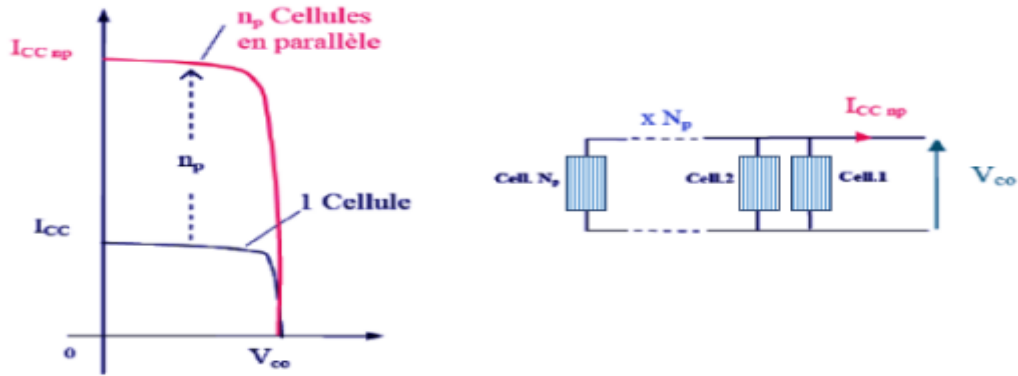


Figure 3 Caractéristiques résultant d'un groupement de N_p cellules en parallèle.[4]

$$I_{cc} = N_p \cdot I_{cc} \quad (I-2)$$

Acec :

I_{cc} : le courant de court-circuit

1.4.b Système de protection :

Comme pour les autres centrales électriques, il existe plusieurs sortes de protection pour une installation photovoltaïque protection des intervenants, protection contre la foudre, protection du générateur PV. Du fait que notre travail porte uniquement sur des défauts conduisant à une baisse de production, nous ne nous intéressons donc qu'aux composants servant à la protection du générateur PV. [5]

1.4.b.1 Diode bypass :

La diode de bypass est connectée en antiparallèle avec un groupe de cellules pour protéger les cellules les plus faibles contre la polarisation inverse.

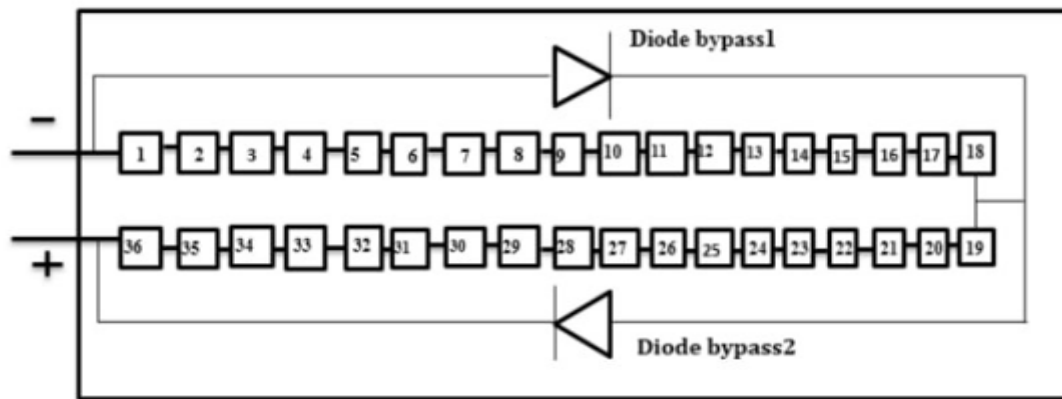


Figure 4 Module de 36 cellules protégé par deux diodes de by-pass.[5]

1.4.b.2 Diode anti-retour :

La tension produite par chaque string peut être différente. Lors de la mise en parallèle de ces strings pour former un champ, le string avec la tension la plus faible peut absorber un courant inverse provenant des autres strings. Cela conduit donc à une baisse de production et les modules du string traversés par le courant inverse pourraient être également susceptibles de la défaillance. Pour éviter ces courants inverses, une diode anti-retour est placée au bout de chaque string.

L'utilisation de la diode anti-retour introduit pourtant une perte dans la production du fait de la chute de tension causée par cette diode pendant le fonctionnement normal du champ PV.

De plus, ces diodes peuvent se mettre en défaut et demander par conséquent un contrôle régulier. [5]

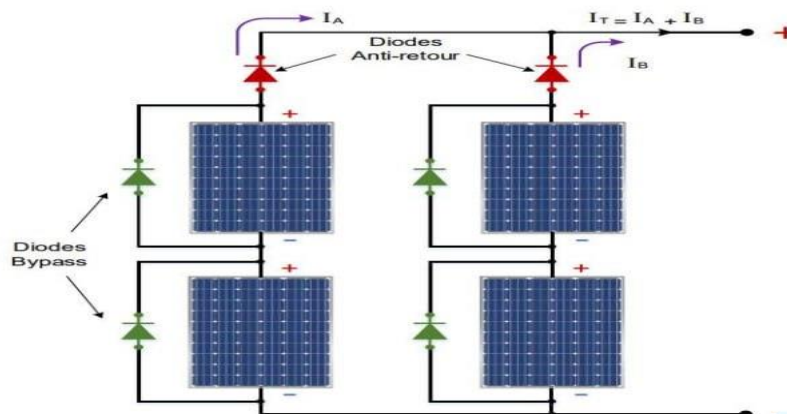


Figure 5 Schéma d'un champ photovoltaïque avec diodes by-pass et diode anti- retour.[5]

1.4.c Les différentes technologies des cellules photovoltaïques :

Il existe trois technologies principaux des cellules solaires à base de silicium :

Cellule en silicium monocristallin, multi cristallin et cellule en silicium amorphe avec une quatrième technologie qui consiste à la mise en contact des deux matériaux, appelé cellule hétérojonction, elle est reçue par dépôt de silicium amorphe hydrogéné ultrafines sur le substrat cristallin (mono et poly), chaque type de cellules a un rendement et un coût.

1.4.c.1 La cellule monocristalline :

Cette cellule est composée d'un seul cristal partagé en deux couches. C'est la cellule qui a le meilleur rendement (12- 16% ; jusqu'à 23% en laboratoire), la cellule qui s'approche le plus du modèle théorique mais aussi celle qui a le coup le plus élevé, du fait d'une fabrication compliquée, elle est identifiée par leur forme carrée avec 4 côtés coupés. [6]



Figure 6 La cellule monocristalline.[6]

1.4.c.2 La cellule poly cristalline :

La conception de la cellule multi cristallines étant la plus facile, elle est composée d'une accumulation de cristaux. Elles proviennent également du sciage de blocs de cristaux, mais ces blocs sont coulés, leur coût de fabrication est moins important, cependant leur rendement est plus faible : 11% - 14% (18% en laboratoire). Elle est identifiée par leur forme carrée. [6]



Figure 7 La cellule poly cristalline. [6]

1.4.c.3 La cellule amorphe à couche mince :

Cette catégorie a un faible rendement (8% - 10% ; 13% en laboratoire), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium déposé sur un support généralement flexible. Elle est utilisée couramment dans de petits produits de consommation tel que des calculatrices solaires ou encore des montres [6]



Figure 8 La cellule amorphe à couche mince.

Tableau 1 Avantages et inconvénients des cellules solaires à base de silicium[7] [8]

Matériau de Cellule	Avantages	Inconvénients	Principales utilisation
Cellule en Silicium amorphe	Très faibles épaisseurs. Fonctionne avec un faible Éclairement et sous Ombrage Partiel. Moins sensible aux températures élevées.	Rendement faible en plein Soleil. Dégradation sous lumière (Instabilité dite de Stable- Wronski)	Appareils électroniques Intégration dans le bâtiment
Cellule en Silicium monocristallin	Très bon rendement. Le plus retrouvé sur le marché mondial	Coût élevé. Sensible à la température élevée.	Aérospatiale, modules pour toits, façades
Cellule en Silicium	Bon rendement de Conversion, environ 100 w/m ² .		

CHAPITER I : généralités sur photovoltaïque

multi cristallin	Lingot moins cher à produire. Le moins sensible à la Température élevée. Adapté à la production à grande échelle	Rendement faible sous un faible éclairement.	Dans les zones chaudes pour Toits, façades et générateurs.
------------------	---	---	---

1.4.d Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque :

Ce modèle intègre à la fois les pertes de tension induites par la résistance série R_S et les fuites de courant représentées par une résistance en parallèle R_{Sh} . Les fabricants s'appuient sur ce modèle pour fournir les caractéristiques techniques de leurs cellules solaires dans les fiches techniques, le considérant comme satisfaisant voire comme une référence [9]. La figure 9 illustre le schéma électrique d'un module PV comportant une diode.

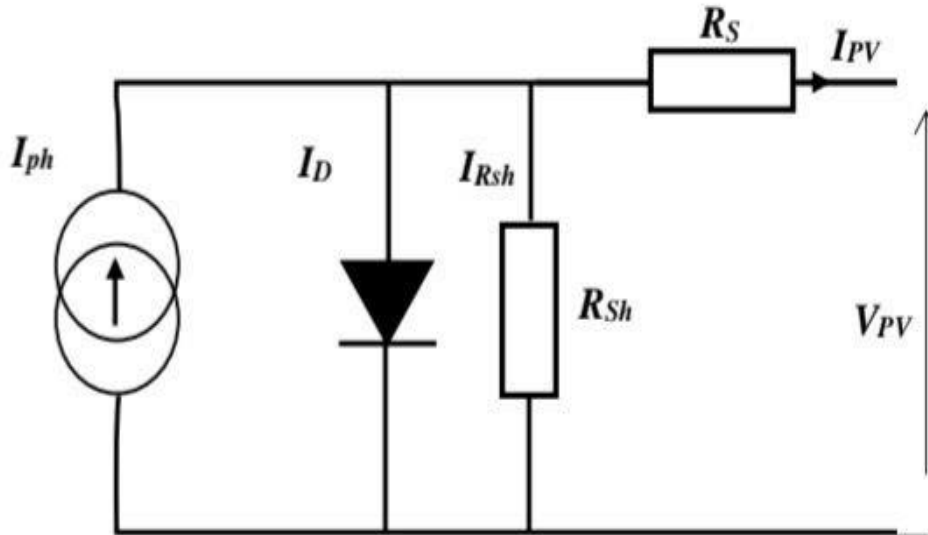


Figure 9 Schéma électrique d'un module PV comportant une diode.[9]

D'après le circuit équivalent présenté sur la figure 9 et en appliquant le théorème de Kirchhoff on a le courant I_{PV} qui se calcule par l'équation (I.3)

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{Rsh} \quad (I.3)$$

CHAPITER I : généralités sur photovoltaïque

Où ; I_{ph} est le courant photonique, I_D est le courant qui passe par la diode et I_{Rsh} est le courant de fuite par la résistance parallèle R_{Sh} .

Le courant qui passe par la diode est donne par l'équation (I.4)

$$I_d = I_s(e^{\frac{V_{pv}}{\alpha V_t}} - 1) \quad (I.4)$$

Où ; I_s est le courant de saturation de la diode, α est le facteur d'idéalité de la jonction PN et V_t est la tension thermique de la diode qui se calcule par la relation (I.5).

$$V_t = \frac{KT}{q} \quad (I.5)$$

Où ; q est la charge électronique, K est la constante de Boltzmann et T est la température de la jonction.

D'après l'équation (I.3) qui calcule le courant de module PV et celle de (I.4) qui représente le Courant traverser par la diode ; le courant de module PV peut se calculer par la relation (I.6).

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s(e^{\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{\alpha V_t}} - 1) - \frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{R_{sh}} \quad (I.6)$$

I_{sat} : le courant de saturation de la jonction,

K : la constante de Boltzmann (1.381 10²³ Joules/Kelvin),

T : la température de la cellule en Kelvin,

e : est la charge d'un électron,

n : c'est le facteur de non idéalité de la jonction,

I_{cell} : le courant fourni par la cellule,

V_{cell} : la tension aux bornes de la cellule,

I_{cc} : le courant produit par la cellule lorsqu'elle est mise en court-circuit

R_{shunt} : la résistance modélisant les courants de fuites de la Jonction

R: l série a résistance série caractérisant les diverses résistances de contacts et de connexions

1.5 MODULE PV :

Pour accroître la production d'énergie, les cellules solaires sont assemblées en modules, comme illustré dans la figure 10. Lorsque ces cellules sont connectées en série, la tension augmente tandis que le courant reste constant, alors qu'une connexion en parallèle augmente le courant tout en maintenant la tension constante. Afin de protéger ces cellules contre l'humidité, elles sont encapsulées dans un polymère EVA (éthylène-vinyle-acétate). De plus, la surface avant des modules est recouverte d'un verre trempé à haute transmission, offrant à la fois une résistance mécanique robuste et une transmission efficace de la lumière solaire. Pour assurer une protection adéquate, la surface arrière peut-être recouverte de polyéthylène ou d'un matériau similaire. [10]

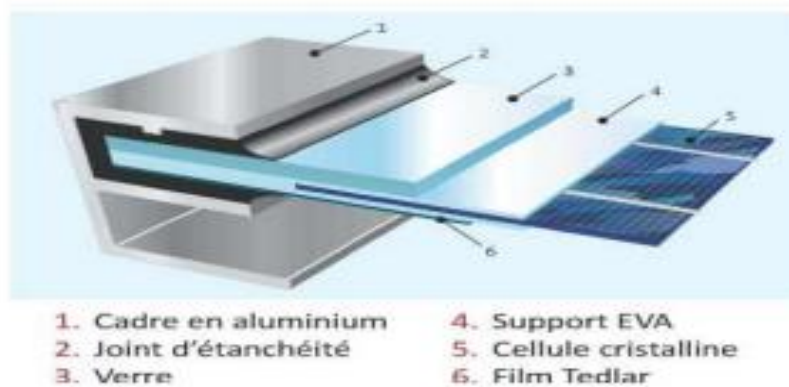


Figure 10 Composition d'un panneau photovoltaïque. [10]

1.5.a LES CONVERTISSEURS :

1.5.b Convertisseur DC/DC :

La fonction de la conversion DC/DC est d'ajuster l'énergie entre une source de tension continue et une source de courant continu [11]. Dans le présent travail, l'intérêt sera porté sur les

Convertisseurs de types continus appelés "hacheurs", qu'ils soient abaisseurs, éleveurs ou bien dévolteurs/survolteurs, qui correspondent aux applications moyennes et forte puissance. La représentation symbolique la plus couramment utilisée est donnée.

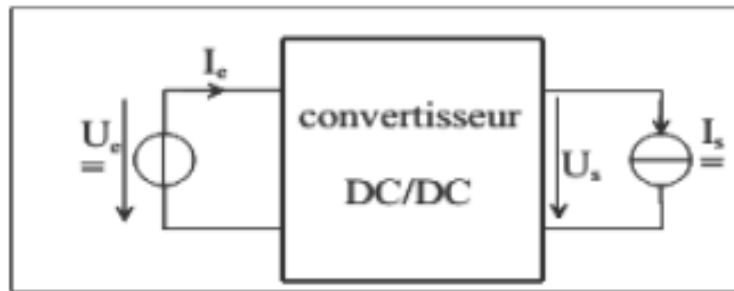


Figure 11 La représentation symbolique d'un convertisseur DC/DC. [11]

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques qui permettent de fournir une alimentation continue à un niveau spécifique de tension ou de courant à partir d'une source continue fixe. [11] Ils sont généralement utilisés dans les systèmes photovoltaïques comme interface d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et l'alimentation d'une charge continue et pour le stockage d'énergie dans des batteries. Ils permettent aussi de commander la poursuite du point de puissance maximale d'un système PV en suivant des stratégies de contrôle spécifiques. La conversion d'énergie se fait par commutation.

1.5.c Convertisseur DC/AC :

Un convertisseur continu-alternatif est nommé un onduleur c'est un dispositif D'électronique de puissance qui permet la conversion d'énergie électrique continu (DC) à La forme alternative (AC) afin d'alimenter des charges en courant alternatif. Cet échange D'énergie est basé sur des composants semi-conducteurs command ables rapides et Robustes. [11]

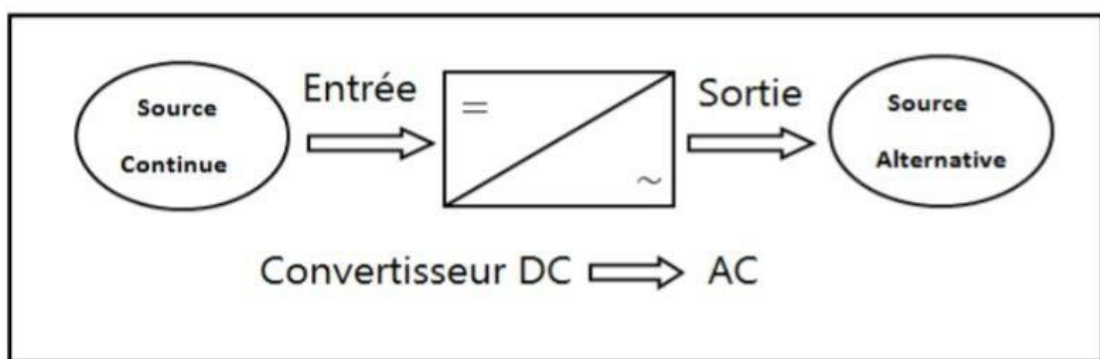


Figure 12 La représentation symbolique d'un convertisseur DC/AC. [11]

1.5.c.1 Les onduleurs sont utilisés afin de :

- Fournir de la tension ou du courant alternatif de fréquence et d'amplitude Variable. C'est le cas de la variation de vitesse des moteurs asynchrones.
- Fournir une ou des tensions alternatives de fréquence et d'amplitude fixes. C'est le cas des alimentations de sécurité, ils sont alimentés souvent par des batteries

1.5.c.2 Dimensionnement de l'onduleur :

Souvent, on devra utiliser un onduleur pour adapter la puissance générée à la charge

Alternative. La puissance nominale d'un onduleur est la puissance exprimée en VA que le Convertisseur est capable de la délivrer en fonctionnement permanent.

1.5.c.3 Les paramètres de dimensionnement :

L'efficacité est un critère crucial car elle influence directement la taille du champ photovoltaïque et de la batterie. Elle varie en fonction du taux de charge, qui représente le rapport entre la puissance de sortie et la puissance nominale. L'efficacité de l'onduleur, exprimée en pourcentage, est le rapport entre l'énergie de sortie et l'énergie fournie par le générateur photovoltaïque. Actuellement, les meilleurs onduleurs atteignent des pics d'efficacité de 98%, avec une moyenne des pics d'efficacité de 95,2%. Typiquement, le dimensionnement de la puissance de l'onduleur intervient en deuxième position, après avoir déterminé les besoins énergétiques (Bj). [12]

$$P = E_c / 0.8 E_c * 1.25 \quad (I.7)$$

E_c : l'énergie alternative consommée

B_j : les besoins énergétiques journaliers [Wh]

1.6 CABLAGE ET BOITE DE JONCTION :

La mise en série de plusieurs modules pour constituer un string est assurée par des câbles. Pour minimiser les risques de défaut à la terre ou de court-circuit après l'installation, l'utilisation de câbles à simple conducteur avec double isolation est fortement recommandée. Des connecteurs débranchables peuvent être utilisés pour simplifier la procédure d'installation. Ces connecteurs renforcent la protection contre les risques du choc électrique. Si le système PV est constitué de plusieurs strings, une boîte de jonction permet leur mise en parallèle. La boîte de jonction peut

contenir des éléments de protection tels que des fusibles, des interrupteurs et des sectionneurs. [13]

1.7 LES DIFFERENTS TYPES DE SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES :

1.7.a Système PV autonome :

Autonomes ou « stand-alone », ces installations isolées ne sont pas connectées au réseau, mais elles doivent assurer la couverture de la demande de la charge en tout temps. La puissance à la sortie du générateur photovoltaïque n'est pas suffisante pour satisfaire la demande de charge.

Aussi, l'autonomie du système est assurée par un système de stockage d'énergie. En général ces installations comprennent quatre éléments : [14]

- Un ou plusieurs modules PV.
- Le système de régulation.
- Une ou plusieurs batteries.
- L'onduleur

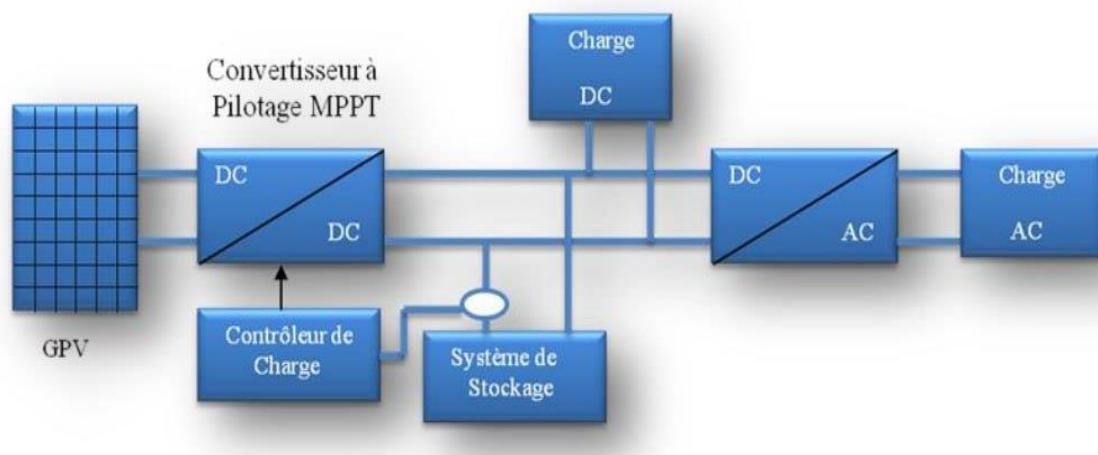


Figure 13 Installation photovoltaïque autonome. [24]

1.7.b Système PV connecte directement au réseau :

Les systèmes photovoltaïques connectés à un réseau permettent la décentralisation de la Production sur ce réseau électrique. L'énergie est produite plus près des lieux de consommation et non pas seulement par de grandes centrales nucléaires, thermiques ou hydroélectriques. Au fil du temps, les systèmes PV connectés à un réseau réduiront la nécessité d'augmenter la

capacité des lignes de transmission et de distribution en ayant besoin d'acheminer uniquement son excédent d'énergie vers les zones en manque de production.

Cette mise en commun des productions permet aussi un sous-dimensionnement des équipements de production complémentaire. Ces transferts éliminent la nécessité d'acheter et d'entretenir une batterie d'accumulateurs. Il est toujours possible d'utiliser ceux-ci pour servir d'alimentation d'appoint lorsque survient une panne de réseau. [14]

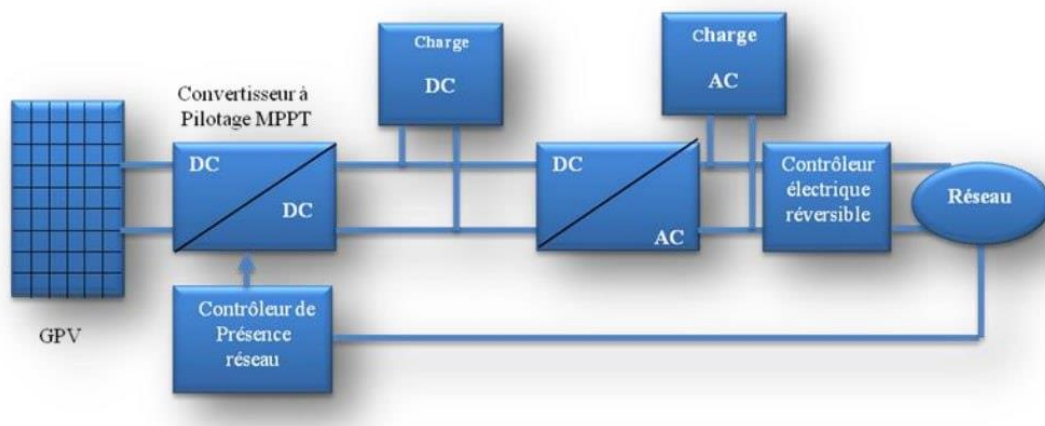


Figure 14 Installation photovoltaïque couplée au réseau. [24]

1.7.c Systèmes hybrides :

Les systèmes d'énergie hybride combinent au moins deux sources d'énergie renouvelable avec une ou plusieurs sources d'énergie conventionnelle. Les sources renouvelables, telles que le photovoltaïque et l'éolienne, ne fournissent pas une puissance constante. Cependant, en raison de leurs complémentarités, les associer permet d'assurer une production électrique continue. Ces systèmes sont souvent autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont fréquemment utilisés dans des régions isolées. Ils peuvent être configurés de deux manières : en architecture à bus continu ou en architecture à bus alternatif.

Dans la première configuration, la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus continu. Les systèmes de conversion d'énergie en courant alternatif fournissent leur puissance à un redresseur pour la convertir en courant continu. Les générateurs sont ensuite connectés en série avec l'onduleur pour alimenter les charges alternatives. L'onduleur est chargé d'alimenter ces charges à partir du bus continu tout en maintenant l'amplitude et la fréquence définies. La fonction principale du système de supervision est de contrôler la mise

CHAPITER I : généralités sur photovoltaïque

en marche et l'arrêt des générateurs et du système de stockage. La simplicité de commande est l'avantage majeur de cette topologie.

Dans la seconde configuration, tous les composants du système hybride sont reliés directement à la charge alternative. [15]

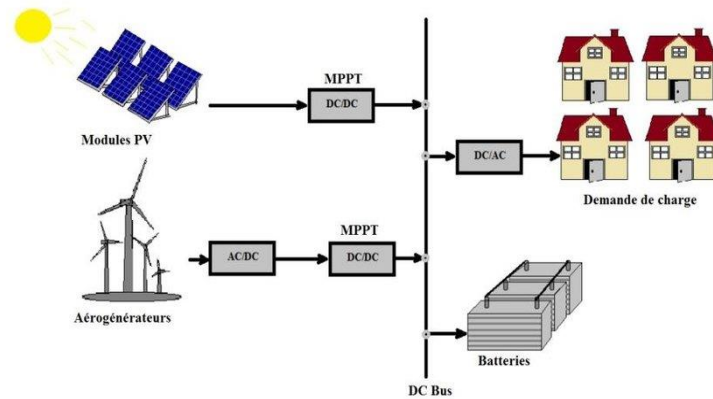


Figure 15 Schéma de système hybride.[15]

1.8 PRINCIPE DU MPPT :

La commande MPPT, en tandem avec un étage intermédiaire d'ajustement, assure que le générateur PV opère en continu à sa puissance maximale. Ainsi, quelle que soit la météo (température et luminosité), le convertisseur maintient le système au point de fonctionnement optimal ($V_{mpp} \cdot I_{mpp}$). Habituellement, cet ajustement prend la forme d'un convertisseur DC-DC, comme illustré dans la figure 16 [16]

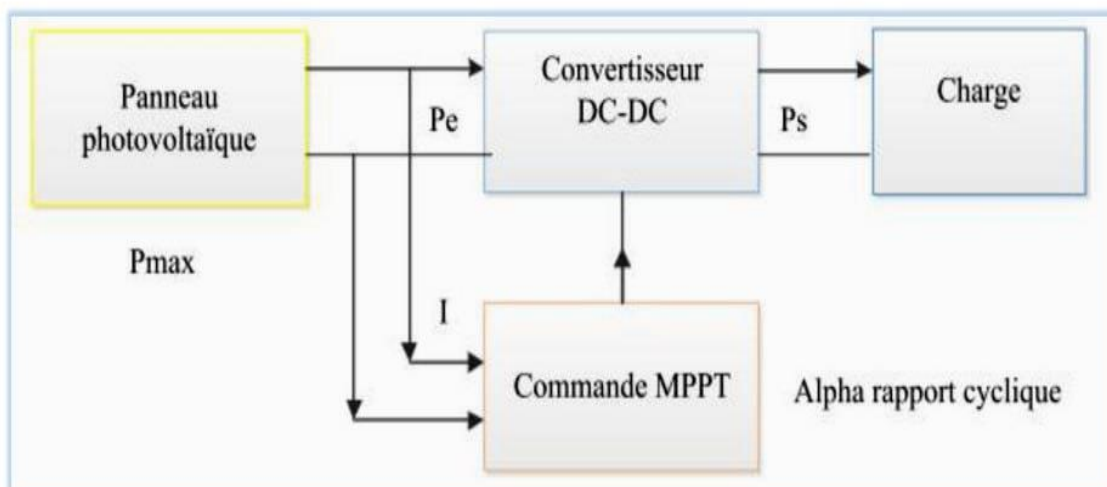


Figure 16 Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT. [16]

1.8.a Variations du point de puissance maximale en fonction de l'ensoleillement :

Cette quête se déroule en temps réel, avec une variation fréquente de la position du PPM.

Cette variation peut se produire à des vitesses variables selon les conditions d'utilisation, avec des changements plus ou moins rapides. La figure 17 illustre le parcours du PPM pour divers niveaux d'ensoleillement.

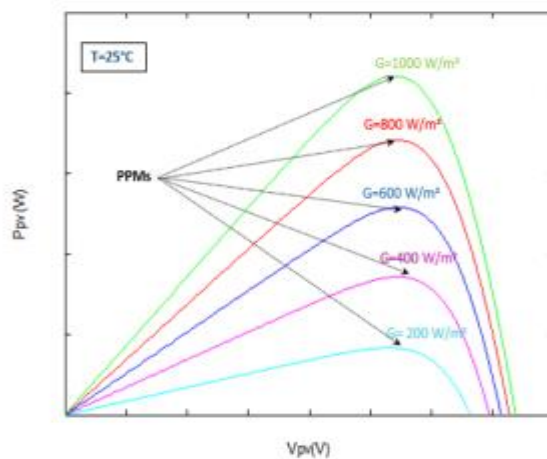


Figure 17 Variations du point de puissance maximale en fonction de l'ensoleillement.

1.8.b Variations du point de puissance maximale en fonction de la température :

Cette quête se déroule en temps réel, avec une variation fréquente de la position du PPM.

Cette variation peut se produire à des vitesses variables selon les conditions d'utilisation, avec des changements plus ou moins rapides. La figure 18 illustre le parcours du PPM pour divers niveaux température.

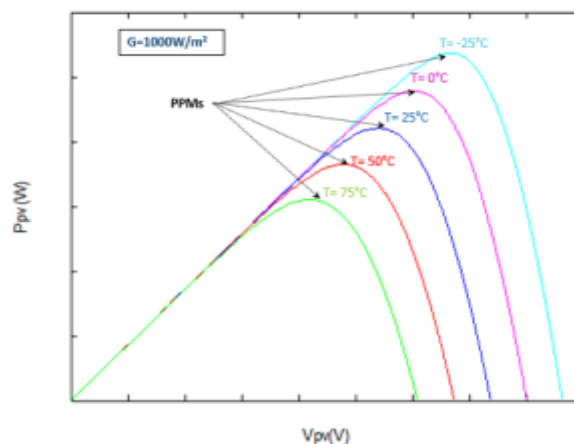


Figure 18 Variations du point de puissance maximale en fonction de la température.

1.9 IMPACT ENVIRONNEMENTAL SUR LES PERFORMANCES D'UN GPV :

Pendant son fonctionnement, un module photovoltaïque est soumis à une série de variations environnementales, telles que les cycles jour-nuit et les saisons estivales-hivernales, qui impactent à la fois son rendement et sa durée de vie. [17]

1.9.a Influence du faible éclaircissement :

Pour de nombreux modules solaires disponibles sur le marché, l'efficacité n'est pas constante et diminue de manière significative à faible luminosité, généralement lorsque l'intensité lumineuse chute en dessous de 200 W/m^2 . Cette variation est souvent négligée par les fabricants, qui ne fournissent pas d'informations sur le comportement de leurs modules dans des conditions de faible luminosité. La figure 19 et 20 [17] présente des courbes I-V représentant ce phénomène sous différents niveaux d'ensoleillement.

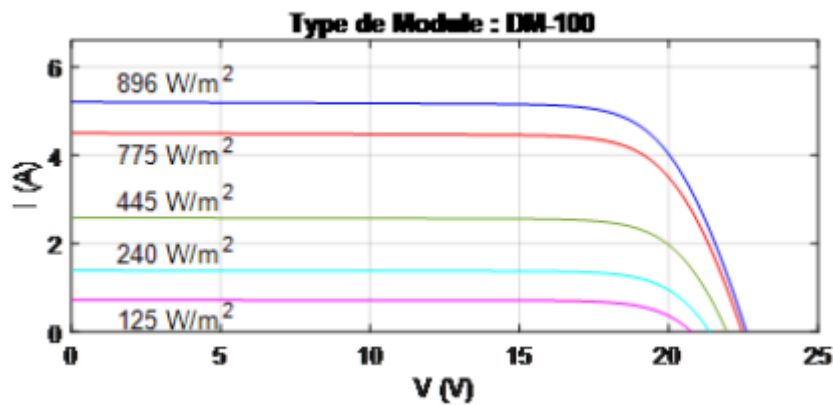


Figure 19 Fluctuations de la courbe I-V pour T constante ($T=25^\circ\text{C}$), et G variable.

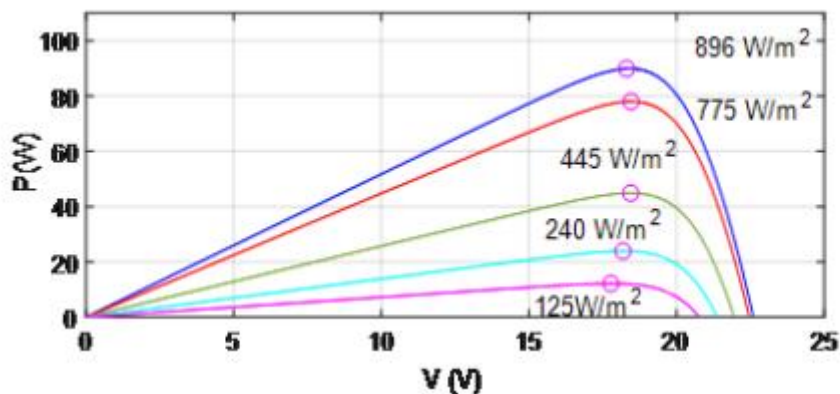


Figure 20 Fluctuations de la courbe P-V pour T constante ($T=25^\circ\text{C}$), et G variable.

1.9.b Influence de la température sur un module PV :

L'influence de la température sur les performances du panneau solaire varie en fonction de plusieurs facteurs tels que l'éclairement, la température ambiante et la vitesse du vent, lesquels peuvent tous varier selon le site choisi pour l'installation photovoltaïque. De plus, les coefficients de température diffèrent selon les matériaux utilisés pour fabriquer les cellules solaires. La figure 21 et 22 [17] illustre les courbes I-V correspondant à différentes températures pour mettre en évidence cet effet.

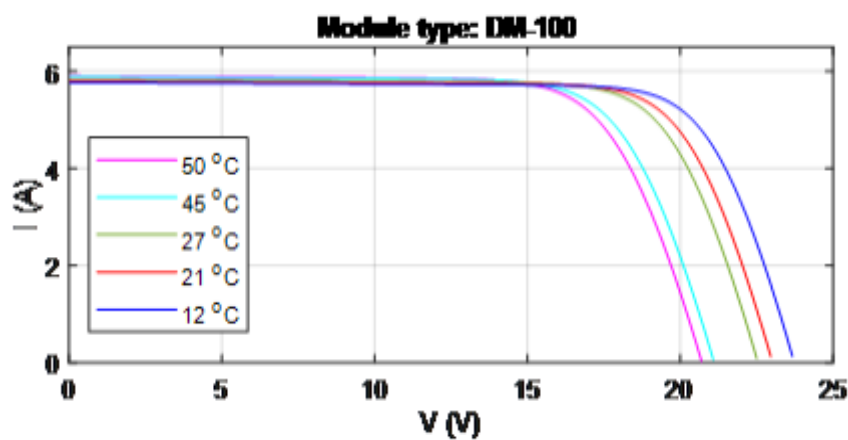


Figure 21 Fluctuations de la courbe I-V pour G constante ($G=1000\text{w/m}^2$), et T variable.

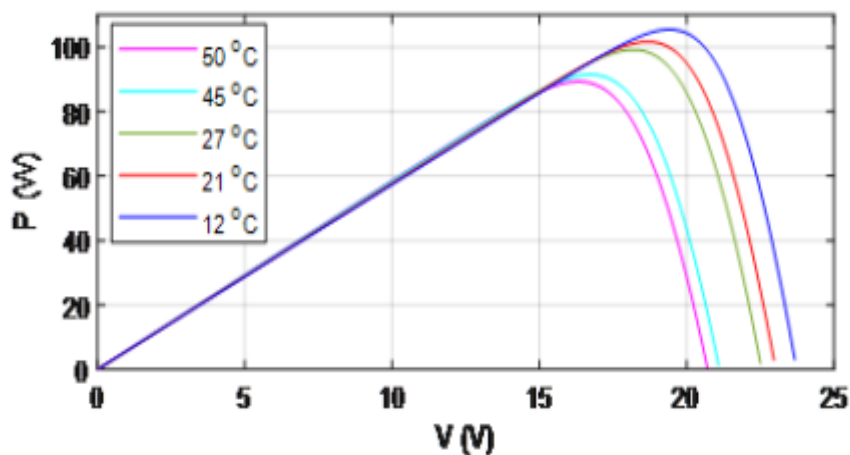


Figure 22 Fluctuations de la courbe P-V pour G constante ($G=1000\text{w/m}^2$), et T variable.

1.10 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE :

1.10.a Avantages :

La conversion directe de l'énergie solaire offre de nombreux avantages :

- Elle utilise une source d'énergie gratuite et inépuisable.
- Elle est silencieuse, non polluante et ne génère aucune émission.
- La maintenance est minimale car il n'y a pas de pièces en mouvement, et la durée de vie des modules est d'environ 20 ans.
- Elle est rentable pour les applications de faible puissance, généralement moins de 3 à 5 kWh par jour.
- Elle permet une adaptation flexible de la taille de l'installation selon les besoins, avec la possibilité d'extension en cas d'augmentation des besoins énergétiques.
- Les risques de choc électrique sont réduits avec des tensions de 12 ou 24 Vcc, et le risque d'incendie est moindre par rapport aux groupes électrogènes alimentés au kérosène ou au fuel.

1.10.b Inconvénients :

- Les panneaux photovoltaïques impliquent des coûts d'investissement élevés.
- La production d'énergie dépend de l'ensoleillement, ce qui rend le rendement variable.
- Le rendement de conversion des modules est souvent faible.
- L'intégration de batteries pour le stockage de l'énergie augmente les coûts du système.
- La fabrication des panneaux photovoltaïques peut engendrer de la pollution.

1.11 CONCLUSION :

Dans ce chapitre nous avons étudié le principe de fonctionnement d'un module PV par une présentation de l'énergie solaire, l'effet photoélectrique et la cellule photovoltaïque qui sont à la base de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

Par la suite, nous avons présenté les types et les technologies de fabrication des cellules/modules PV ainsi sa modélisation électrique qui décrit son comportement par celui d'une diode.

Enfin, une variété de paramètres caractérisent un module PV sont énuméré dans le but de comparer les performances des modules dans les conditions standards

Chapitre 2 :

Les Traceurs

Photovoltaïques

2.1 INTRODUCTION :

L'efficacité d'un dispositif photovoltaïque est définie comme la puissance maximale générée P , divisée par le produit de l'irradiante d'entrée et de sa surface. Cette efficacité de conversion dépend de nombreux facteurs, tels que l'irradiation et la température. Les processus de fabrication entraînent généralement des différences dans les paramètres électriques, même dans des cellules du même type. De plus, si l'on prend en compte les pertes dues aux connexions des cellules dans un module, il est difficile de trouver deux modules photovoltaïques identiques. Ainsi, seule la mesure expérimentale de la courbe I-V permet de connaître avec précision les paramètres électriques d'un dispositif photovoltaïque. Cette mesure fournit des informations très pertinentes pour la conception, l'installation et la maintenance des systèmes photovoltaïques. Compte tenu du grand nombre de méthodes de mesure de I-V, une étude de celles-ci serait très utile aux chercheurs en systèmes photovoltaïques

2.2 LES CARACTÉRISTIQUES I-V/P-V D'UN GÉNÉRATEUR PHOTOVOLTAÏQUES

2.2.a Caractéristiques I-V :

La courbe I-V représente l'ensemble des points de fonctionnement possibles (courant et tension) d'un module photovoltaïque ou d'une chaîne de modules à des conditions existantes de la lumière solaire (ensoleillement) et de la température. La courbe commence au courant de court-circuit et se termine à la tension en circuit ouvert. Le point de puissance maximale situé au niveau du genou de la courbe I-V est le point de fonctionnement qui délivre la puissance de sortie la plus élevée. [18]

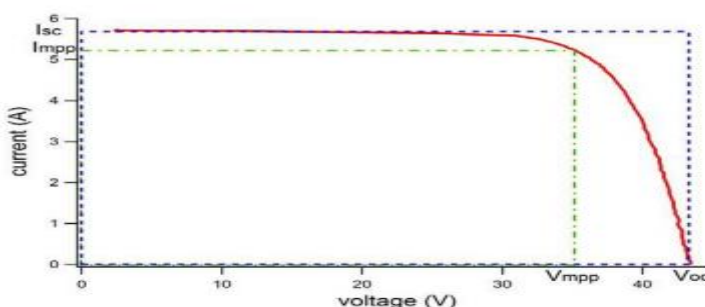


Figure 23 Caractéristiques I-V.

2.2.b Caractéristique P-V :

La courbe P-V (puissance en fonction de la tension) indique zéro aux extrémités et un maximum au niveau du genou de la courbe I-V, toute perte de valeur comme ombrage, salissure, ou résistance série - qui affecte la forme de la courbe I-V permettra de réduire la puissance maximum et de diminuer la valeur du panneau en tant que source d'énergie. [18]

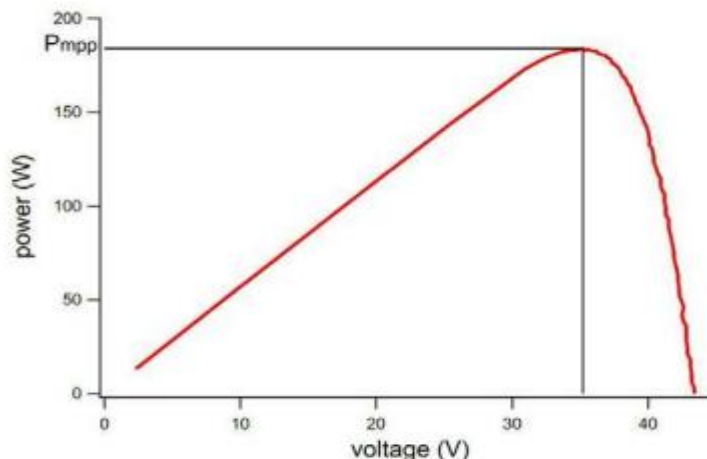


Figure 24 Caractéristique P-V.

2.3 LES DIFFÉRENTES MÉTHODES POUR TRACER LES CARACTÉRISTIQUES I-V/P-V D'UN GÉNÉRATEUR PHOTOVOLTAÏQUE :

La mesure de la courbe I-V repose fondamentalement sur la régulation du courant généré par le module photovoltaïque, allant du point de tension à vide (V_{oc}) au point de court-circuit (I_{sc}). Diverses méthodes sont disponibles pour accomplir cette procédure.

2.3.a Traceurs à base de charge électronique :

La technique de charge électronique (illustrée dans la figure 25) emploie un transistor, généralement un MOSFET, comme élément de charge. La résistance entre le drain et la source est modulée par la tension grille-source, influençant ainsi le flux de courant du module. Lors de l'analyse de la courbe I-V du module, le MOSFET doit opérer dans ses trois modes de fonctionnement (coupure, actif et région ohmique). Cette approche implique que la majeure partie de la puissance générée par le module doit être dissipée par le dispositif lui-même, limitant ainsi son utilisation à des niveaux de puissance moyenne. Dans [19] Une méthode simple pour obtenir la courbe I-V des panneaux solaires consiste à utiliser une charge électronique basée sur un MOSFET, permettant un balayage rapide du module. L'avantage de

cette approche réside dans la capacité du MOSFET à ajuster rapidement sa résistance équivalente de charge. Un MOSFET linéaire est piloté par un signal de balayage à basse fréquence, avec une amplitude suffisamment grande pour couvrir toute la plage caractéristique des panneaux. En cas de nécessité d'un courant de sortie plus élevé, plusieurs MOSFET peuvent fonctionner en parallèle pour gérer un réseau avec plusieurs panneaux photovoltaïques. La tension et le courant de sortie sont détectés à l'aide d'un diviseur de potentiel et d'une résistance de détection respectivement. Les données de sortie sont transmises à un oscilloscope pour visualiser la courbe. Les valeurs de I_{sc} et V_{oc} sont obtenues à l'aide de détecteurs de crête, tandis que les signaux de tension et de courant sont multipliés par un multiplicateur pour obtenir la puissance instantanée. Un troisième détecteur de crête peut être utilisé pour capturer la valeur de P_m . Les auteurs de [20] Les auteurs proposent un système novateur pour surveiller les performances des centrales solaires photovoltaïques, incluant les courbes I-V, obtenues rapidement pour minimiser les interférences causées par les nuages lors des mesures en extérieur. La charge électronique, composée de plusieurs transistors en cascade, permet de déplacer graduellement le générateur PV du court-circuit à l'état de tension en circuit ouvert en ajustant le courant de base du transistor. Une carte d'acquisition de données avec convertisseur A/D haute vitesse est utilisée pour mesurer le courant et la tension tout en suivant les variations du point de fonctionnement. Une innovation notable de ce circuit réside dans le contrôle du balayage de la courbe I-V via une rampe de courant plutôt que l'utilisation d'une rampe de tension. Une autre contribution présentée dans [21] propose un circuit pour mesurer les courbes I-V des cellules PV multi-jonctions, celles ayant plusieurs jonctions pour capturer davantage de photons. Ce circuit utilise un transistor MOSFET à canal N et des amplificateurs opérationnels pour créer une tension puits de courant contrôlé. À chaque réglage de courant, un amplificateur différentiel est employé pour lire la tension aux bornes de la cellule solaire, balayant ainsi plusieurs points le long de sa courbe caractéristique. Les données recueillies pour chaque courbe incluent la température des cellules solaires, l'angle solaire et l'heure.

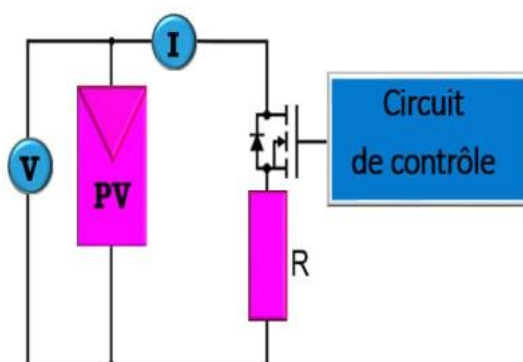


Figure 25 Traceurs à base de charge électronique.[20]

2.3.a.1 Les avantages :

- La flexibilité plus élevée
- Temps de réponse rapide

2.3.a.2 Les inconvénients :

- Il a une haute impédance et faible capacité.
- Les hautes tensions peuvent détruire le MOSFET

2.3.b Traceurs à base d'Amplificateur de Puissance Bipolaire :

Cette approche implique un circuit simple permettant l'inversion du courant et de la tension dans le module, facilitant ainsi la mesure des courbes IV sombres du module. Le schéma repose sur un amplificateur de puissance de classe B traditionnel, utilisant deux transistors BJT comme charge pour le courant direct et inverse, nécessitant un fonctionnement dans ses trois modes (zone de coupure, zone active et zone de saturation). Cependant, cette méthode présente des limitations, notamment une dissipation significative de puissance par les transistors, restreignant son application aux puissances moyennes. Dans une configuration contrôlée par PC décrite dans [22], l'accent est mis sur la mesure automatisée des caractéristiques I-V de cellules solaires de grande surface sous une source de lumière artificielle simulant le rayonnement solaire. Ce test utilise un amplificateur de puissance bipolaire piloté par un générateur de fonctions pour fournir le courant nécessaire à la cellule, tandis qu'une application contrôle le générateur de fonctions, augmentant progressivement la tension jusqu'à atteindre la polarisation maximale ou une valeur de courant de sécurité. Une approche similaire, décrite dans [23], utilise un circuit presque identique pour polariser la tension d'une cellule, remplaçant le générateur de fonctions par une carte D/A agissant en tant que circuit de contrôle.

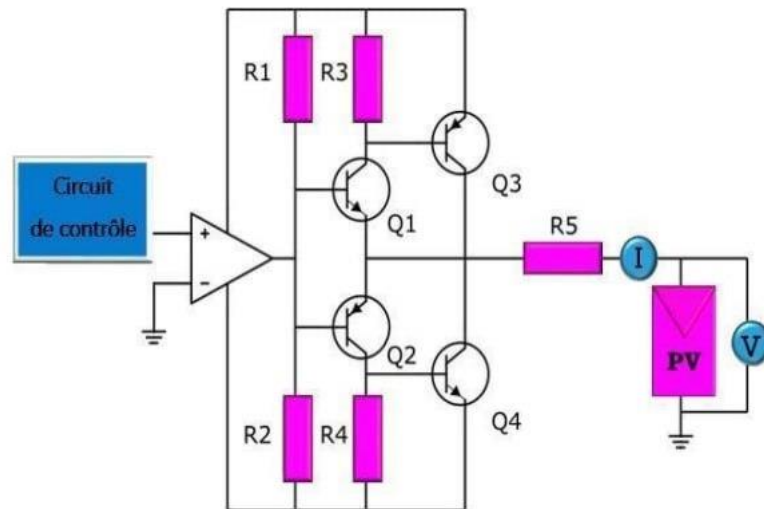


Figure 26 Traceurs à base d'Amplificateur de Puissance Bipolaire. [20]

2.3.b.1 Les avantages :

- Circuit simple
- Possibilité de mesurer le courant d'obscurité en utilisant cette méthode

2.3.b.2 Les inconvénients :

- Les interrupteurs (BJT) devraient être exploités en trois modes.
- Ne peut être appliqué pour les grandes systèmes d'alimentation

2.3.c Traceurs à base d'amplificateur de puissance à quatre quadrants

Un système d'alimentation à quatre quadrants a la capacité de fournir ou d'absorber de la puissance, permettant ainsi d'ajuster le courant en fonction de la tension, que ce soit en l'augmentant ou en la diminuant avec une tension positive ou négative, respectivement. Il peut être utilisé comme une charge réglable pour d'autres sources d'énergie ou pour différents équipements.

Pour un module photovoltaïque, l'objectif principal est d'obtenir la courbe I-V dans le premier quadrant du cercle, bien que l'exploration des points se situe dans le deuxième et le quatrième quadrant. Une alimentation à quatre quadrants peut être vue comme une source d'alimentation $V(t)$ dont la sortie peut être ajustée par un signal de référence en entrée ou programmée pour balayer une gamme de valeurs. Le schéma illustré dans la figure III.9 offre une vue fonctionnelle de cette alimentation à quatre quadrants. [24]

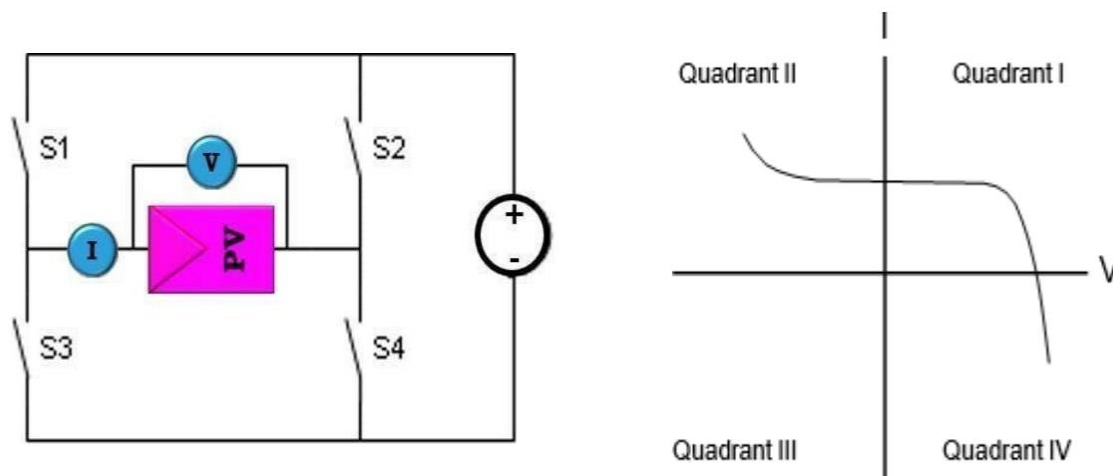


Figure 27 Schéma du traceur quatre quadrants.[20]

S1 et S4 fermés et $V(t)$ supérieure à la tension en circuit ouvert du module photovoltaïque sous test, le point de fonctionnement du PV est décalé dans le quatrième quadrant.

S1 et S4 fermées et $V(t)$ mineur de V_{oc} , le point de fonctionnement du PV est décalé dans le premier quadrant.

S2 et S3 fermés, la tension V du module PV est forcée à $-V(t)$ et le point de fonctionnement du PV est décalé dans le deuxième quadrant.

En effet, ce type de charge est intrinsèquement coûteux. Ainsi, Les quatre quadrants d'alimentations qui travaillent avec plus de 1 kW et sont à peine disponibles. En plus, cette méthode n'est pas applicable pour mesurer un générateur photovoltaïque entier.

2.3.d Traceurs à base de résistance variable :

Le moyen le plus simple de mesurer la courbe I-V d'un module consiste à utiliser une résistance variable, variant de zéro à l'infini pour capturer les points du court-circuit au circuit ouvert. Cette méthode est limitée aux modules de faible puissance en raison de la disponibilité restreinte des résistances pour une puissance plus élevée. Bien que les résistances de charge ne soient pas recommandées, elles peuvent constituer un moyen peu coûteux d'évaluer les performances d'un module solaire. Certains systèmes automatisés utilisent des relais contrôlés

par une carte informatique pour ajuster la résistance de charge, améliorant ainsi l'efficacité du processus par rapport aux méthodes manuelles. Dans [25]

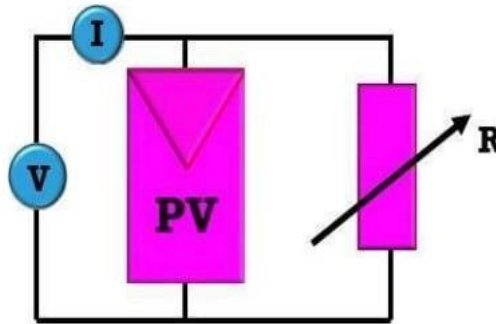


Figure 28 Schéma d'un traceur avec une charge résistive. [20]

2.3.d.1 Simulation sur Matlab Traceurs à base de résistance variable :

Nous avons fait la simulation de s résistance variable ous MATLAB/SIMULINK afin de voir le comportement de ces de sta résistance variable tiques. Le modèle de simulation du résistance variable est illustré par la figure 29

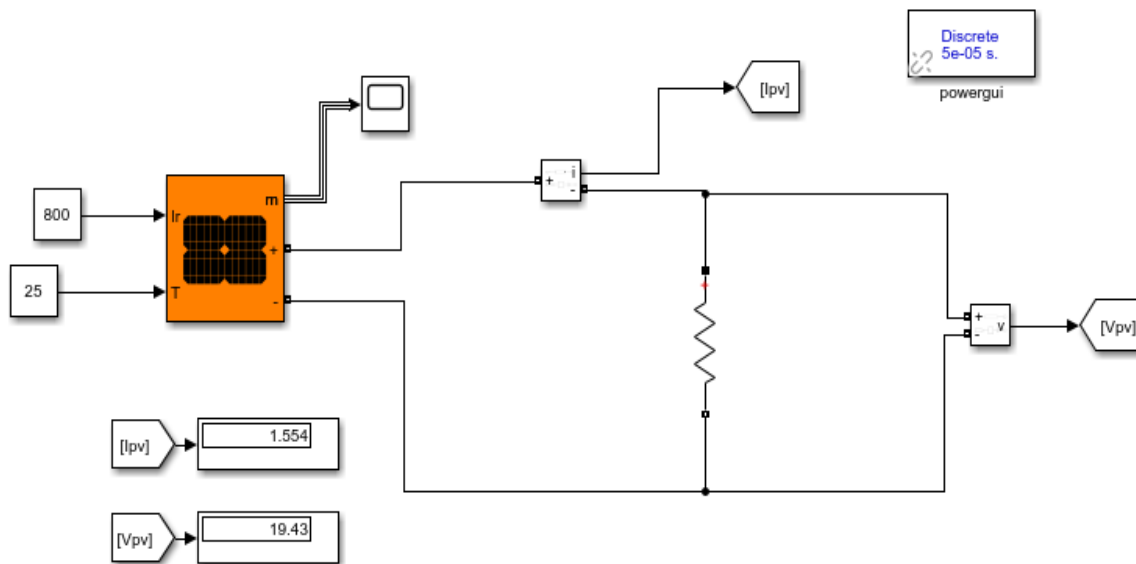


Figure 29 Traceurs à base de résistance variable sur Matlab.

2.3.d.1.1 La caractéristique tension-courant :

A température et à éclairement constants, et précisément aux conditions standards

($G=800\text{w/m}^2$, $T=25$) la caractéristique i-v est donnée par la figure 30 ci-dessous

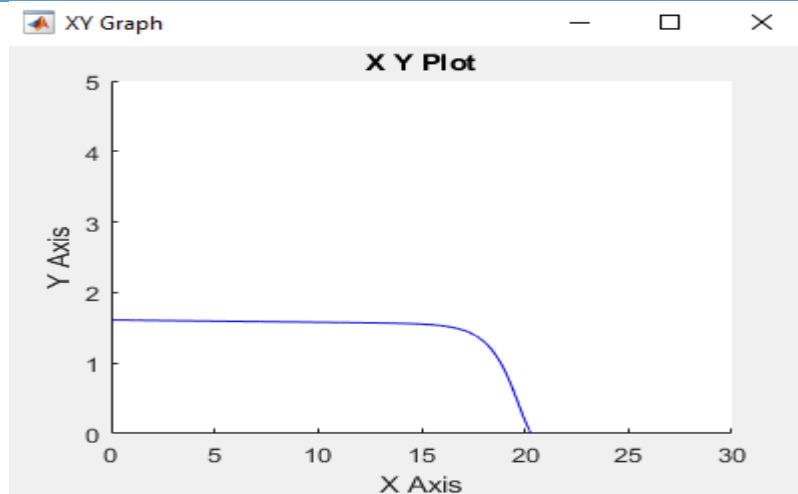


Figure 30 Caractéristique i-v résistance variable sur Matlab.

2.3.d.1.2 La caractéristique tension-puissance :

A température et à éclairement constants, et particulièrement aux conditions standards

($G=800\text{w/m}^2$, $T=25$) la caractéristique p-v est donnée par la figure 31

La caractéristique montre l'existence d'un point PPM où la puissance se trouve être maximale

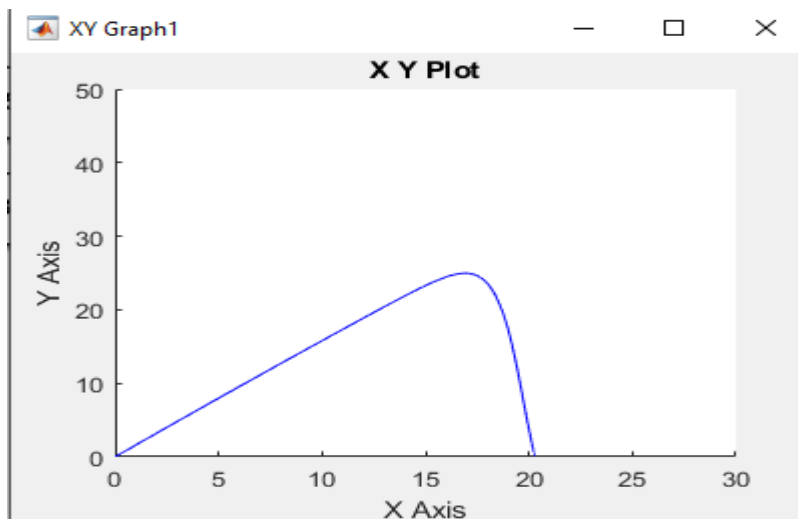


Figure 31 Caractéristique p-v résistance variable sur Matlab.

a) Les avantages :

- Moins couteuse et facile à remplacer.
- La méthode la plus simple.

b) Les inconvénients :

- Faible de fiabilité et réponse.
- Nécessite de programmer en cas d'utilisant une résistance variable Programmable

2.3.e Traceurs à base de charge capacitive :

Cette méthode de mesure repose sur la polarisation du module à l'aide d'un condensateur volumineux. Ce dernier se charge pendant que la première passe du court-circuit au circuit ouvert

2.3.e.1 Fonctionnement de la charge capacitive :

Au début de la mesure, le condensateur est court-circuité. Lorsque l'interrupteur S3 s'ouvre et que le S₁ se ferme, le chargement du condensateur débute. À mesure que la charge du condensateur croît, le courant diminue tandis que la tension augmente. Lorsque la charge est complète, le courant provenant du module devient nul, atteignant ainsi la condition de circuit ouvert. Une variante consiste à débiter avec S2 fermé, initiant une charge négative du condensateur et provoquant la traversée de l'axe du courant pour obtenir /sc. La fiabilité de la courbe IV requiert des condensateurs de haute qualité avec une faible résistance série équivalente et de faibles pertes. La séquence adéquate d'activation des trois interrupteurs est essentielle, tout comme la décharge préalable du condensateur pour amorcer une nouvelle mesure. La reproduction non cyclique de la courbe /-V rend difficile une visualisation directe ou une reproduction partielle. Dans une approche [23], la tension et le courant sont surveillés par une carte informatique. La mesure débute avec un signal de déclenchement envoyé par la carte à l'interrupteur connectant le condensateur à la cellule. Une charge capacitive portable, décrite dans [26], repose sur des transistors bipolaires à grille isolée (IGBT) pour les panneaux photovoltaïques en conditions réelles. Les commutateurs IGBT sont utilisés, et le condensateur est constitué d'un arrangement parallèle de condensateurs et de résistances. L'auteur de [25] indique que la taille du condensateur doit être directement proportionnelle à I_{sc} et inversement proportionnelle à V_{oc}. Une vitesse élevée du système de mesure nécessite un condensateur de taille réduite, ce qui est déterminé par un tableau de calcul de capacité dans l'article pour sélectionner la capacité adéquate via un système d'acquisition de données informatisé.

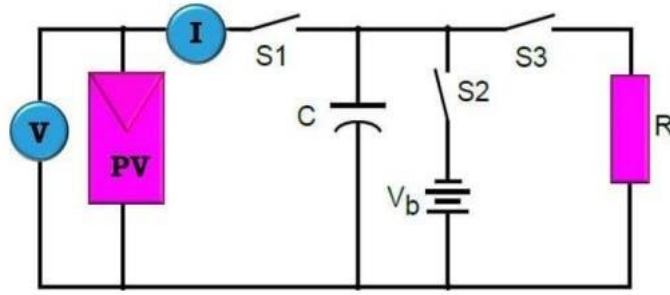


Figure 32 Module PV chargé par un condensateur. [20]

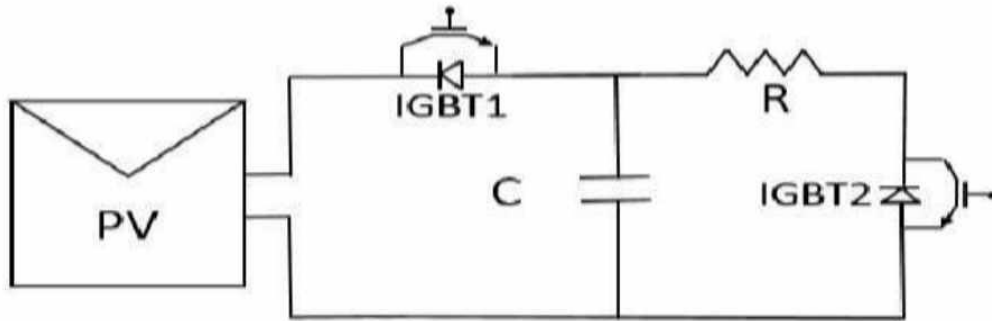


Figure 33 Traceur à base d'une charge capacitive.[25]

2.3.e.2 Dimensionnement de la capacité de condensateur

D'après l'approche employer [30, 31] et le schéma sur la figure 33 le courant $I(V)$ fournie par le module est donne par la formule II.1.

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

Quand l'interrupteur est fermé, le courant $I(V)$ est égal à celui de court-circuit et ceci valide dans l'intervalle $0 < t < t_0$.

Au début de la transition, le condensateur émule un court-circuit, et la tension augmente jusqu'à la fin de la transition a ($t=t_0$), sous l'expression suivante [30, 31]

$$v(t) = \frac{1}{C} \int_0^{t_2} I_{sc} dt = \frac{I_{sc}}{C} \cdot t, \quad 0 < t < t_0 \quad \text{II.2}$$

La transition termine à ($t = t_0$) quand le condensateur est chargé par le voltage V_0 , qui est calculé comme suit [30, 31] :

CHAPITER II : les Traceurs photovoltaïques

$$v(t = t_0) = V_0 = \frac{I_{SC} \cdot t_0}{C} \cong V_{MPP} \quad \text{II.3}$$

Où ; V_{MPP} est le voltage au point de puissance maximal MPP.

Après l'instant t_0 , le module fonctionne comme une source de tension. L'équation différentielle de deuxième ordre suivante décrit le comportement de circuit [30, 31] :

$$\frac{dv(t)}{dt} + \frac{v(t)}{R_{eq} \cdot C} = \frac{V_{OC}}{R_{eq} \cdot C} \quad \text{II.4}$$

D'après la condition initiale à l'équation (II.3), le voltage en fonction de temps est obtenu après la résolution de l'équation comme suit [30, 31] :

$$v(t) = V_{OC} + \left(\frac{I_{SC} \cdot t_0}{C} - V_{OC} \right) e^{\frac{-(t-t_0)}{R_{eq} \cdot C}}, \quad t_0 < t < +\infty \quad \text{II.5}$$

Le courant instantané qui circule à travers le condensateur est donné par l'équation (II.6) [30, 31].

$$i(t) = C \cdot \frac{dv(t)}{dt} = \left(\frac{V_{OC}}{R_{eq}} - \frac{I_{SC} \cdot t_0}{C} \right) e^{\frac{-(t-t_0)}{R_{eq} \cdot C}}, \quad t_0 < t < +\infty \quad \text{II.6}$$

L'expression qui représente la capacité C correspondante au temps de l'intervalle de transition $[0, t_0]$ est donnée par l'équation suivante [30, 31] ;

$$C = \frac{I_{SC}}{V_{OC} - R_{eq} \cdot I_{SC}} \cdot t_0 \quad \text{II.7}$$

Le temps de scan total t_f est calculé par l'équation (II.8) [30, 31] ;

$$t_f = t_0 + 5\tau = t_0 + 5 \cdot R_{eq} \cdot C \quad \text{II.8}$$

Ainsi, la capacité demandée par le traceur est calculée par l'équation (II.9) :

$$C = \frac{t_f \cdot I_{SC}}{V_{OC} + 4 \cdot R_{eq} \cdot I_{SC}} \quad \text{II.9}$$

D'après l'équation (II.9), premièrement il faut déterminer la résistance R_{eq} , donnée par l'équation suivante [30, 31] :

$$R_{eq} = \frac{V_{OC} - V_{MPP}}{I_{SC}} \quad \text{II.10}$$

2.3.e.3 Simulation sur Matlab Traceurs à base de charge capacitive :

Nous avons fait la simulation de charge capacitive sous MATLAB/SIMULINK afin de voir le comportement de ces de charge capacitive statiques. Le modèle de simulation de la charge capacitive est illustré par la Figure 34

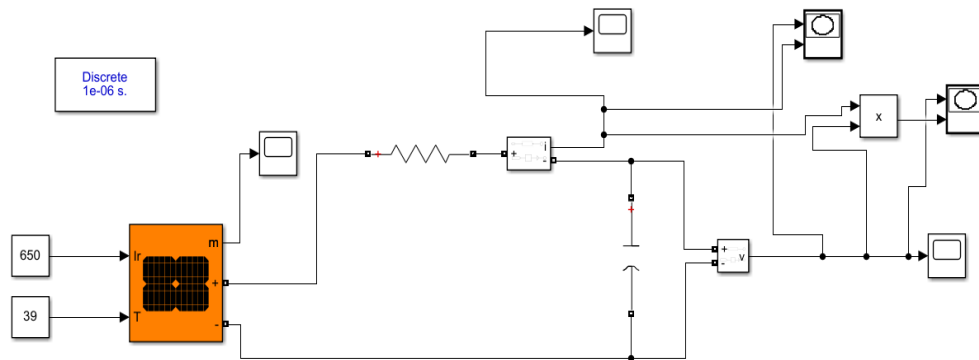


Figure 34 Traceurs à base de charge capacitive sur Matlab.

2.3.e.3.1 La caractéristique tension-courant :

A température et à éclairement constants, et précisément aux conditions standards

($G=650\text{w/m}^2$, $T=39$) la caractéristique i-v est donnée par la Figure 35 ci-dessous

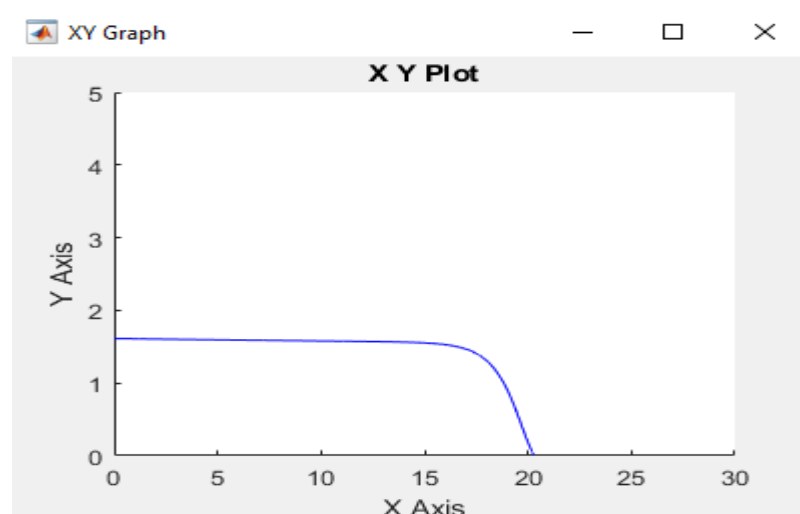


Figure 35 Caractéristique i-v charge capacitive sur Matlab.

2.3.e.3.2 La caractéristique tension-puissance :

A température et à éclairement constants, et particulièrement aux conditions standards

($G=650\text{w/m}^2$, $T=39$) la caractéristique p-v est donnée par la Figure 36

La caractéristique montre l'existence d'un point PPM où la puissance se trouve être maximale

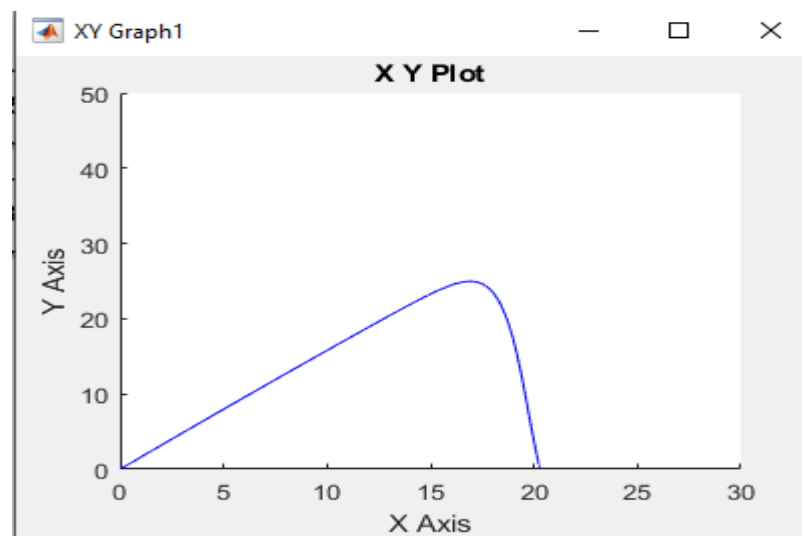


Figure 36 Caractéristique p-v charge capacitive sur Matlab.

a) Les avantages :

- Excellentes caractéristiques
- On peut obtenir le deuxième quadrant de tension en chargeant le condensateur à négatif

b) Les inconvénients :

- Pour chaque nouvelle mesure le condensateur se décharge.
- Difficile de contrôler le Commutateurs pour fonctionner correctement dans l'ordre convenable

2.3.f Traceurs à base d'Hacheurs :

Les convertisseurs DC-DC sont fréquemment utilisés dans les systèmes pour obtenir une tension de sortie moyenne différente de la tension d'entrée. Cette transformation est réalisée grâce à la modulation de largeur d'impulsion (PWM), généralement à fréquence constante. Le rapport cyclique (δ) représente la proportion entre le temps de conduction (T_{oN}) et la période de commutation (T_c). Ces convertisseurs existent en trois configurations de base, similaires à un DC transformateur, fonctionnant en mode de conduction continue (CCM) ou en mode de

conduction discontinue (DCM). Dans un DC transformateur, la relation de transformation peut être ajustée électroniquement en modifiant le rapport cyclique (δ) dans la plage $[0,1]$. La figure 37 illustre ces configurations avec la représentation de la résistance d'entrée par rapport au cycle de service pour CCM. Les relations entre la résistance d'entrée (R_i) et la charge connectée au convertisseur pour CCM et DCM sont résumées dans le tableau I ,où L' est l'inductance du convertisseur et R_L est la résistance de charge, en supposant des convertisseurs sans pertes. Dans [27]. [28]

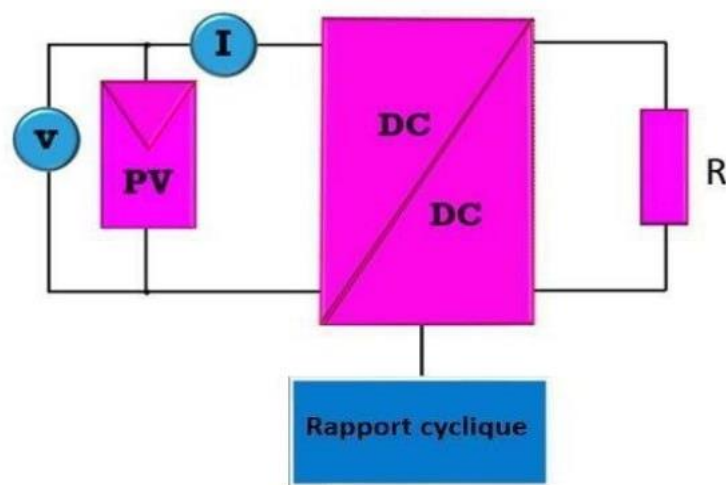


Figure 37 Traceurs à base d'Hacheurs. [20]

2.3.f.1 . Types des convertisseurs DC-DC :

Il y a une diversité de convertisseurs DC-DC, chacun conçu pour répondre à des besoins spécifiques selon l'application. Parmi eux, on distingue trois principaux types.

2.3.f.1.1 Convertisseur abaisseur (Buck convertir) :

C'est un type de convertisseur DC-DC qui diminue la tension de sortie par rapport à celle de l'entrée. Il est optimal lorsque la tension requise pour la charge est moindre que celle correspondant au point de puissance maximale. [29]

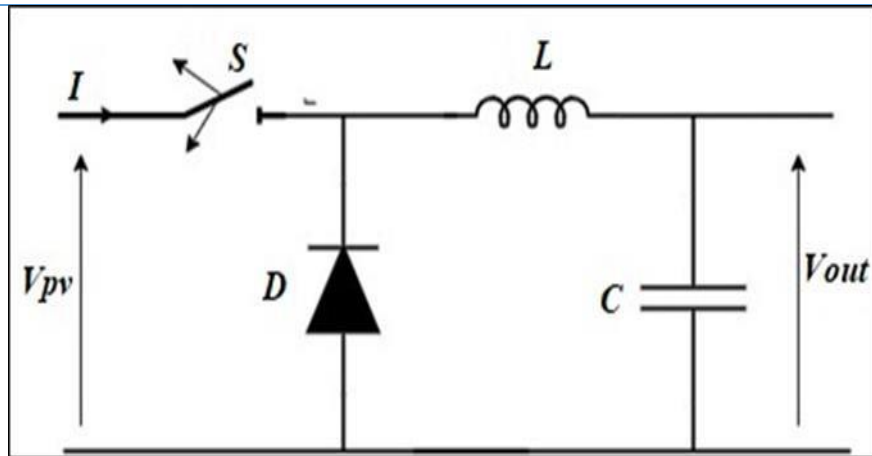


Figure 38 Circuit d'un convertisseur abaisseur (Buck). [29]

i. **Simulation sur Matlab convertisseur abaisseur (Buck)**

Nous avons fait la simulation convertisseur élévateur (Buck) sous MATLAB/SIMULINK afin de voir le comportement de ces convertisseurs statiques. Le modèle de simulation du convertisseur Buck est illustré par la Figure 39

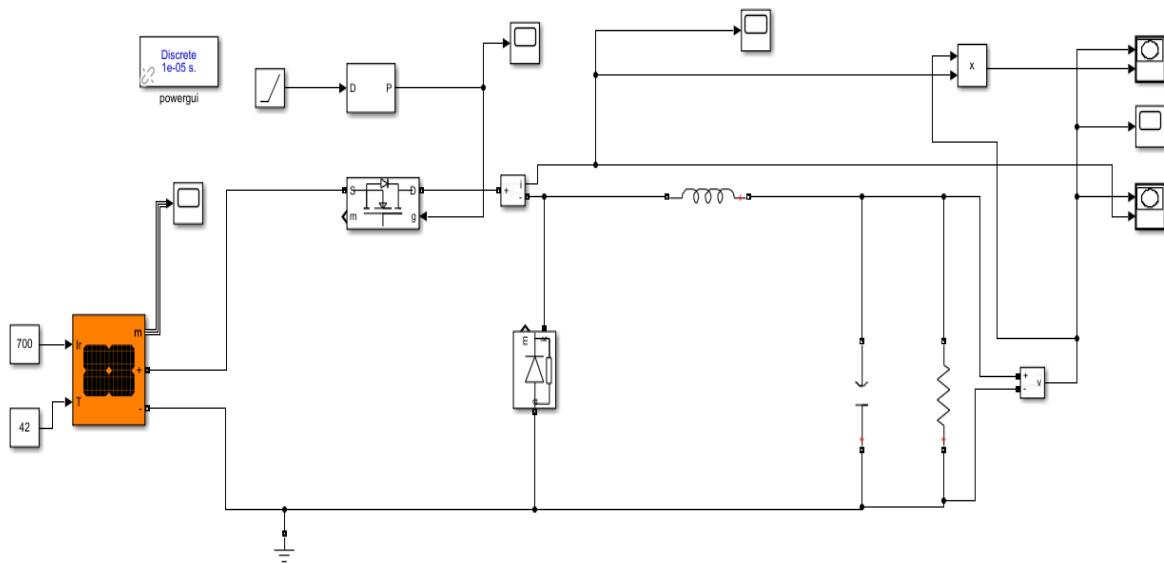
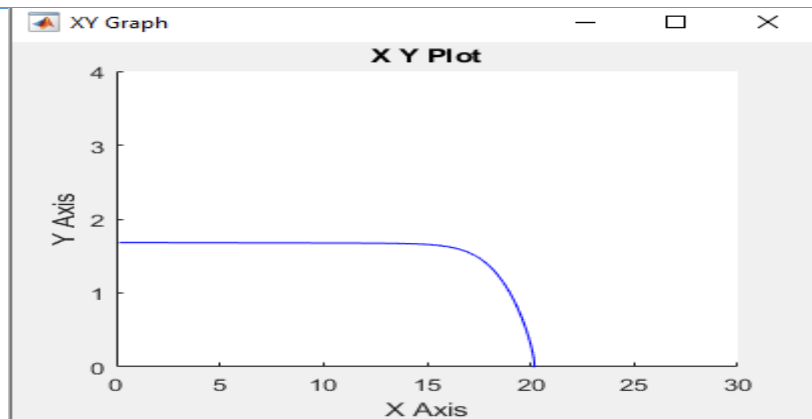


Figure 39 Circuit d'un convertisseur abaisseur (Buck)

a. **Circuit d'un convertisseur abaisseur (Buck) La caractéristique tension-courant :**

A température et à éclairement constants, et précisément aux conditions standards ($G=700\text{w/m}^2$, $T=42$) la caractéristique i-v est donnée par la figure 40 ci-dessous

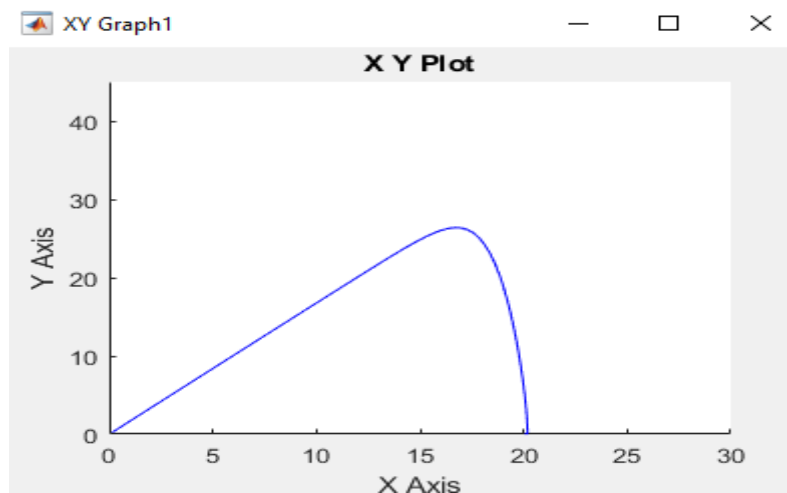
CHAPITER II : les Traceurs photovoltaïques



. Figure 40 Caractéristique i-v convertisseur abaisseur (Buck) sur Matlab.

- b. **La caractéristique tension-puissance :** A température et à éclairement constants, et particulièrement aux conditions standards ($G=700\text{w/m}^2$, $T=42$) la caractéristique p-v est donnée par la Figure 41

La caractéristique montre l'existence d'un point PPM où la puissance se trouve être maximale



. Figure 41 Caractéristique p-v convertisseur abaisseur (Buck) sur Matlab.

II.3.6.1.2. Convertisseur élévateur (Boost converter) :

Le convertisseur élévateur, représenté dans la Figure 42 Opère en amplifiant la tension, conformément à son appellation, ce qui se traduit par une tension de sortie dépassant celle d'entrée. [29]

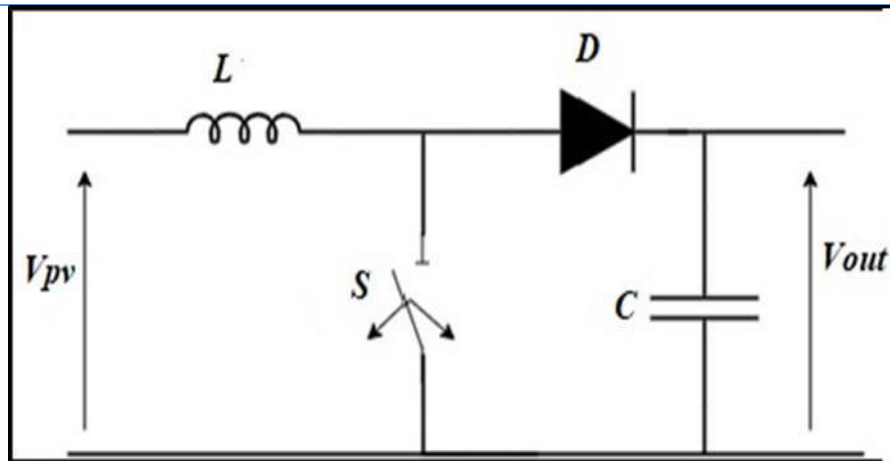


Figure 42 Circuit d'un convertisseur élévateur (Boost).

i. Simulation sur Matlab convertisseur élévateur (Boost).

Nous avons fait la simulation convertisseur élévateur (Boost) sous MATLAB/SIMULINK afin de voir le comportement de ces convertisseurs statiques. Le modèle de simulation du convertisseur BOOST est illustré par la Figure 43

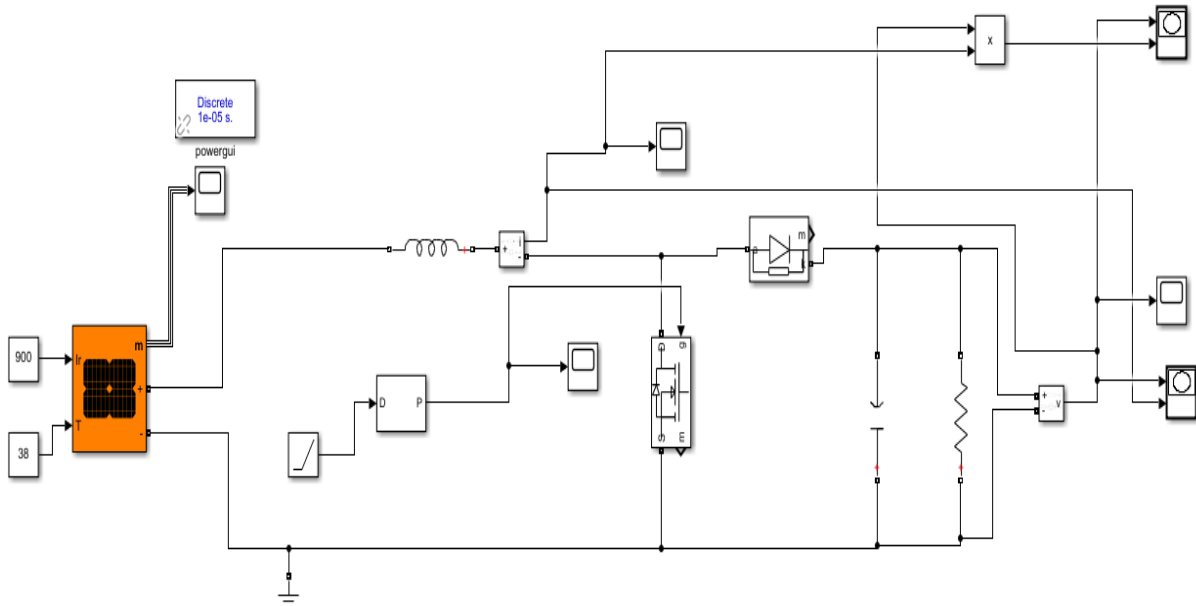


Figure 43 Convertisseur élévateur (Boost) sur Matlab.

a. La caractéristique tension-courant :

A température et à éclairement constants, et précisément aux conditions standards

($G=900\text{w/m}^2$, $T=38$) la caractéristique i-v est donnée par la Figure 44 ci-dessous

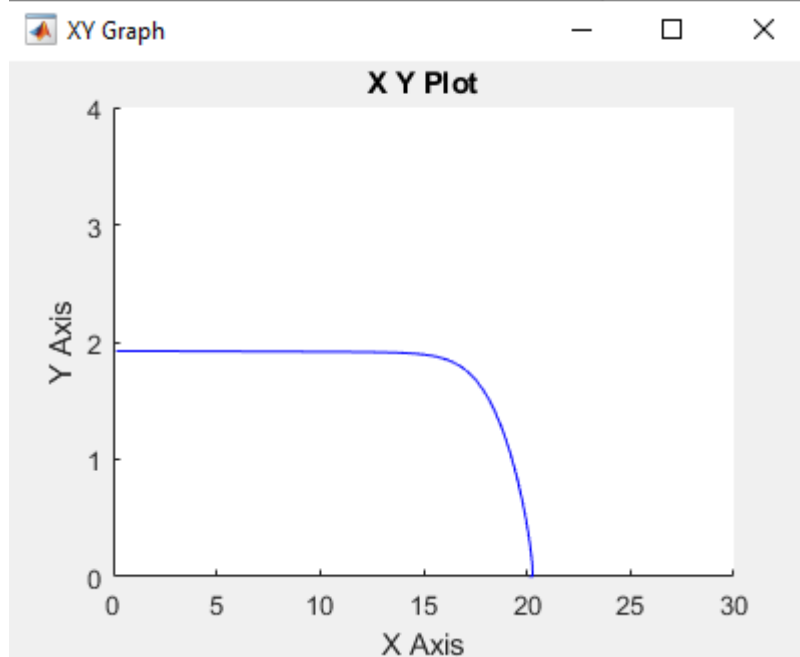


Figure 44 Caractéristique i-v convertisseur élévateur (Boost) sur Matlab.

b. La caractéristique tension-puissance :

A température et à éclairement constants, et particulièrement aux conditions standards

($G=900\text{w/m}^2$, $T=38$) la caractéristique p-v est donnée par la Figure 45

La caractéristique montre l'existence d'un point PPM où la puissance se trouve être

Maximale

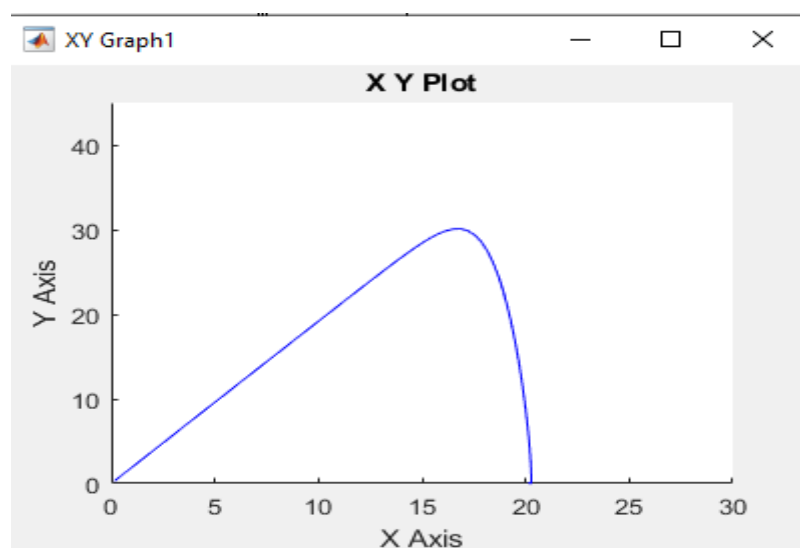


Figure 45 Caractéristique p-v convertisseur élévateur (Boost) sur Matlab.

2.3.f.1.2 Convertisseur abaisseur-élevateur (Buck-Boost converter) :

Ce convertisseur DC-DC à double fonction est capable d'élever ou de réduire la tension pour générer une sortie qui peut être soit supérieure, soit inférieure à la tension d'entrée. De plus, il peut produire des tensions négatives ou positives, ce qui le rend polyvalent pour une gamme étendue d'applications. [29]

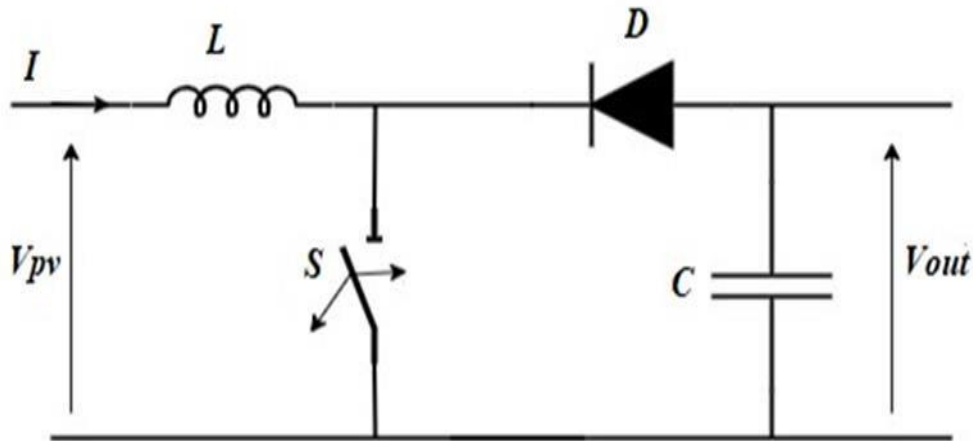


Figure 46 Circuit d'un convertisseur abaisseur-élevateur (Buck-Boost). [29]

a) Les avantages :

- Haute efficacité
- Peut gérer un grand courant de sortie

b) Les inconvénients :

- Conception compliquée avec ondulations dues à l'inducteur
- Facteur de coût

2.4 COMPARAISON ENTRE LES DIFFÉRENTES MÉTHODES :

Afin de souligner les propriétés différentes des méthodes présentées, une comparaison détaillée est accompli. La comparaison est effectuée avec les paramètres fondamentaux suivants pour des systèmes de mesure : Flexibilité, modularité, Fidélité, Réponse rapide, Affichage direct et le Coût.

Ce tableau présente la comparaison entre les méthodes ci-dessus :

CHAPITER II : les Traceurs photovoltaïques

Tableau 2 Caractéristiques des différentes méthodes.

La méthode	flexibilité	modularité	fidélité	Réponse rapide	Affichage direct	cout
charge électronique	Elevée	élevée	moyenne	moyenne	oui	élevée
Amplificateur de Puissance Bipolaire	élevée	élevée	élevée	moyenne	oui	élevée
Amplificateur de puissance à quatre quadrants	faible	faible	élevée	élevée	oui	élevée
Résistance variable	moyenne	moyenne	moyenne	faible	non	faible
charge capacitive	faible	faible	moyenne	faible	non	élevée
Hacheurs	élevée	élevée	élevée	élevée	oui	faible

2.5 CONCLUSION :

Dans ce chapitre, nous avons examiné le suivi des caractéristiques photovoltaïques, suivi de la définition des caractéristiques I-V et P-V des générateurs photovoltaïques. Nous avons exploré plusieurs méthodes rapportées dans la littérature pour obtenir ces caractéristiques, notamment la méthode de la résistance variable, de l'hacheur et du condensateur. Une analyse approfondie de ces méthodes théoriques jettera les bases pour la partie pratique, abordée dans le prochain chapitre. Les conclusions et le tableau comparatif qui en résultent seront des outils précieux pour choisir la méthode la plus adaptée à un système photovoltaïque donné.

Chapitre 3 :

réalisation du

traceur

photovoltaïque

3.1 INTROUDITION :

Après avoir exploré les aspects théoriques dans le chapitre précédent (chapitre II), nous nous tournerons désormais vers la mise en pratique afin d'obtenir des résultats tangibles.

Dans ce chapitre, nous commencerons par aborder le traceur photovoltaïque équipé d'une résistance variable. Ensuite, nous étudierons le traceur intégrant un condensateur. Enfin, nous présenterons le traceur utilisant un convertisseur statique de type hacheur boost à base de MOSFET. Pour chaque partie, nous détaillerons le matériel utilisé, tant sur le plan matériel que logiciel, ainsi que les explications et les montages réalisés pour chacune des trois expériences. Enfin, nous analyserons les résultats obtenus.

3.2 DESCRIPTION DU BANC D'ESSAI EXPERIMENTAL :

Le système photovoltaïque (module PV) utilisé dans notre étude est positionné selon l'orientation optimale par rapport au soleil, comme illustré dans la Figure (III.1). Il présente une puissance de crête nominale (P_{max}) de 40 W, une tension de puissance maximale (V_{mp}) de 18,24 V et un courant de puissance maximum (I_{mp}) de 2,20 A.

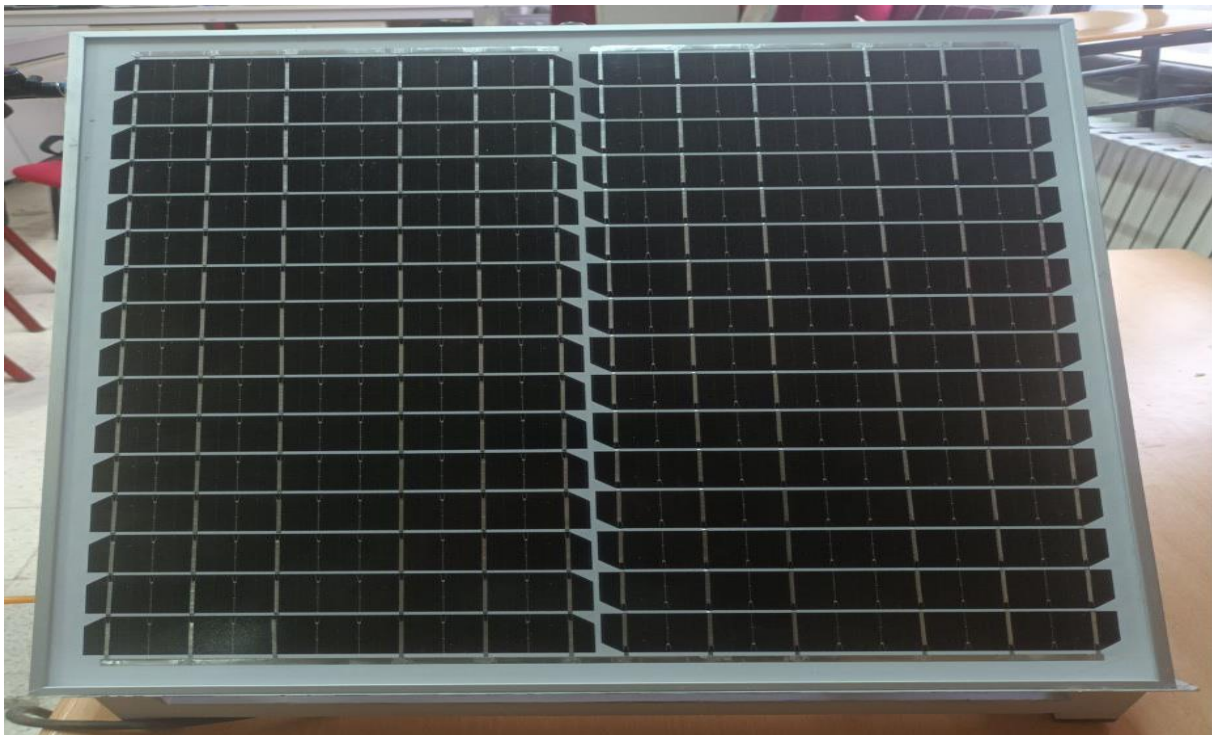


Figure 47 Panneau solaire utilisé dans les expériences.

CHAPITER III : réalisation du traceur photovoltaïque

.Tableau 3 de caractéristique de panneau Solaire

Paramètres électriques	Module solaire de type :Solar Pro
Puissance maximale (Pmax)	40W
Tension a Pmax (Vmp)	18.34V
Courant a Pmax (Imp)	2.20A
Tension en circuit ouvert (Voc)	21.8V
Courant en court-circuit (ICC)	2.35A

3.3 MATERIEL UTILISE DANS TOUTES LES MANIPULATIONS :

- La carte principale de commande : arduino uno
- La carte d'acquisition,
- Alimentation +12V, DC .
- Câblage.
- Un PC portable.
- Un panneau solaire de type Solar Pro de puissance 40 watts.
- Une résistance variable de puissance de 0 à 95 ohms.
- Deux condensateur en parallèle 5600 uf avec une pile de 12volt.
- Amplificateur de tension Des blocs de résistance, d'inductances et de condensateurs.
- Capture de tension et de courant (max471).

3.4 LE PROGRAMME UTILISE :

Dans la partie logicielle, nous fournissons le code arduino et tout le logiciel nécessaire

(PLX-DAQ Excel Macro et Arduino IDE) pour une conception de système de machine virtuelle en temps réel et un guide pour y arriver.

CHAPTER III : réalisation du traceur photovoltaïque

```
ReadAnalogVoltage
void setup()
{
  //initialize serial communication at 9600 bits per second:
  Serial.begin(9600);

  Serial.println("LABEL, Time, Started Time, Date,voltage,current,power");
  Serial.println("RESETTIMER");
}

void loop()
{
  int sensorVotag = analogRead(A0);
  int sensorCurrent = analogRead(A1);

  float voltage = sensorVotag * (26.1 / 1023.00);
  float current = sensorCurrent* (5.2/ 1023.00);
  float power=voltage*current;
  Serial.print("DATA,TIME,TIMER,DATE");
  Serial.print(",");
  Serial.print(voltage);
  Serial.print(",");
  Serial.print(current);
  Serial.print(",");
  Serial.println(power);
  delay(200);
}
```

Figure 48 Programme arduino utilise dans ce modèle.

3.5 TRACEUR PAR RESISTANCE VARIABLE :

Le traceur par résistance variable est l'outil le plus simple à réaliser pour mesurer la courbe I-V et P-V d'un générateur photovoltaïque.

Lieu : laboratoire d'asservissement

Date de l'expérience : le 15 /05/2024

Programme utilise : Programme IDE sous arduino uno de version 1.8.19

Nous utilisons le programme IDE et la carte arduino uno principalement comme une carte d'acquisition de capturer de courant et la tension, Figure 48

Schéma de principe du traceur á bas résistance variable : Le schéma ci-dessous montre comment l'expérience est connectée à une résistance variable

CHAPITER III : réalisation du traceur photovoltaïque

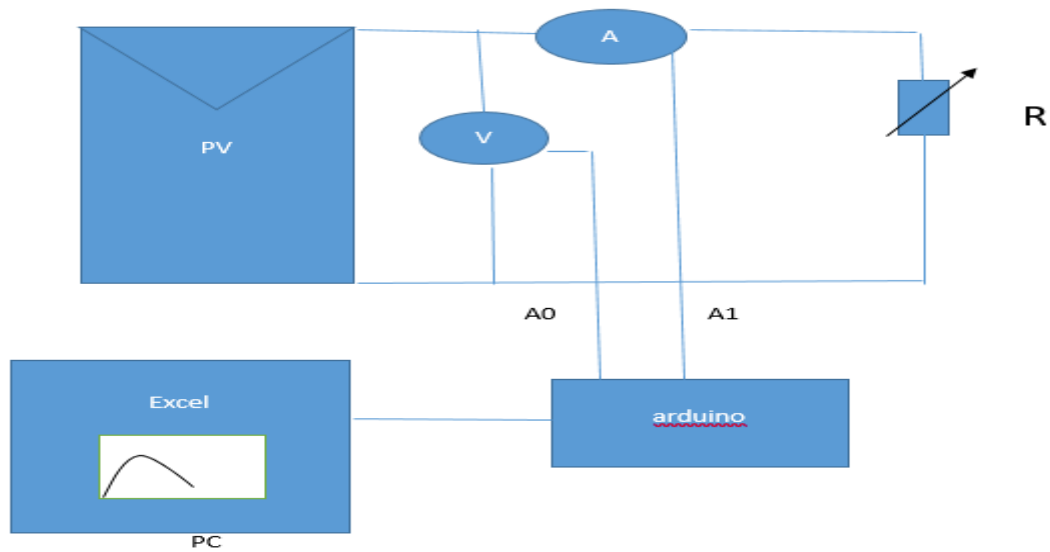


Figure 49 Schéma de principe du traceur à bas résistance variable

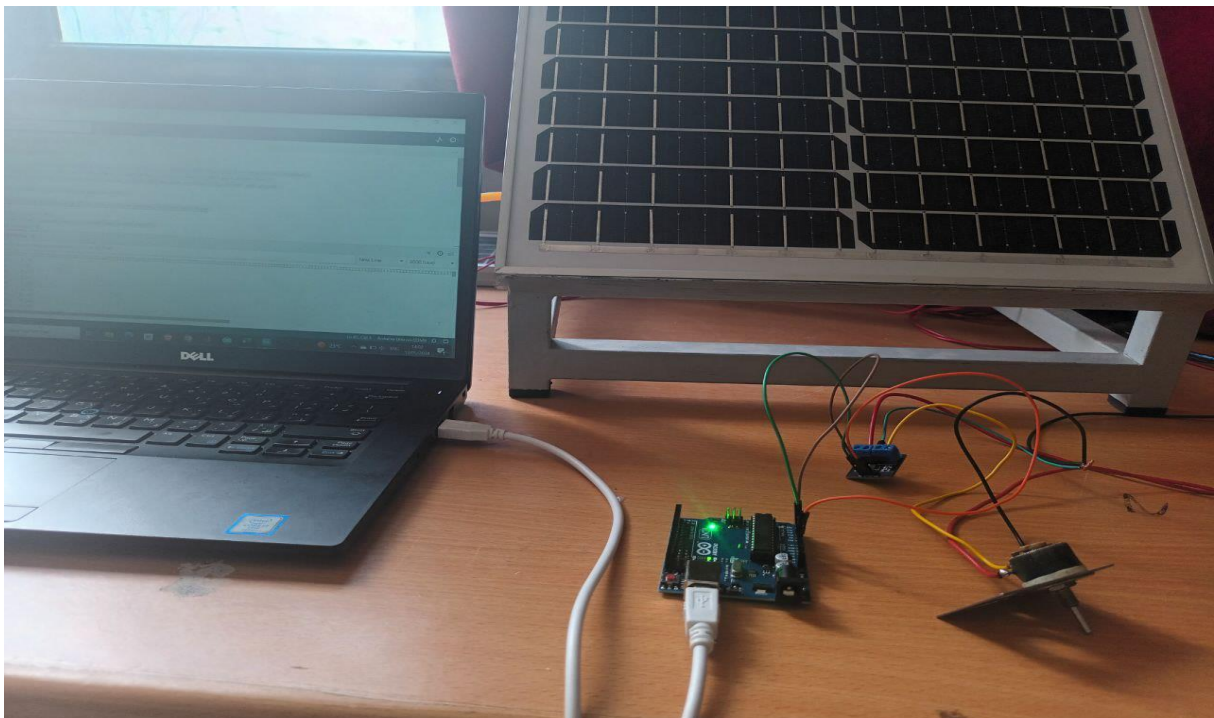


Figure 50 Traceur à base d'une résistance variable.

3.5.a Explication de l'expérience :

Pour réaliser le montage illustré à la Figure 50 Nous lançons la simulation du programme principal sous arduino uno . Après un certain temps d'exécution, la carte va clignoter, indiquant le début de la mesure. Simultanément, il est nécessaire de faire varier la résistance manuellement. La valeur de R sera ajustée progressivement de 0 à 95 ohms afin de capturer les

points de la courbe I-V et P-V allant du court-circuit au circuit ouvert. À chaque étape, la tension et le courant seront mesurés.

3.5.b Résultats obtenus le 15/05/2024 :

Les courbes ont obtenus en envoyant ces valeurs de tension et de courant au programme Excel PLX-DAQ pour tracer les courbes enregistrées sur l'ordinateur. En conséquence, L'effet des propriétés V-I et P-V a été visualisé sous l'influence d'une température de 34°C et d'une valeur d'éclairement de 950 w/m²

Comme le montrent les figures 51 et 52 suivantes :

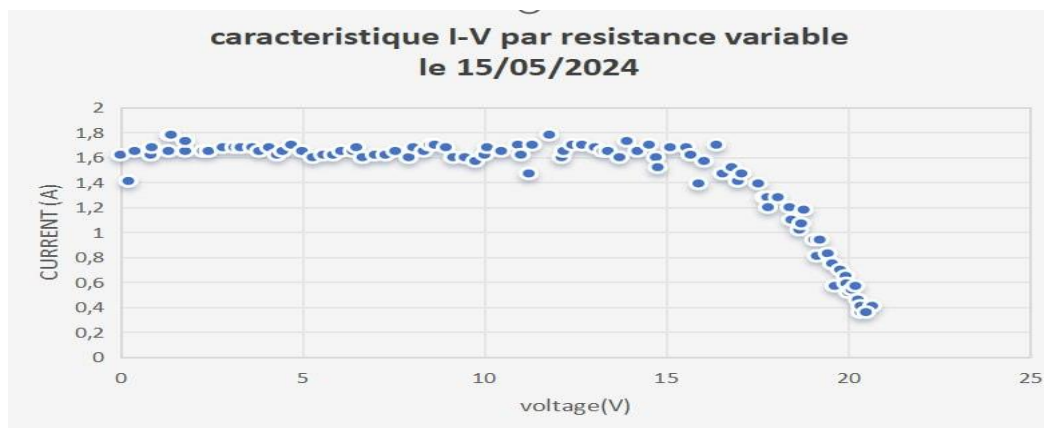


Figure 51 Mesure de caractéristique I-V par résistance variable.

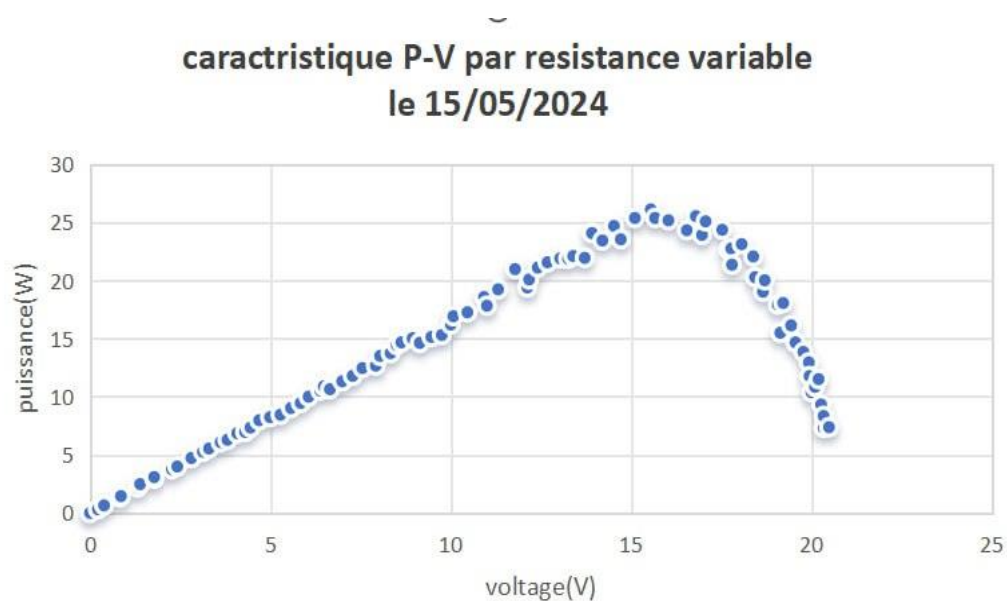


Figure 52 Mesure de caractéristique P-V par résistance variable.

3.5.c Discussion des résultats :

Les figures et les résultats obtenus dans cette réalisation sont considérés comme très acceptables. En les visualisant et en les comparant à l'étude théorique, nous constatons que la tension du circuit ouvert n'est pas atteinte en raison de la petite valeur de la résistance utilisée (0 à 95 ohms) qui ne peut pas forcer le courant à atteindre 0 A. De plus, la grande vitesse (fréquence) de la carte Arduino et la variation manuelle de la résistance variable entraînent une mauvaise mesure.

3.5.d Comparaison entre pratique et simulation :

Une comparaison entre les résultats de traceur en simulation et les résultats pratiques de charge résistive est indiqué sur la Figure 53 suivante.

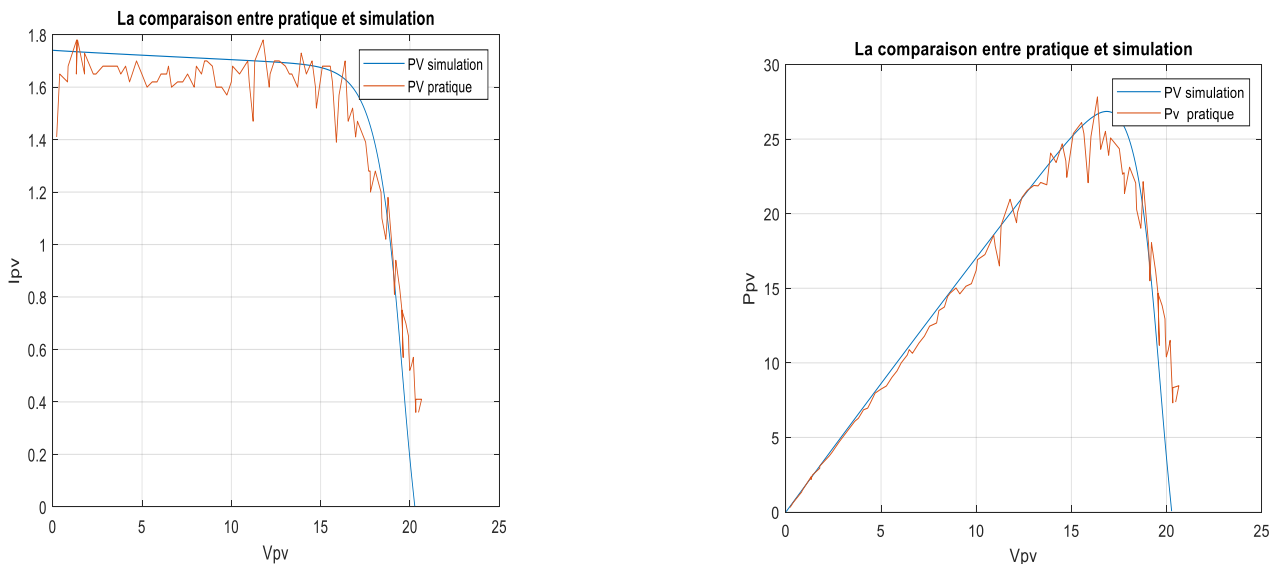


Figure 53 La comparaison entre pratique et simulation

La divergence constatée entre les résultats expérimentaux et ceux issus de la simulation s'explique par plusieurs facteurs. En pratique, la tension de circuit ouvert n'est pas toujours atteinte en raison de la faible valeur de la résistance (entre 0 et 100 ohms), ce qui limite la force du courant à atteindre 0 A. De plus, la manipulation manuelle de la résistance variable entraîne des fluctuations dans les mesures, ce qui peut altérer la précision des résultats en introduisant des ondulations. En revanche, dans le cadre de la simulation, la variation de la résistance variable est gérée automatiquement, ce qui produit une courbe plus régulière et lisse, sans les perturbations observées lors de la manipulation manuelle.

3.6 TRACEUR A BASE D'UN CONDENSATEUR :

Le traceur à base d'un condensateur est une méthode performante utilisée pour tracer et visualiser les courbe I-V et P-V en utilisant la technique de charge et décharge du condensateur.

Le montage réalisé de ce traceur est donné par la Figure 54 suivante :

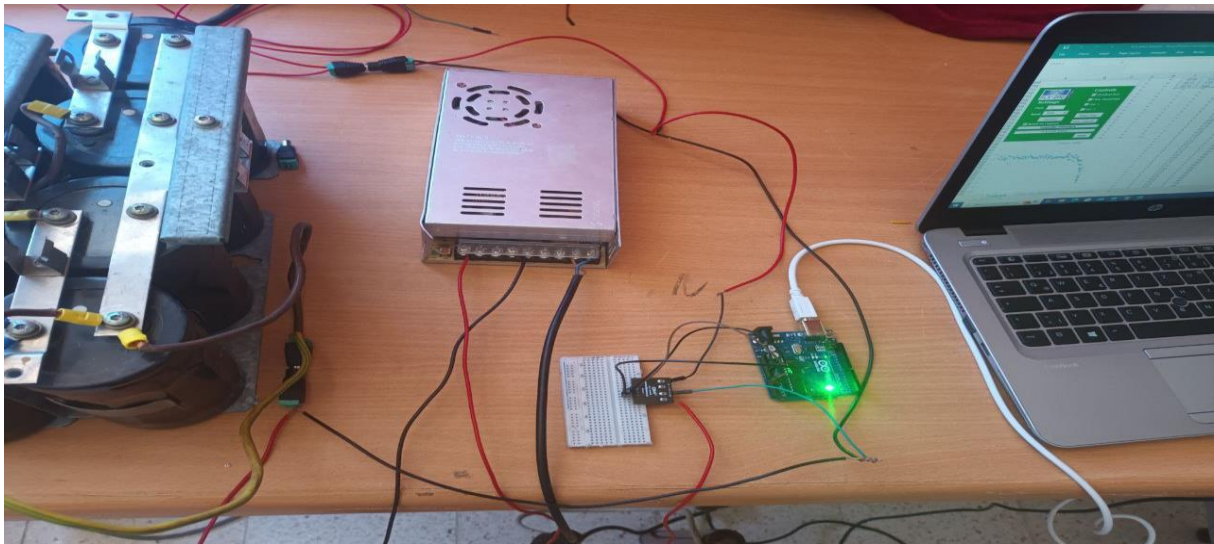


Figure 54 Traceur à base d'un condensateur.

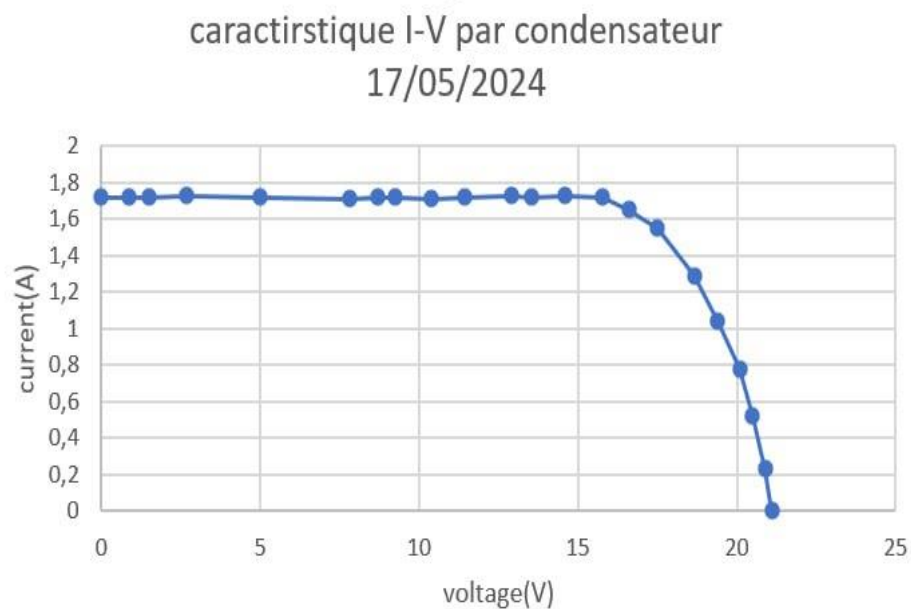


Figure 55 Mesure de caractéristique I-V par condensateur.

En comparaison avec le premier traceur, nous introduisons principalement un condensateur en remplacement de la charge résistive variable.

Schéma de principe du traceur á bas condensateur : Le schéma ci-dessous montre comment l'expérience est connectée à une condensateur

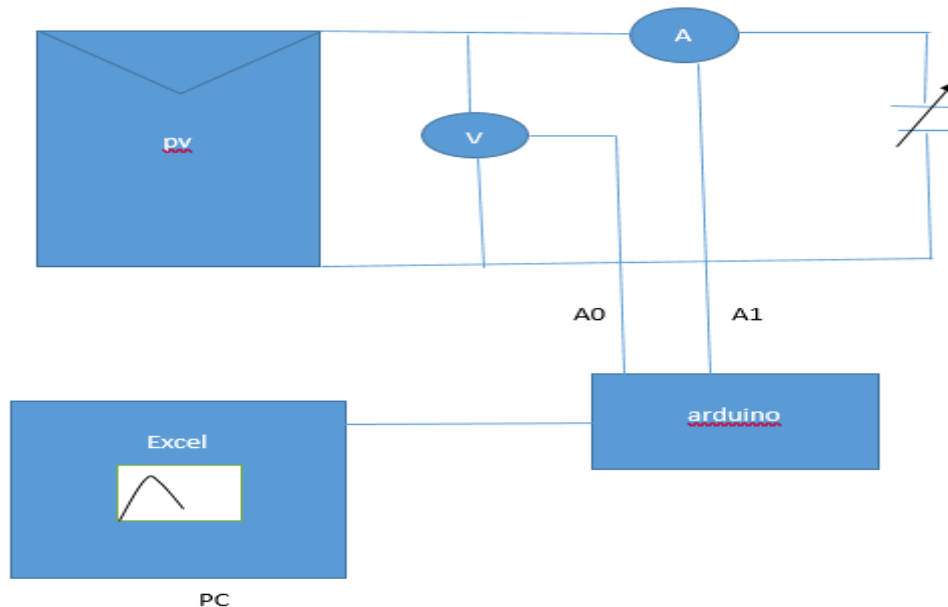


Figure 56 Schéma de principe du traceur á bas condensateur.

3.6.a Explication de l'expérience :

Pour que le traceur á base d'un condensateur donne des bons résultats il faut suivre les étapes suivantes :

Dans la première étape, Il faut choisir un condensateur assez grand pour que la courbe soit lisse.

Dans la deuxième étape, nous chargeons le condensateur avec une tension négative directe, d'une valeur de -5 volts. Cette charge initiale du condensateur entraîne une augmentation de sa tension et une diminution du courant. Au début de la mesure, le courant fourni par le traceur devient nul, et la tension de circuit ouvert V_{oc} est atteinte, permettant ainsi l'obtention de la courbe I-V.

3.6.b Résultats obtenus le 17/05/2024 :

Les courbes ont été générées en envoyant les valeurs de tension et de courant au programme Excel PLX-DAQ, qui les a tracées et enregistrées sur l'ordinateur. En conséquence, nous avons pu visualiser l'impact des propriétés V-I et P-V sous l'influence d'une température de $34,5^{\circ}\text{C}$ et d'une valeur d'éclairement de 850 W/m^2 , comme illustré dans les figures suivantes :

CHAPTER III : réalisation du traceur photovoltaïque

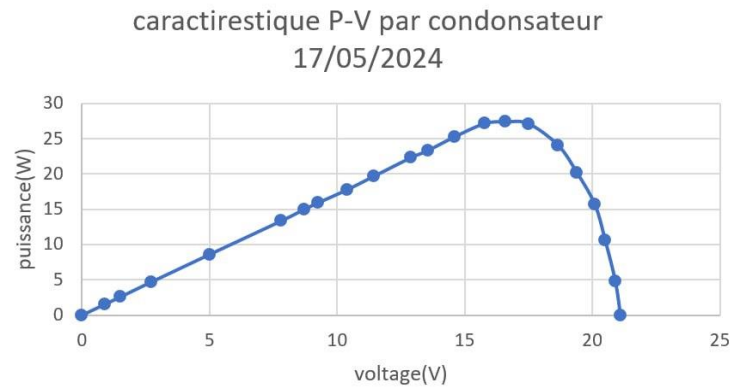


Figure 57 Mesure de caractéristique P-V par condensateur.

3.6.c Discussion des résultats :

L'analyse des courbes obtenues précédemment révèle que ce type de traceur présente une capacité notable à atteindre le point de circuit ouvert, voire même à démarrer à partir du point de court-circuit en utilisant initialement une batterie pour la charge négative. Ces résultats démontrent la capacité impressionnante du traceur à générer des courbes lisses et performantes.

3.6.d Comparaison entre les résultats pratiques et de simulations :

Une comparaison entre les résultats de simulation et les résultats pratiques de charge capacitive est indiqué sur la Figure 58

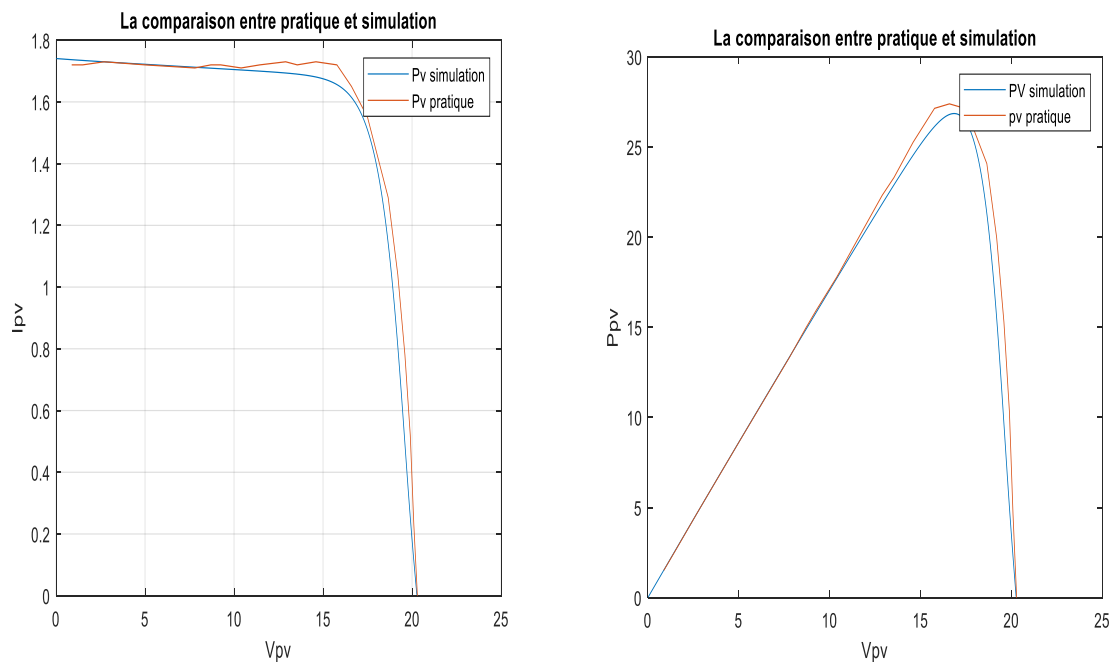


Figure 58 La comparaison entre pratique et simulation.

D'après les courbes précédentes, il est observé que ce type de suivi de courbe démontre à la fois en théorie et en pratique la capacité d'atteindre le point de circuit ouvert, voire même de démarrer à partir du point de court-circuit, avec une qualité de traçage remarquable, caractérisée par les courbes lisses.

3.7 TRACEUR A BASE D'UN HACHEUR (BOOST) :

Dans ce type de traceur, nous avons utilisé un hacheur boost, tel qu'illustré à la Figure 59 qui repose sur l'utilisation d'un MOSFET. L'idée principale derrière ce type de traceur est de considérer le hacheur comme une charge à part entière. La méthode de traçage utilisant un hacheur repose sur la modulation du rapport cyclique, variant de 0 à 100 %.

Le signal PWM est généré par la carte Arduino uno par défaut est d'une amplitude de 5V et un fréquence $\approx 500\text{Hz}$ selon un programme spécifique, sachant que le MOSFET doit être commandé par un signal supérieur à 10V.

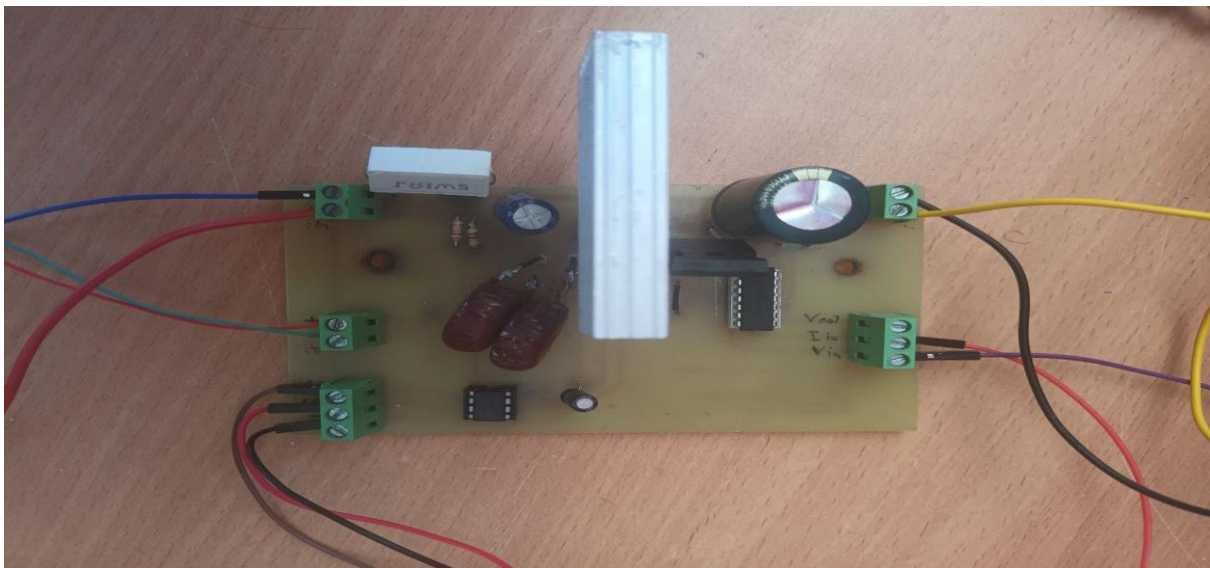


Figure 59 Montage d'hacheur (boost).

Le programme utilisé, présenté ci-dessous, est intégré dans le programme principal. Son objectif est de faire varier le rapport cyclique du hacheur à MOSFET de 0 à 255. Il est important de noter que la valeur 0 représente 0 % et la valeur 255 représente 100 %. Ensuite, les résultats sont envoyés au logiciel Matlab 2021 pour afficher les graphes de I-V et P-V.

CHAPTER III : réalisation du traceur photovoltaïque

```
ReadAnalogVoltage | Arduino 1.8.19
Fichier Édition Croquis Outils Aide

ReadAnalogVoltage $

int pwmPin = 6;
int pwmValue = 2;
const int analogPinV = A0;
const int analogPinI = A1;
int analogValueV = 0;
int analogValueI = 0;
float voltage = 0.0;
float current = 0.0;
float power = 0.0;
int i=1;
void setup()
{Serial.println("LABEL,Time,Started Time,Data,voltage,current,power");
  Serial.println("RESTTIMER");
  //pinMode(pwmPin, OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
  TCCR0B = TCCR0B & B11111000 | B00000001; }
void loop()
while (i){for (pwmValue = 0; pwmValue <= 100; pwmValue += 2)
{analogWrite(pwmPin, map(pwmValue, 0, 100, 0, 255));
  analogValueV = analogRead(analogPinV);
  voltage = analogValueV*(25.25) / 1023.0;
  analogValueI = analogRead(analogPinI);
  current = analogValueI * 5.5/ 1023.0 ;
  power = voltage * current;
  Serial.print("DATA,TIME,TIMER,DATE");
  Serial.print(",");
  Serial.print(current, 2);
  Serial.print(",");
  Serial.print(voltage, 2);
  Serial.print(",");
  Serial.println(power, 2);
  delay(10000);}
i=i+1;
}
i=0;
}
```

Figure 60 Programme sous arduino concerne le traceur hacheur (boost).

3.7.a Schéma de principe du traceur à bas hacheur (boost) :

Le schéma ci-dessous montre comment l'expérience est connectée à une hacheur (boost)

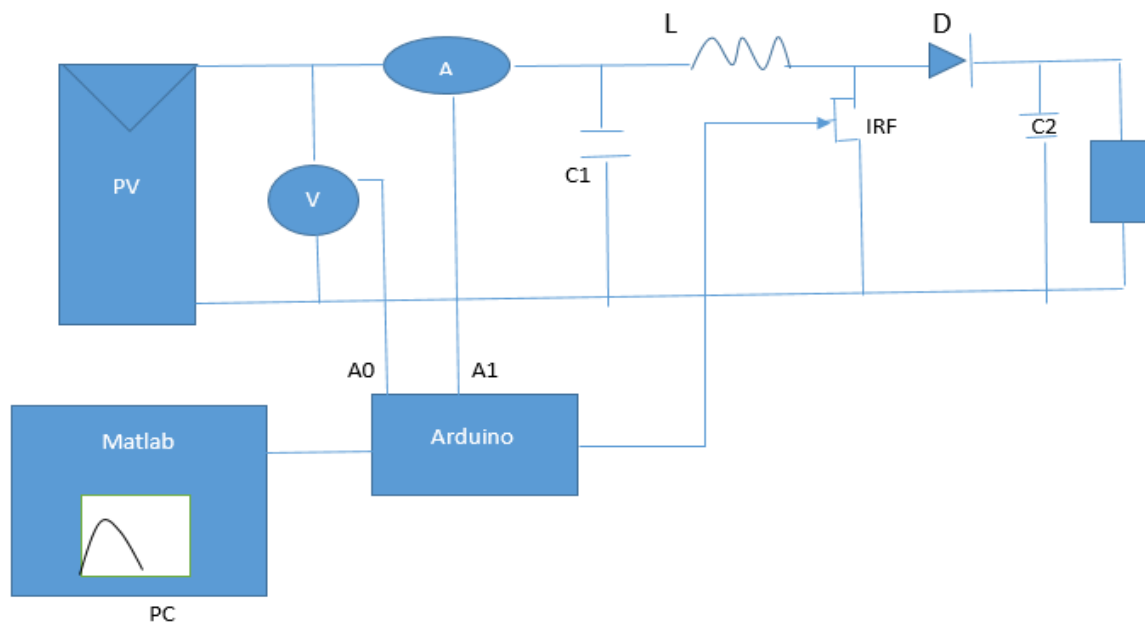
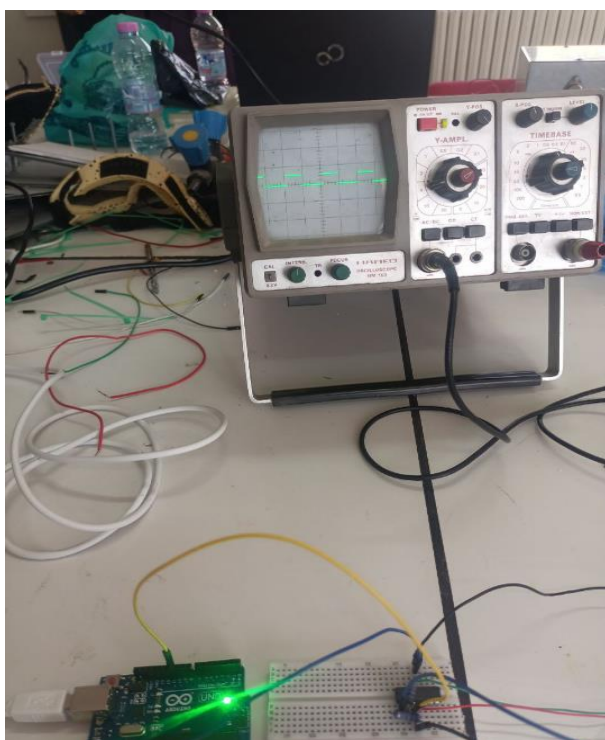


Figure 61 Schéma de principe du traceur à bas hacheur (boost)

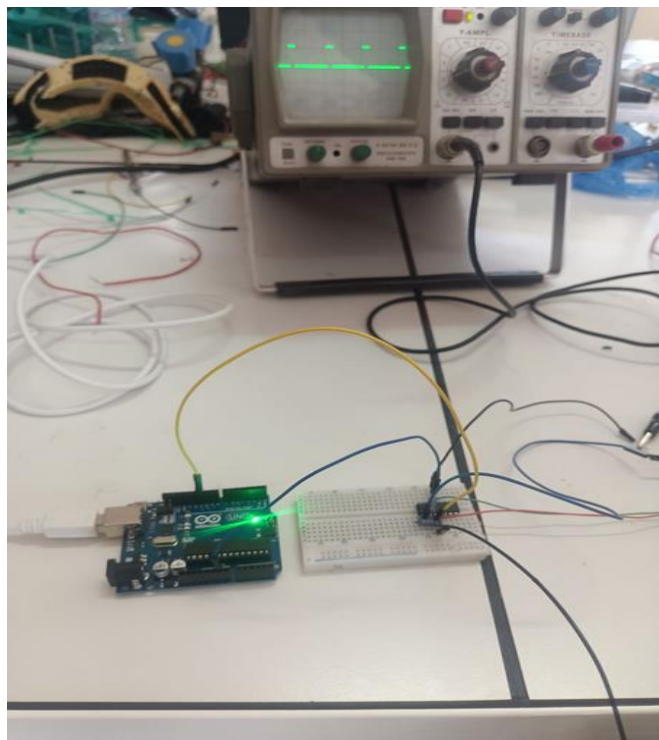
3.7.b Premier Test du traceur à base d'un hacheur boost :

Pour commander le gate du MOSFET avec une tension de 10V, il est nécessaire de créer un étage d'amplification à l'aide d'amplificateurs opérationnels. Ceux-ci permettront de multiplier par 2 le signal de sortie de la carte, qui est initialement de 0 à 5V (PWM). Ainsi, en utilisant des amplificateurs opérationnels de gain égal à 2, il sera possible d'obtenir la tension requise pour attaquer efficacement MOSFET.

La fréquence par défaut de la carte arduino est donnée par $F \approx 500\text{Hz}$.



Tension d'entrée (Ve)



tension de sortie (Vs)

Figure 62 Montage d'amplificateur de tension.

Une fois le programme lancé, le rapport cyclique oscille entre 0 V et 9,9 V, ce qui correspond à une plage de 0 à 100 %. La mesure débute en réduisant la tension et en augmentant simultanément le courant de manière proportionnelle jusqu'à ce que le point de court-circuit soit atteint, c'est-à-dire lorsque la tension est nulle et le courant est maximal.

Dans ce test, nous avons observé une augmentation significative de la température du MOSFET dès le lancement du programme. Ce problème est dû soit à une inductance de faible valeur, soit à une fréquence de faible valeur. Pour remédier à ce problème, nous avons choisi d'augmenter

la valeur de la fréquence de la carte Arduino à $F=63$ kHz, ce qui constitue l'objectif du deuxième test.

3.7.c Premier Test du traceur à base d'un hacheur boost:

Pour commander le hacheur boost sans rencontrer le problème de surchauffe du MOSFET, nous avons augmenté la fréquence de la carte Arduino Uno à sa valeur maximale supportée, soit $F=63$ kHz. Pour cela, il a été nécessaire d'ajouter un driver MOSFET IR2104 pour piloter la grille du MOSFET.

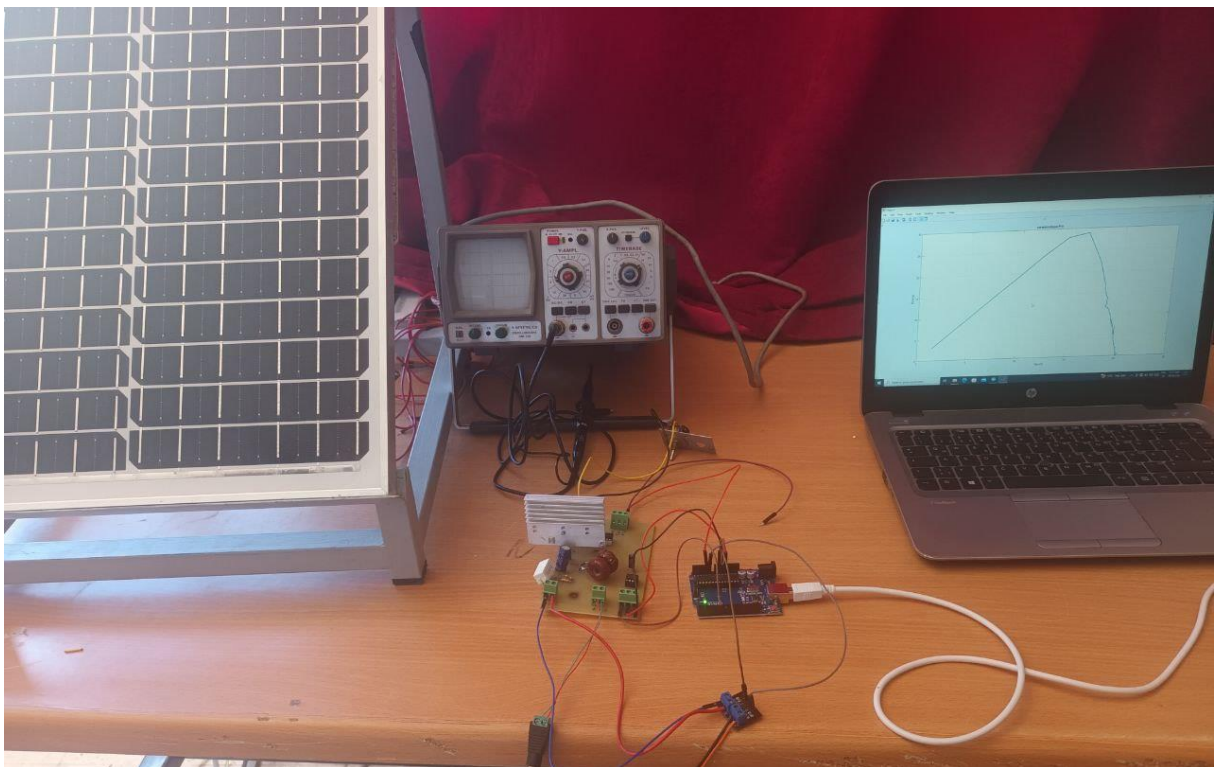


Figure 63 Montage de Traceur à base d'hacheur (boost).

3.7.d Dimensionnement des composants :

Pour dimensionner les composants d'un convertisseur, il faut connaître la puissance d'entrée et la puissance de sortie souhaitée, le courant d'entrée et le courant de sortie, ainsi que la tension d'entrée.

3.7.d.1 Calcul de l'inductance :

Le calcul de l'inductance débute par le calcul du courant d'entrée maximal.

$$L = \frac{E1 \times \alpha}{L \times \Delta I} \quad (\text{III.1})$$

3.7.d.2 Calcul de la capacité :

La capacité est calculée par la relation suivante :

$$C = \frac{I_s \times \alpha \times T}{\Delta V_s} = \frac{\alpha \times I_s}{f \times \Delta V_s} \quad (\text{III.2})$$

3.7.d.3 Choix du MOSFET :

Le transistor choisi doit pouvoir supporter à ses bornes la tension qui va lui être imposée, et doit également fonctionner à la fréquence désirée. Une des raisons d'avoir choisi un MOSFET est sa fréquence de fonctionnement qui dépasse les 100 kHz Généralement on utilise :

- Les MOSFET pour les faibles puissances ;
- L'IGBT ou transistors pour les moyennes puissances et
- Le GTO pour les fortes puissances.

3.7.e Test pratique de fonctionnement d'un d'hacheur boost changeant la valeur PWM :

Nous avons testé le fonctionnement du en d'hacheur boost mesurant le PWM et l'intensité de la tension et le courant du PV à l'aide d'un multimètre.

Tableau 4 Récapitulatif des résultats obtenus.

Pwm (0 à 255)	V _{in}	I _{in}
0	19.5	0
15	19.47	0.008
30	19.45	0.019
60	19.47	0.066
90	19.34	0.136
110	19.30	0.200
130	19.21	0.273
150	19.04	0.350
170	18.77	0.444
190	18.63	0.534
210	18.46	0.644
230	16.46	1.400
245	10.25	1.670
250	4.20	1.700
255	0.05	1.720

3.7.e.1 Résultats de traçage manuel des caractéristiques P-V et V-I :

Nous avons converti ces résultats en graphique sur le programme Excel sous l'influence d'une température de 38.5°C et d'une valeur d'éclairement de 900 w/m².

CHAPITER III : réalisation du traceur photovoltaïque

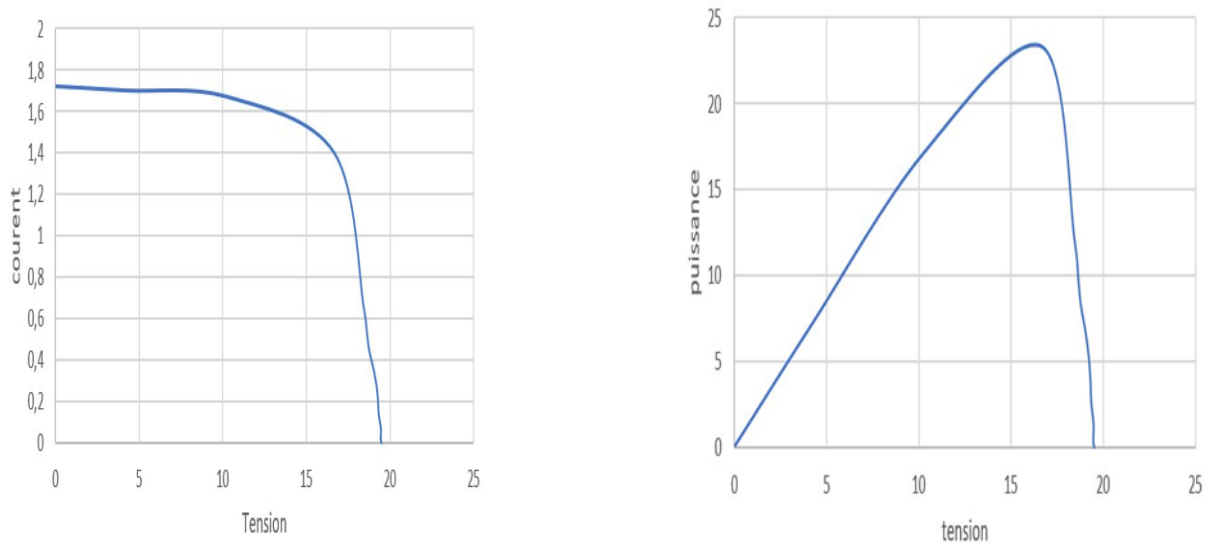


Figure 64 Caractéristiques I-V et P-V mesures par Multimètre.

3.7.e.2 Résultats Automatisément Acquis par un Programme Arduino le 29/05/2024 :

Cette partie à une importance cruciale dans le mémoire, car elle représente le cœur de notre étude et des expérimentations menées. La capacité à lancer et à mesurer automatiquement les paramètres du PV, suivie de traçage des courbes P-V et I-V, est un élément essentiel pour évaluer les performances et la fiabilité des systèmes photovoltaïques.

Les courbes ont été obtenues en envoyant les valeurs de tension et de courant au programme Matlab, lequel a permis de tracer les courbes enregistrées sur l'ordinateur. En conséquence, l'effet des propriétés V-I et P-V a été visualisé sous l'influence d'une température de 38,5°C et d'une valeur d'éclairement de 900 W/m², comme le démontrent les figures suivantes :

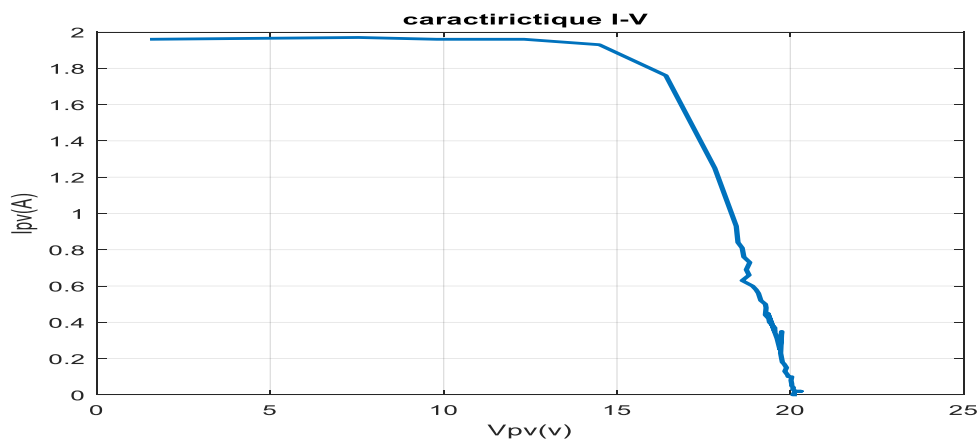


Figure 65 Mesure de caractéristique I-V par hacheur (boost).

CHAPITER III : réalisation du traceur photovoltaïque

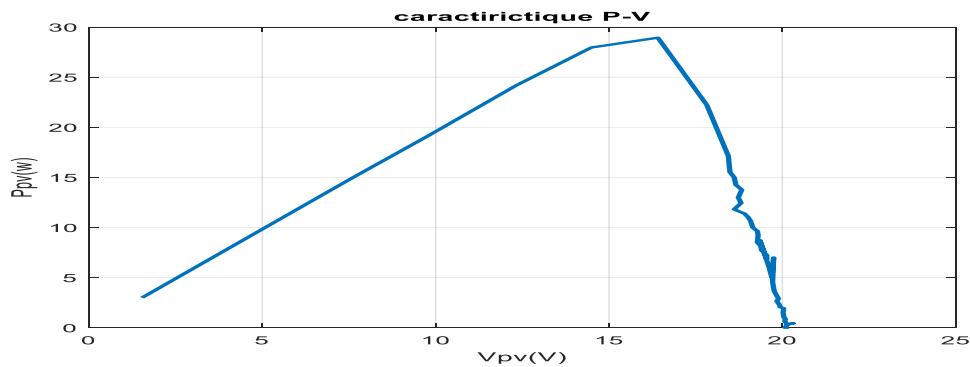


Figure 66 Mesure de caractéristique P-V par hacheur (boost).

3.7.f Discussion des résultats :

Les résultats obtenus sont très satisfaisants, avec des courbes caractéristiques I-V et P-V apparaissant de manière complète et de haute qualité, lisse sans ondulations. Plusieurs facteurs contribuent à cette réussite :

- Un dimensionnement optimal des paramètres du convertisseur boost.
- Une fréquence d'attaque relativement adéquate, fixée à $f = 63$ kHz.
- Une variation du rapport cyclique entre 2 % et 98 %.

3.7.g Comparaison entre les résultats pratiques et simulations :

La comparaison entre les résultats de simulation et les résultats pratiques de traceur à base d'un hacheur boost est donnée par la Figure 67 Suivante :

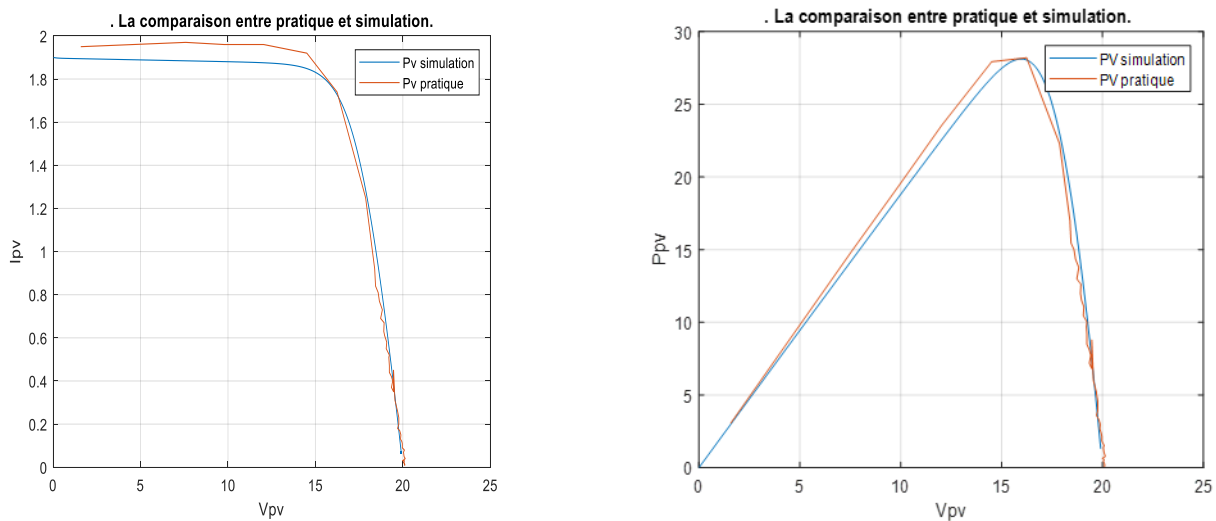


Figure 67 La comparaison entre pratique et simulation

En comparant les résultats pratiques avec ceux de la simulation, nous notons une légère différence. Cependant, dans l'ensemble, ces résultats restent très satisfaisants.

En pratique, il n'est pas toujours possible d'atteindre une valeur de 100 % en modifiant le rapport cyclique, même en augmentant la fréquence de la carte Arduino. Cette disparité peut être attribuée à divers facteurs, tels que les limitations matérielles, les pertes d'énergie, les fluctuations de tension, ou d'autres contraintes propres au système réel. Il est donc essentiel de tenir compte de ces écarts minimes lors de la conception et de l'optimisation de circuits ou de systèmes PV

3.8 COMPARAISON ENTRE LES TROIS TRACEURS :

Dans notre projet, nous avons étudié en pratique trois méthodes de traceurs : la méthode de charge résistive, la charge par condensateur, et le traceur à base d'hacheur.

3.8.a Résistance variable :

La méthode à résistance variable est l'une des plus simples pour suivre les caractéristiques I-V et P-V. Les dispositifs utilisés sont peu coûteux. Cependant, cette méthode présente quelques inconvénients : elle ne permet pas un suivi précis des caractéristiques I-V et P-V, et son contrôle est limité en raison d'un temps de réponse faible.

3.8.b Condensateur :

La méthode utilisant un condensateur est reconnue comme étant l'une des plus efficaces pour suivre les caractéristiques I-V et P-V avec précision. Cependant, elle présente quelques inconvénients à considérer. Les appareils nécessaires peuvent être coûteux, et la taille du condensateur requis peut poser des défis en termes de conception et d'espace.

3.8.c Hacheur (boost) :

La méthode de l'hacheur boost est couramment utilisée pour tracer les courbes I-V et P-V. Elle offre des résultats satisfaisants et utilise des composants abordables et facilement disponibles. De plus, elle est utilisée pour le contrôle du MPPT, ce qui en fait l'une des meilleures approches pour suivre les caractéristiques V-I et P-V. Cependant, sa complexité de conception peut être un inconvénient.

Après avoir effectué une analyse comparative de ces trois méthodes, il est conclu que la méthode de l'hacheur boost est la plus favorable et présente le moins de limitations.

3.9 CONCLUSION :

Dans ce chapitre, nous avons examiné en détail trois méthodes de traceurs utilisées pour suivre les caractéristiques I-V et P-V des systèmes photovoltaïques : la résistance variable, le condensateur et l'hacheur boost. À travers des expériences pratiques et des analyses approfondies, nous avons évalué les avantages et les inconvénients de chaque méthode.

Les résultats obtenus ont montré que le traceur à base d'hacheur boost présente des performances remarquables en termes de suivi précis des caractéristiques I-V et P-V, ainsi que la possibilité pour le contrôle efficace du point de puissance maximale (MPPT). Cette méthode offre des résultats satisfaisants tout en utilisant des composants abordables et facilement disponibles sur le marché.

CONCLUSION

GENERALE

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE :

Ce mémoire représente une étape importante dans la recherche et le développement des technologies solaires, en mettant en lumière les avancées récentes, les défis actuels et les perspectives futures dans le domaine des systèmes photovoltaïques. Nous avons examiné en détail les caractéristiques des cellules photovoltaïques, les facteurs influençant leur performance, ainsi que les différentes méthodes de traçage utilisées pour tracer les courbes caractéristiques P-V et I-V, notamment la résistance variable, le condensateur et l'hacheur boost.

Les résultats obtenus ont montré que le traceur à base d'hacheur boost présente des performances remarquables en termes de suivi précis des caractéristiques I-V et P-V, détermination de point maximale de la puissance, ainsi que leur capacité de l'utiliser pour le contrôle efficace du point de puissance maximale (MPPT). Ce type de traceur offre des résultats satisfaisants tout en utilisant des composants abordables et facilement disponibles sur le marché. En comparaison avec les autres méthodes étudiées, le traceur par hacheur boost se distingue par sa capacité à fournir des résultats fiables et précis, même dans des conditions variables. Sa polyvalence et sa réactivité en font un choix idéal pour l'optimisation des performances des systèmes photovoltaïques, offrant ainsi une solution efficace pour vérifier la production d'énergie solaire max.

En conclusion, ce mémoire offre une contribution significative à la compréhension et à l'amélioration des systèmes photovoltaïques en basant sur les traceur PV.

À la lumière des résultats obtenus et des traceurs réalisés dans ce mémoire, plusieurs perspectives intéressantes émergent pour la recherche future dans le domaine des systèmes photovoltaïques (PV) :

Optimisation de la conception des traceurs : Continuer à perfectionner la conception des traceurs, en mettant l'accent sur la réduction des coûts, la simplification des composants et l'amélioration de l'efficacité énergétique. Des recherches supplémentaires pourraient être menées pour développer des traceurs plus compacts, robustes et faciles à intégrer dans les systèmes PV existants.

CONCLUSION GENERALE

Intégration de l'intelligence artificielle (IA) : Investiguer les possibilités d'intégrer des techniques d'intelligence artificielle, telles que les réseaux de neurones et l'apprentissage automatique, pour améliorer les résultats des traceurs obtenus des systèmes photovoltaïques. L'IA pourrait permettre une gestion plus intelligente et adaptative des installations solaires, en tenant compte des variations environnementales et des conditions météorologiques changeantes.

Références

Références

- ### References

- [1] Estibals, Bruno. Contribution à l'amélioration des chaînes de conversion photovoltaïques par l'introduction d'architectures distribuées. Diss. Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2010.
- [2] 'Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau Choix et dimensionnement des étages de conversion' présentée et soutenue par Stéphane VIGHETTI l'université de grenoble le 24 septembre 2010
- [3] Helali, Kamelia. Modelisation d'une cellule photovoltaïque: etude comparative. Diss. Université Mouloud Mammeri, 2012.
- [4] Petibon Stéphane « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques ». Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2009.
- [5] Bun, Long. Détection et Localisation de Défauts pour un Système PV. Diss. Université de Grenoble, 2011.
- [6] ELAKERMI.H.A,"Le système d'alimentation électrique par panneaux solaire",Juillet 2019.
- [7] Henry Mathieu" Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques, cours",livre,5eme édition, Dunod, 2001.
- [8] Benahmed Benabdallah Nadia" Propriétés physiques des semi-conducteurs (Si monocristallin et Ge) et Simulation des cellules solaires à base de Si et SiGe" Mémoire de Magister, Université Abou bekr belkaid-Telemcen, 2006.
- [9] Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques' de l'université de toulouse Présentée par M. PETIBON Stéphane Le 20 Janvier 2009.
- [10] master's thesis presented by: BELHADJ MOHAMMED<<<modeling of an autonomous photovoltaic collection system >> University of Bechar 2007/2008.
- [11] Ghennam, Tarak. Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation. Diss. Ecole Centrale de Lille; École Militaire Polytechnique (Alger), 2011.

Références

- [12] Falk Antony, Christian Düşner Et Karlheinz Remmers, " Le photovoltaïque pour tous
Conception et réalisation d'installation ", livre édité par : INES), 2006.
- [13] Bun, Long. Détection et Localisation de Défauts pour un Système PV. Diss. Université de Grenoble, 2011.
- [14] Violaine Didier sous la direction de Bruno Gaiddon, Les Onduleurs pour Systèmes
Photovoltaïques Fonctionnement, Etat de l'Art et Etude des Performances - Août 2007.
- [15] Stoyanov, Ludmil. Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables. Diss. Université Pascal Paoli, 2011.
- [16] Alonso, Corinne. Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie. Diss. Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2003.
- [17] Mambrini, Thomas. Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies. Diss. Paris 11, 2014.
- [18] Kopp, Emily S. "IV Analysis of photovoltaic modules deployed outdoors at Tucson electric power solar test yard." Master of science thesis, The University of Arizona (2012).
- [19] Y. Kuai, S. Yuvarajan, "An electronic load for testing photovoltaic panels", Journal of Power Sources, 154, 2006, pp. 308-313.
- [20] N. Forero, J. Hernández, G. Gordillo, "Development of a monitoring system for a PV solar plant", Energy Conversion & Management, 47, 2006, pp. 2329-2336.
- [21] J. Salmon, R. Phelps et al., "Solar cell measurement system for NPS Spacecraft Architecture and Technology Demonstration Satellite NPSAT1", 17th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2003.
- [22] M.G. Gunvench, C. Gurcan et al., "Solar simulator and I-V measurement system for large area solar cell testing", Proceedings of the 2004 American Society for Engineering Education Annual Conference & Exposition, 2004.
- [23] F. Recart, H. Mäkel, et al., "Simple data acquisition of the current-voltage and illumination-voltage curves of solar cells ", IEEE WCPEC, 2006, pp. 1215-1218.
- [24] Riad, Khenfer. "Détection et isolation de défauts combinant des méthodes à base de données appliquées aux systèmes électro-énergétiques." UNIVERSITE FERHAT ABBES-SETIF 1 (2015).
- [25] Malik, A. Q., & Damit, S. J. B. H. (2003). Outdoor testing of single crystal silicon solar cells. Renewable energy, 28(9), 1433-1445.
- [26] J. Muñoz, E. Lorenzo, "Capacitive load based on IGBTs for on-site characterization of PV arrays ", Solar Energy, 80, 2006, pp. 1489-1497.

Références

- [27] E. Duran, J. M. Enrique, M. A. Bohorquez, M. Sidrach-de-Cardona, J. E. Carretero, and J. M. Andujar, "A new application of the coupled-inductors SEPIC converter to obtain I-V and P-V curves of photovoltaic modules," p. 10, Sep. 2010.
- [28] H. B. Chi¹, M. F. N. Tajuddin², N. H. Ghazali³, A. Azmi⁴, M. U. Maaz⁵ Internet of things (IoT) based i-v curve tracer for photovoltaic monitoring systems, Universiti Malaysia Perlis, Malaysia March 2019
- [29] Pastor, Angel Cid. Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques. Diss. INSA de Toulouse, 2006.
- [30] Bastos, Emerson Abreu, et al. "A curve tracer for photovoltaic modules based on the capacitive load method." 2019 IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC). IEEE, 2019.
- [31] Spertino, Filippo, et al. "Capacitor charging method for I–V curve tracer and MPPT in photovoltaic systems." Solar Energy 119 (2015): 461-473.

ANNEXE

ANNEXXE

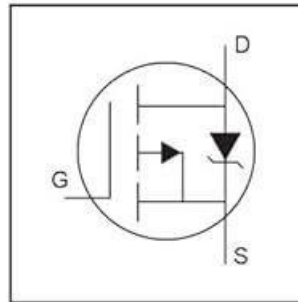
ANNEXXE 01 : Fiche technique de MOSFET IRF5210

PD - 95408

CHANZON

IRF5210PbF

- Advanced Process Technology
- Ultra Low On-Resistance
- Dynamic dv/dt Rating
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- P-Channel
- Fully Avalanche Rated
- Lead-Free



$$V_{DS} = -100V$$

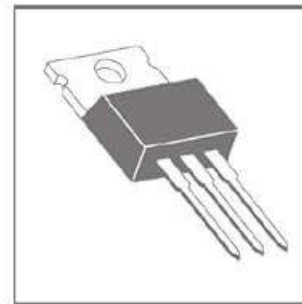
$$R_{DS(on)} = 0.06\Omega$$

$$I_D = -40A$$

Description

Fifth Generation HEXFETs from International Rectifier utilize advanced processing techniques to achieve extremely low on-resistance per silicon area. This benefit, combined with the fast switching speed and ruggedized device design that HEXFET Power MOSFETs are well known for, provides the designer with an extremely efficient and reliable device for use in a wide variety of applications.

The TO-220 package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 watts. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220 contribute to its wide acceptance throughout the industry.



TO-220AB

Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ -10V$	-40	A
$I_D @ T_C = 100^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ -10V$	-29	
I_{DM}	Pulsed Drain Current ①	-140	
$P_D @ T_C = 25^\circ C$	Power Dissipation	200	W
	Linear Derating Factor	1.3	W/°C
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 20	V
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy②	780	mJ
I_{AR}	Avalanche Current①	-21	A
E_{AR}	Repetitive Avalanche Energy①	20	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ③	-5.0	V/ns
T_J	Operating Junction and	-55 to + 175	°C
T_{STG}	Storage Temperature Range		
	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (1.6mm from case)	
	Mounting torque, 6-32 or M3 screw	10 lbf·in (1.1N·m)	

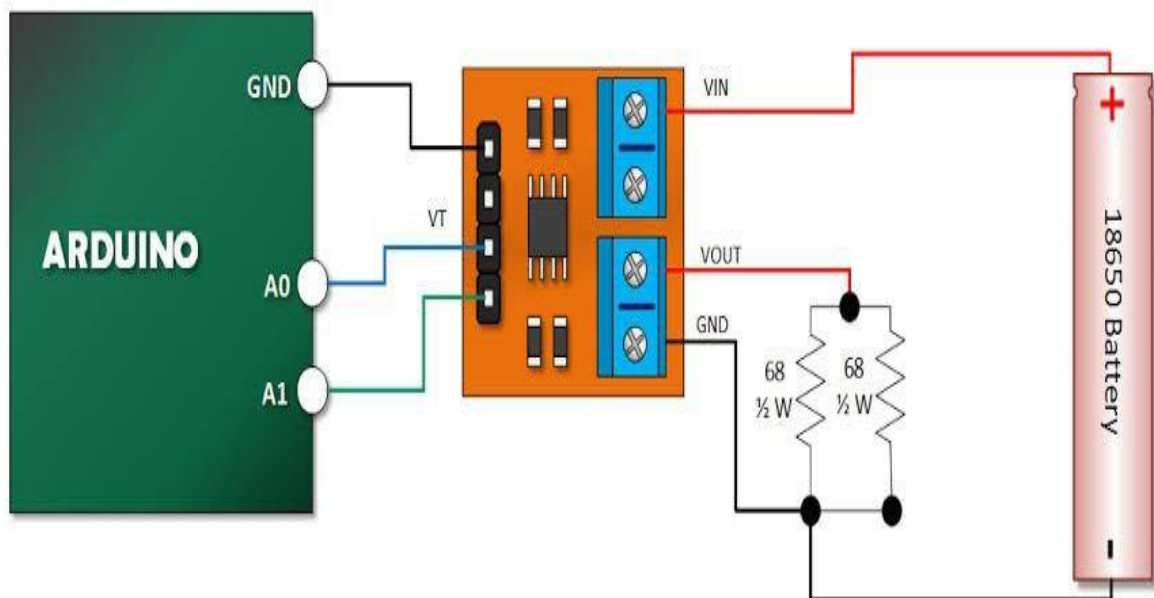
Thermal Resistance

	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	0.75	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	0.50	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	62	

ANNEXXE 02 : capteur tension et courant max 471

MAX471

Voltage & Current Sensor Module



ANNEXXE

ANNEXXE 03 : datasheet Arduino Uno

Technical Specification



EAGLE files: [arduino-duemilanove-uno-design.zip](#) Schematic: [arduino-uno-schematic.pdf](#)

Summary

Microcontroller	ATmega328
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB of which 0.5 KB used by bootloader
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Clock Speed	16 MHz

the board

