

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE
N° :



DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE
FILIERE : ELECTRONIQUE
OPTION : ELECTRONIQUE DES SYSTEMES
EMBARQUES

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique**

**Par : NADIR CHEYMA
LAKHNACHE CHAHRA-ZAD**

Intitulé

**Conception d'un caractériser autonome pour
panneau photovoltaïque**

Soutenu devant le jury composé de :

	Université de M'Sila	Président
Mr. BENHAMADOUCHE Abdelouahab	Université de M'Sila	Rapporteur
	Université de M'Sila	Examineur

Année universitaire : 2019/2020

Remerciements

Avant toute considération, nos remerciements le GRAND DIEU le tout puissant qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modest travail.

Nous tenons à remercier en particulier notre encadreur **Mr. Benhamadouche Abdelouahab** qui nous a aidé par ses conseils, ces remarques pertinentes et par sa collaboration effective pour l'élaboration de ce mémoire.

Nous voudrions aussi exprimer nos remerciements aux membres de jury d'avoir fait l'honneur d'accepter d'évaluer ce travail.

Nous remercions spécialement nos professeur : **Mr. Djerioui Mouhamed** , **Mr. Ladjal Mohamed** et **Mr. Brikyoucef** pour leur encouragement et leur soutien scientifiques.

Nos remerciements vont également à tous les enseignants du département d'électronique sans oublier toutes les personnes de ce même département.

Dédicaces (1)

Je voudrais dédie cet humble travail A :

Mes très chers parents pour leurs sacrifices, leurs
patiences et leurs Encouragements

Mon chère frère & Mes sœurs

Mon binôme et ma meilleur amie «chahra zad »

Tout mes amis et mes collègues

Et à toute la famille

«cheyma»

Dédicaces (2)

Je dédie cet modeste travail à :

Mes parents

Mon chère frère « Saifeddine »

mes sœurs «Donya, Amina et Khadidja»

mon binôme et meilleur amie «Cheyma »

Tout mes amis et mes collègues

Et à toute la famille

«Chahrazed»

Résumé

Les traceurs de courbes I-V pour les modules PV sont utilisés comme méthode de diagnostic des problèmes tels que l'ombrage, les connexions défectueuses et les conditions de dégradation. Il existe plusieurs types et marques de traceurs disponibles dans le commerce, mais leurs coûts sont assez élevés sur le marché en raison du besoin d'importations. Cette memoire porte sur conception d'un traceur de courbes I-V pour Modules PV basés sur convertisseurs de puissance DC-Dc "SEPIC". Est utilisé en ajustant son rapport cyclique, la résistance equivalent vue par le module PV sera modifiée pour obtenir toutes les valeurs de courant et de tension fournies par le module PV. Ces points ont été enregistrés à l'aide d'une carte d'acquisition de données, avec ESP32, Cette interface a été développée avec le logiciel MATLAB après envoyées les données sauvegarde a l'applacation android via liaison sans fil. Pour les mesures de température , d'éclairment ,inclainaison tension et courant on utilise les capteurs et les modules suivants :le module MAX6675 avec une sonde thermocouple de type K ,Capteur de lumière OPT101,un gyroscope MPU6050 et ACS712

Abstract

I-V plotters for PV modules are used as a diagnostic method for problems such as shading, faulty connections and degradation conditions There are several types and brands of tracers available commercially, but their costs are quite high in the market due to the need for imports This memory relates to the design of an I-V curve plotter for PV modules based on DC-Dc "SEPIC" power converters. Is used by adjusting its cyclic ratio, the equivalent resistance seen by the PV module will be modified to obtain all current and voltage values provided by the PV module. These points were saved using a data acquisition card, with ESP32, This interface was developed with MATLAB software sent the data back to android applacation via wireless. For temperature, lighting, voltage and current measurements the following sensors and modules are used:the MAX6675 module with a thermocouple probe of type K ,the OPT101 light sensor,a gyroscope MPU6050 and ACS712

ملخص

تُستخدم الرسومات المنحنية للوحدات الكهروضوئية كطريقة لتشخيص مشاكل مثل التظليل والتوصيلات المعيبة وظروف التدهور. هناك عدة أنواع وعلامات تجارية من أدوات التتبع المتاحة تجاريًا ، لكن تكاليفها مرتفعة جدًا في السوق نظرًا للحاجة إلى الاستيراد. تتناول هذه الرسالة تصميم رسام منحنى للوحدات الكهروضوئية المعتمدة على محولات الطاقة. تُستخدم من خلال ضبط دورة عملها ، وسيتم تغيير المقاومة المكافئة التي تراها الوحدة الكهروضوئية للحصول على جميع قيم التيار والجهد التي توفرها الوحدة الكهروضوئية. تم تسجيل هذه النقاط باستخدام بطاقة الحصول على البيانات ، مع المعالج ، تم تطوير هذه الواجهة مع البرنامج ماتلاب بعد إرسال البيانات المحفوظة الى تطبيق أندرويد الموجود في الهاتف عبر الارتباط اللاسلكي. بالنسبة لقياسات درجة الحرارة والإضاءة والميل التيار و الضغط ، يتم استخدام المستشعرات والوحدات التالية:

MAX6675 ,OPT101,un gyroscope MPU6050 ,ACS712

Table des matières

Remerciement	i
Dédicaces	ii
Table des matières	iv
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	viii
Introduction générale	1
CHAPITRE I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques	
I.1 Introduction	3
I.2 Energie solaire photovoltaïque	3
I.3 L'effet photovoltaïque	4
I.4 Les systèmes photovoltaïque	4
I.4.1 Les systèmes autonome	5
I.4.2 Les systèmes hybrides	6
I.4.3 Les systèmes connectés au réseau	7
I.5 La cellule photovoltaïque	7
I.5.1 Structure d'une cellule photovoltaïque	8
I.5.2 Principe de fonctionnement	9
I.5.3 Les différents types de cellules	10
A. Les cellules à silicium monocristallin	10
B. Les cellules à silicium poly cristallin	10
C. Les cellules amorphes	10
D. Les cellules multi-jonctions	11
E. Les cellules organiques	11
I.5.4 Caractéristiques d'une cellule PV	11
I.5.5 Circuit équivalente d'une cellule solaire	14

I.6 Générateur photovoltaïque (GPV)	15
I.6.1 Module photovoltaïque	15
I.6.1.1 Module et groupement de cellules en série	16
I.6.1.2 Module et groupement de cellules en parallèle	17
I.7 Conclusion	18

Chapitre II : Caractérisation d'un panneau photovoltaïque

II.1 Introduction	19
II.2 La problématique de caractérisation	19
II.3 l'objectif de caractérisation	19
II.4. Les points essentiels d'une caractéristique	20
II.5 Défauts et les anomalies dans le système photovoltaïque	22
II.5.1 Défauts dans le système photovoltaïque	22
II.5.2. Classification des défauts de générateur PV	22
II.6 Différentes techniques de mesure	23
II.6.1 résistance variable	24
II.6.2 Charge capacitive	25
II.6.3 Charge électronique	26
II.6.4 Charge à 4 quadrants	26
II.6.5 convertisseur DC-DC	27
II.6.5.1 Hacheur dévolteur ou série (Buck converter)	28
II.6.5.2 Hacheur survolteur ou parallèle (Boost converter)	28
II.6.5.3 Hacheur à stockage inductif (Buck-Boost converter)	29
II.8 Revue bibliographique	29
II.9 Les Avantages et les inconvénients de différents Méthodes	31

II.10 Traceurs industriels de courbes I-V	32
II.9.1 Le PV200 Testeur PV solaire avec traçage de courbe I-V	32
II.10.2 L'analyseur de module solaire	34
II.10.3 L'I-V500w	35
III.10 Conclusion	36
CHAPITRE III : CONCEPTION DU SYSTEME	
III.1 Introduction	37
III.2Analyse du système	37
III.3Le concept général	37
III.4 Conception et spécifications	38
III.4.1 Exigence Fonctionnelles	38
A - Exigences fonctionnelles de la partie matérielle	39
B - Exigences fonctionnelles du logiciel	39
III.4.2 Exigences de performance	39
A - Exigences fonctionnelles de la partie matérielle	39
B - Exigences fonctionnelles du logiciel	40
III.4.3 Les contraintes de conception	40
III.5 Conception de l'architecture fonctionnelle	41
III.5.1 Diagramme des cas d'utilisation	42
III.5.2 Diagramme des structures	43
A. Schéma fonctionnel du système	43
B. Schéma d'architecture du système	44
III.5.3 Diagramme des séquences	45
A. Partie matérielle	46

B. Partie logicielle	47
III.6 Conclusion	48
CHAPITRE IV : REALISATION DU SYSTEME	
IV.1 Introduction	49
IV.2 Description du système	49
IV.2.1 Fonctions exécutées par le système	50
IV.2.2 Description des fonctionnalités du système	50
IV.3. Conception du bloc de puissance	51
IV.3.1 Principe de fonctionnement d'un convertisseur SEPIC	51
IV.3.2 Dimensionnement du convertisseur SEPIC	53
IV.3.3 Vérification du dimensionnement du SEPIC	54
IV.4 Simulation du système	56
IV.5. Composants matériels du système	58
IV.5.1 Le driver pour MOSFET	58
IV.5.2. Bloc de Mesure	59
IV.5.2.1 Mesure du courant et de la tension	59
A-Capteur de courant	59
B- Capteur de tension	60
IV.5.2.2 Mesure de la température	61
IV.5.2.3. Mesure de l'éclairement	62
IV.5.2.4 Mesure d'inclinaison	62
IV.5.3. Bloc d'acquisition et traitement de données	64
IV.3.3.1. Présentation de L'ESP32	64
IV.6. Simulation Proteus/ISIS	65
IV.6.1. Schéma du système électronique	65
IV.6.2. La réalisation du programme de commande avec ESP32	66
IV.6.3. Résultats de simulation	67
IV.7 Conclusion	69

Liste de figures

Figure I.1 : Exemple d'un système photovoltaïque privé	3
Figure I.2 : Schéma de l'effet photovoltaïque sous illumination	4
Figure I.3 : Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes	5
Figure I.4 : Configuration du système hybride à bus continu	6
Figure I.4 : Configuration du système hybride à bus continu	7
Figure I.5 : Systèmes photovoltaïque connectés au réseau	8
Figure I.6 : Cellule photovoltaïque	9
Figure I.7 : Coupe transversale d'une cellule PV typique	9
Figure I.8 : Principe de fonctionnement d'une cellule PV	11
Figure I.9 : Types de cellules photovoltaïques	12
Figure I.10 : Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque	12
Figure I.11 : Le courant I_{CC}	13
Figure I.12 : La tension V_{CO}	13
Figure I.13 : Caractéristiques courant-tension & puissance-tension d'une cellule photovoltaïque	14
Figure I.14 : Circuit équivalent d'une cellule PV avec une diode, une résistance série et une résistance parallèle	16
Figure I.15 : Structure d'un panneau photovoltaïque face avant et face arrière	16

Figure I.16: Mise en série des cellules solaires en module PV	17
Figure I.17 Schéma de groupement des cellules en série	17
Figure I.18 Caractéristique I(V) d'un groupement des cellules en série	17
Figure I.19 Schéma de groupement des cellules en parallèle	17
Figure I.20 Caractéristique I(V) d'un groupement des cellules en parallèle	17
Figure II.1 Toutes les métriques disponibles à partir d'une trace I-V	21
Figure II.2 Organigramme des différents défauts pouvant exister sur une installation solaire PV	22
Figure II.3 Caractérisation à l'aide d'une charge résistive.	25
Figure II.4 Caractérisation à l'aide d'une charge capacitive.	25
Figure II.5 Caractérisation à l'aide d'une charge électronique.	26
Figure II.6 Courbe I-V dans les quadrants I, II et IV	27
Figure II.7 Schéma fonctionnel d'une charge de quatre quadrants.	28
Figure II.8 la structure de convertisseur Buck	28
Figure II.9 la structure de convertisseur Boost	29
Figure II.10 la structure de convertisseur Buck-Boost	29
Figure II.11 PV200 Testeur PV solaire.	33
Figure II.12 L'analyseur de module solaire MECO	34
Figure II.13 L'I-V500w Testeur PV solaire	36
Figure III.1 Vue d'ensemble du système de caractérisation pour panneau photovoltaïque	38
Figure III.2 Exemple de cas d'utilisation de la partie matérielle	42
Figure III.3 Exemple de cas d'utilisation de la partie logicielle	42
Figure III.4 Schéma fonctionnel du système	43
Figure III.5 Schéma de l'architecture physique du système	44
Figure III.6 Diagramme des séquences de la partie matérielle du système	46

Figure III.7 Diagramme des séquences de la partie matérielle du système	47
Figure IV.1 Schéma synoptique du système	49
Figure IV.1 Fonctions exécutées par le système	50
Figure IV.3 Schéma synoptique des blocs de mesure de V I des modules photovoltaïques	51
Figure IV.4 SEPIC avec interrupteur fermé	52
Figure IV.5 SEPIC avec interrupteur ouvert	52
Figure IV.6 Schéma du hacheur SEPIC réalisé dans Simulink	54
Figure IV.7 Représentation des résultats de simulation	55
Figure IV.8 Schéma fonctionnel sous Simulink pour le caractériser	56
Figure IV.9 Caractéristique I-V reconstituée pour le module photovoltaïque	57
Figure IV.10 Caractéristique P-V reconstituée pour le module photovoltaïque	57
Figure IV.11 Schéma de connexion d'un driver IR2104	58
Figure IV.12 Capteur de Courant ACS712 20A	60
Figure IV.13 Capteur de tension	61
Figure IV.14 Carte d'un capteur de température MAX6675	62
Figure IV.15 Capteur de lumière OPT101	62
Figure IV.16 Un gyroscope MPU6050	63
Figure IV.17 Module ESP32 Lolin32 avec les illustrations des E/S	65
Figure IV.18 Schéma Proteus du testeur de module PV	66
Figure IV.19 Organigramme du fonctionnement du caractériser de panneaux photovoltaïques.	67
Figure IV.20 Allure du courant I_{pv} et tension V_{pv} pour Sim1	68
Figure IV.21 Allure du courant I_{pv} et tension V_{pv} pour Sim2	68

Liste des tableaux

TABLEAU II-1 : CLASSIFICATION DE DEFAUTS ET D'ANOMALIES D'UN CHAMP PV	22
Tableaux II.2 : Résumé des travaux étudiés	29
Tableau III.1 : Tableau du flux de données du diagramme d'architecture du système	44
Tableau IV.1 : Dimensionnement d'un hacheur SEPIC	52
Tableau IV.2 : Caractéristiques des capteurs de courant ACS712	58
Tableau IV.3 : Caractéristiques d'un capteur	60

Introduction générale

L'augmentation du coût des énergies classiques d'une part, et la limitation de leurs ressources d'autre part, font que l'énergie photovoltaïque devient de plus en plus une solution parmi les options énergétiques prometteuses, avec des avantages comme l'abondance, l'absence de toute pollution et la disponibilité en grandes quantités en tout point du globe terrestre.

La conversion photovoltaïque est l'un des modes les plus intéressants de l'utilisation de l'énergie solaire. Elle permet d'obtenir de l'électricité de façon directe et autonome à l'aide d'un matériel fiable avec une durée de vie relativement élevée, en admettant une maintenance réduite. Le but d'un système photovoltaïque (PV) est d'utiliser la conversion directe de l'énergie solaire par effet photovoltaïque pour subvenir aux besoins en énergie électrique.

A travers des systèmes de production basés sur un ensemble de module photovoltaïque, et une chaîne de conversion de l'électronique de puissance, l'énergie solaire est convertie selon les besoins du site où ces systèmes sont installés, ou injectés dans le réseau de distribution électrique.

L'utilisation persistante de ces modules en plein nature engendre des problèmes de fonctionnement qui nécessitent un diagnostic adéquat. Pour ce faire, des outils sont développés pour permettre d'extraire les caractéristiques électriques des modules PV et de détecter les problèmes techniques qui s'y apparentent.

Notre projet consiste à mettre en œuvre un système embarqué capable de prélever la caractéristique d'un module PV sans le débrancher de son installation, le système est basé sur un convertisseur de puissance de type SEPIC, il permet de balayer toute la caractéristique dans un temps réduit avec une fiabilité optimale. Les paramètres environnementaux sont aussi prélevés à chaque mesure de la caractéristique du module. Le système permet de commander et de récupérer les données en utilisant un Smartphone basé sur Android.

Ce mémoire est organisé de quatre chapitres :

Le premier chapitre est dédié à la description des systèmes photovoltaïques, quelques notions sur les panneaux solaires, leurs principes de fonctionnement et leur caractéristique

électrique (I-V) et (P-V), ainsi que l'influence des différents paramètres de l'environnement sur ces caractéristiques.

Le deuxième chapitre présente principalement les différentes méthodes de caractérisation des panneaux photovoltaïques.

Dans le troisième chapitre, nous nous intéressons à la conception propre du système de caractérisation, nous allons ainsi décrire la structure et les tâches essentielles qui garantissent un fonctionnement juste de la globalité du système.

Le quatrième chapitre nous permettra de présenter la partie technique du système à concevoir, nous validons nos choix technologiques à travers des simulations avec le logiciel MATLAB/Simulink, pour ce qui est du dimensionnement, et avec ISIS/Proteus, pour valider la commande et l'algorithmique du système.

En fin, Le mémoire se termine par une conclusion sur les résultats obtenus et les perspectives futures de ce travail.

CHAPITRE I

Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I.1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. Plusieurs cellules sont reliées entre elles et forment un panneau solaire (ou module) photovoltaïque. Plusieurs modules qui sont regroupés dans une centrale solaire photovoltaïque sont appelés champ photovoltaïque. Le terme photovoltaïque peut désigner soit le phénomène physique - l'effet photovoltaïque - ou la technologie associée.

Dans notre travail, nous nous intéressons aux systèmes de production photovoltaïques. C'est pourquoi dans ce chapitre nous commencerons par une présentation sur les systèmes photovoltaïques et leurs différents composants, ensuite nous décrirons le principe de fonctionnement des cellules solaires ainsi que leurs caractéristiques courant-tension et puissance-tension.

I.2 Energie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque fait l'objet d'un grand intérêt ces dernières décennies. Elle est basée sur l'effet photoélectrique, celui-ci permet de créer un courant électrique continu à partir d'un rayonnement électromagnétique. Cette ressource a donc l'avantage d'être inépuisable et utilisable en tout point de la terre. Les modules photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques à base de silicium ont la capacité de transformer les photons en électrons. La conversion photovoltaïque se produit dans des matériaux semi-conducteurs. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable.



Figure I.1 : Exemple d'un système photovoltaïque privé

I.3 L'effet photovoltaïque

Le terme « photovoltaïque » souvent abrégé par le sigle « PV » a été formé à partir des mots « photo » un mot grec signifiant lumière et « Volta » le nom du physicien italien Alessandro Volta qui a inventé la pile électrochimique en 1800. L'effet photovoltaïque est la conversion directe de l'énergie solaire en électricité [7].

L'effet photovoltaïque se manifeste quand un photon est absorbé dans un matériau composé de semi-conducteurs dopés P (positif) et N (négatif) dénommé comme jonction P-N. Sous l'effet de ce dopage, un champ électrique est présent dans le matériau de manière permanente (comme un aimant possède un champ magnétique permanent). Quand un photon incident interagit avec les électrons du matériau, il cède son énergie à l'électron qui se retrouve libéré de sa bande de valence et subit donc le champ électrique intrinsèque. Sous l'effet de ce champ, l'électron migre vers la face supérieure laissant place à un trou qui migre en direction inverse. Des électrodes placées sur les faces supérieure et inférieure permettent de récolter les électrons et de leur faire réaliser un travail électrique pour rejoindre le trou de la face antérieure[4].

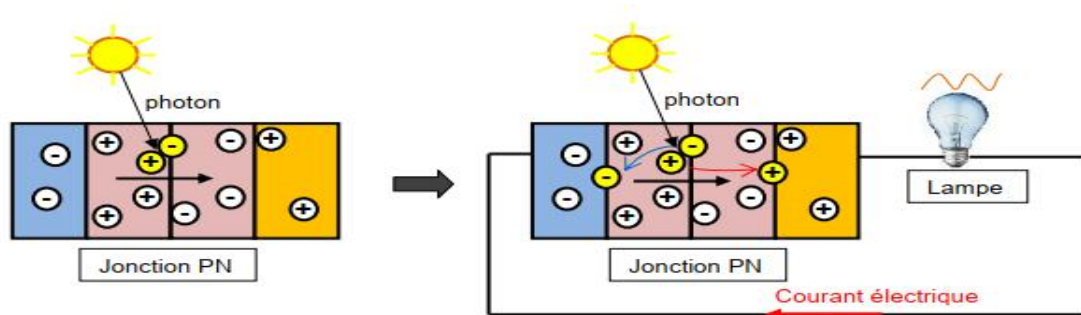


Figure I.2 : Schéma de l'effet photovoltaïque sous illumination

I.4 Les systèmes photovoltaïques

Un système photovoltaïque comporte plusieurs parties, il se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adaptent l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs (charge, injection dans le réseau). Cet ensemble, appelé "Balance of System" ou BOS, comprend tous les équipements entre le champ de modules et la charge finale. Il existe différents types de système photovoltaïque, ces types sont présentés dans les paragraphes suivants :

I.4.1 Les systèmes autonomes

Ces systèmes photovoltaïques sont installés pour assurer un fonctionnement autonome sans recours à d'autres sources d'énergie. Généralement, ces systèmes sont utilisés dans les régions isolées et éloignées du réseau électrique. Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes sont décrits dans la figure I.3, qui traduit les différentes possibilités offertes ; couplage direct à une charge adaptée ou couplage avec adaptateur d'impédance MPPT(Maximum Power Point Tracking), fonctionnement au fil du soleil ou avec stockage d'énergie électrique.

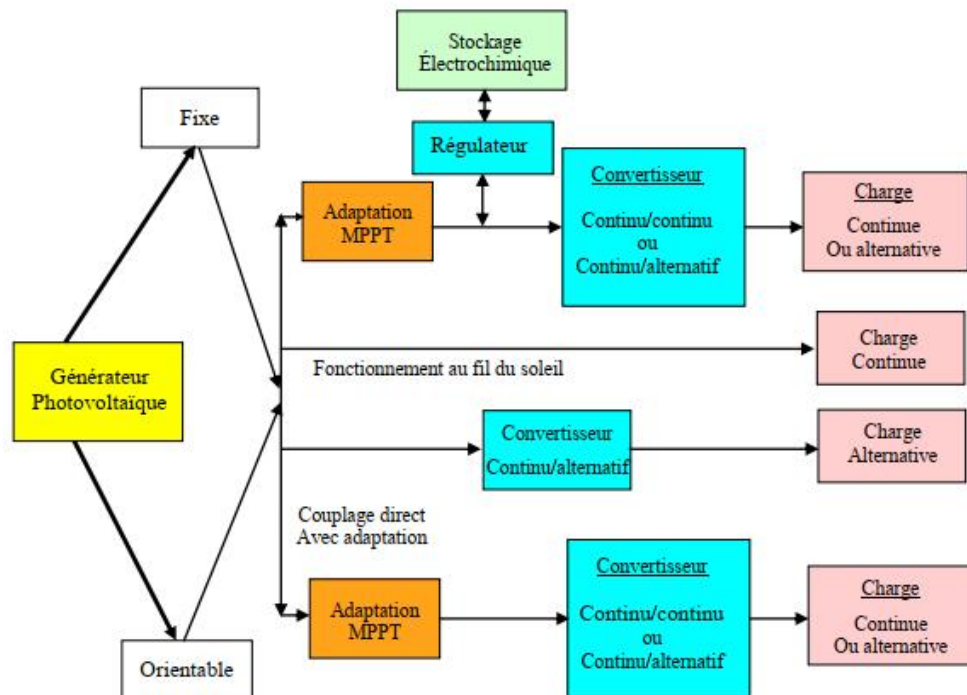


Figure I.3: Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes

Le couplage direct implique un fonctionnement au fil du soleil, donc à puissance essentiellement variable au cours de la journée. Les charges typiques à courant continu qui peuvent satisfaire le critère (tension constante à puissance variable) sont les accumulateurs électrochimiques. Les charges alternatives sont les pompes à eau, c'est le pompage au fil du soleil, le stockage est néanmoins présent sous la forme d'eau emmagasinée (dans un réservoir).

Dans la plus part des cas une adaptation d'impédance doit être réalisée en insérant entre le générateur et sa charge électrique un dispositif électronique, qui permet de forcer le système à fonctionner à sa puissance maximale, c'est le dispositif MPPT.

I.4.2 Les systèmes hybrides

Les systèmes d'énergie hybride associent au moins deux sources d'énergie renouvelable aussi une ou plusieurs sources d'énergie classiques. Les sources d'énergie renouvelable, comme le photovoltaïque et l'éolienne ne délivrent pas une puissance constante, mais vu leurs complémentarités, leur association permet d'obtenir une production électrique continue. Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées. Les différentes sources dans un système hybride peuvent être connectées en deux configurations, architecture à bus continu et architecture à bus alternatif

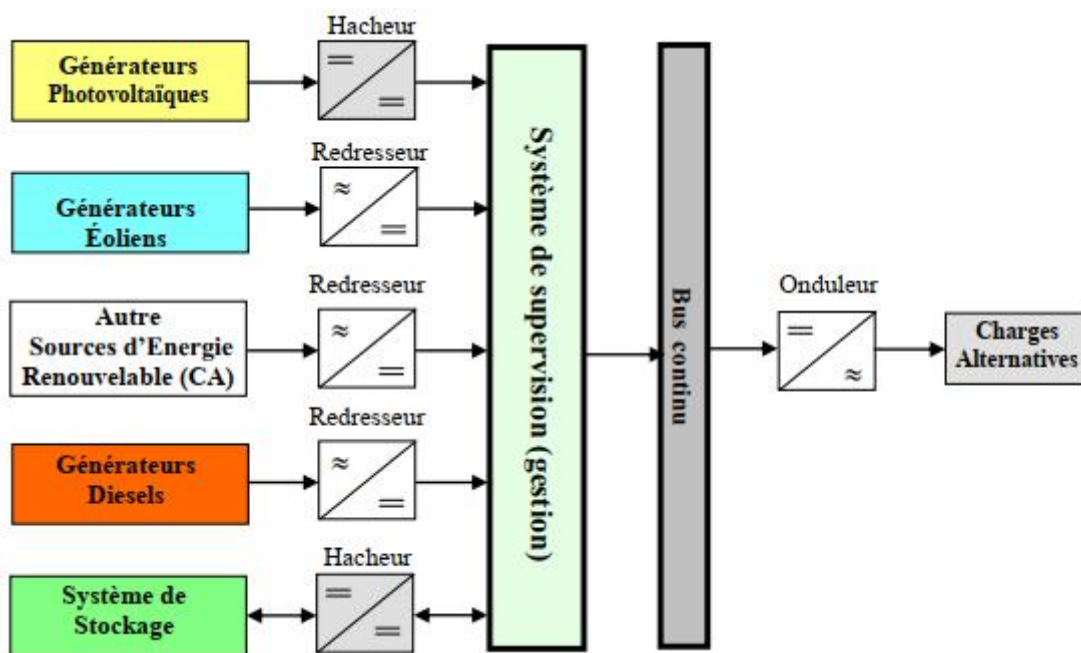


Figure I.4 : Configuration du système hybride à bus continu

Dans la première configuration, la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus continu. Ainsi, les systèmes de conversion d'énergie à courant alternatif (CA) fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour être convertie ensuite en courant continu (CC). Les générateurs sont connectés en série avec l'onduleur pour alimenter les charges alternatives. L'onduleur doit alimenter les charges alternatives à partir du bus continu et doit suivre la consigne fixée pour l'amplitude et la fréquence. La fonction spécifique du système de supervision est la commande de mise en marche et arrêt des générateurs et du système de stockage. L'avantage de cette topologie est la simplicité de commande. Dans la seconde configuration tous les composants du système hybride sont reliés à la charge alternative.

I.4.3 Les systèmes connectés au réseau

Les systèmes de production d'énergie photovoltaïque connectés à un réseau (Figure I.5) sont une résultante de la tendance à la décentralisation du réseau électrique. L'énergie est produite plus près des lieux de consommation. Les systèmes connectés à un réseau réduisent la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution. Il produit sa propre électricité et achemine son excédent d'énergie vers le réseau, auprès duquel il s'approvisionne au besoin, ces transferts éliminent le besoin d'acheter et d'entretenir une batterie. Il est toujours possible d'utiliser ces systèmes pour servir d'alimentation d'appoint lorsque survient une panne de réseau.

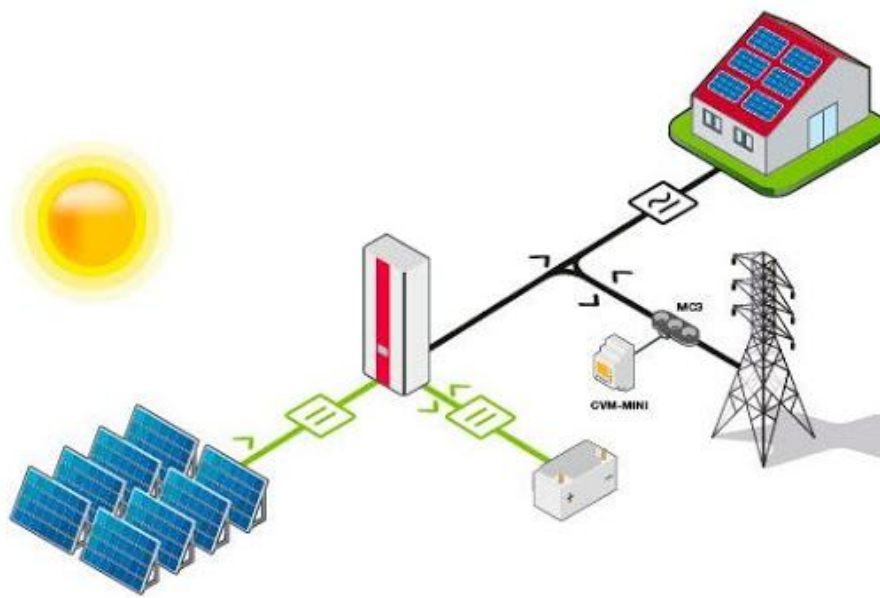


Figure I.5: Systèmes photovoltaïque connectés au réseau

I.5 La cellule photovoltaïque

Pour passer de l'effet photovoltaïque à l'application pratique, il est nécessaire de trouver des matériaux qui permettent d'optimiser les deux phases essentielles de ce principe :

1. Absorption de la lumière incidente.
2. Collection des électrons en surface.

Les cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs qui sont capables de conduire l'électricité ou de la transporter. Ils sont composés d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique (effet photovoltaïque).

Le silicium est l'un des matériaux le plus courant sur terre, mais un haut degré de pureté est requis pour en faire une cellule photovoltaïque et le procédé est coûteux. Selon les technologies employées, on retrouve le silicium monocristallin avec un rendement de 16 à 18%, le silicium polycristallin de rendement de 13 à 15%, le silicium amorphe présente une efficacité entre 5 et 10%. D'autres matériaux tels que l'Arséniure de Gallium et le Tellure de Cadmium qui sont en court de test dans les laboratoires est présentent un rendement de (38%).

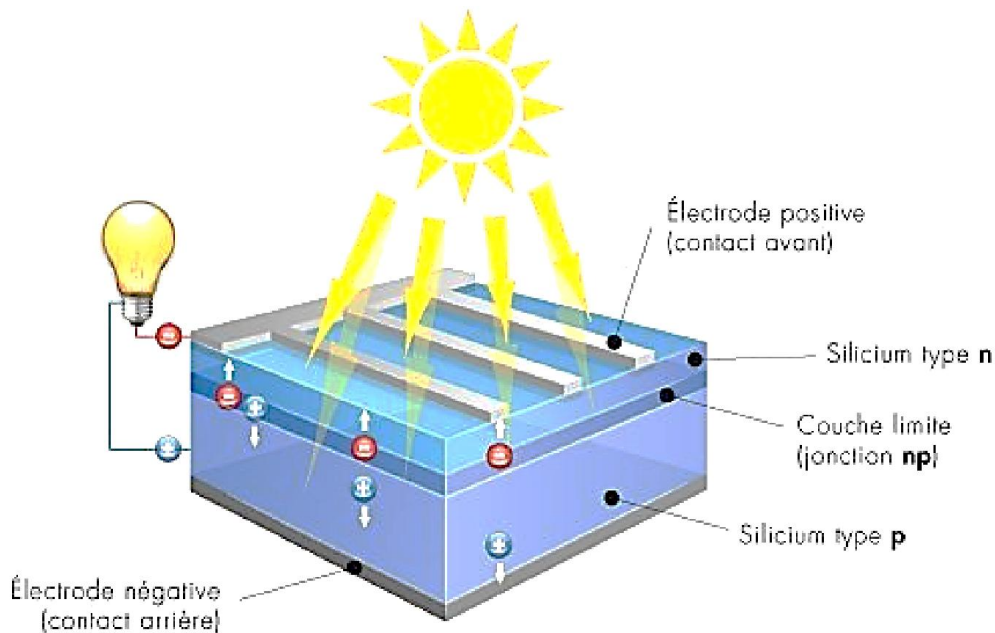


Figure I.6 : Cellule photovoltaïque

I.5.1 Structure d'une cellule photovoltaïque

La structure de base d'une cellule solaire photovoltaïque est une jonction PN (Figure I.7) constituée de la manière suivante : un semi-conducteur dopé P est recouvert d'une couche mince dopée N (quelque millième de mm). Entre les deux couches se développe la jonction. La couche supérieure qui est la zone N est recouverte par une grille métallique qui sert de cathode, tandis qu'un substrat métallique (contact arrière) joue le rôle d'anode. D'une manière générale les principales couches d'une cellule solaire sont :

1. Couche antireflet : Cette couche est utilisée pour minimiser la réflexion de la lumière, et d'adapter l'indice optique entre le milieu extérieur et la cellule solaire.
2. Texturation de la surface : La texturation du silicium est utilisée pour diminuer la réflectivité de la surface de la cellule. La surface a une forme pyramidale en général pour piéger le maximum de lumière.

3. Les contacts face avant et arrière : les contacts métalliques à l'émetteur et au substrat servent à collecter le courant de porteurs photo-générés. Les contacts doivent être ohmiques.

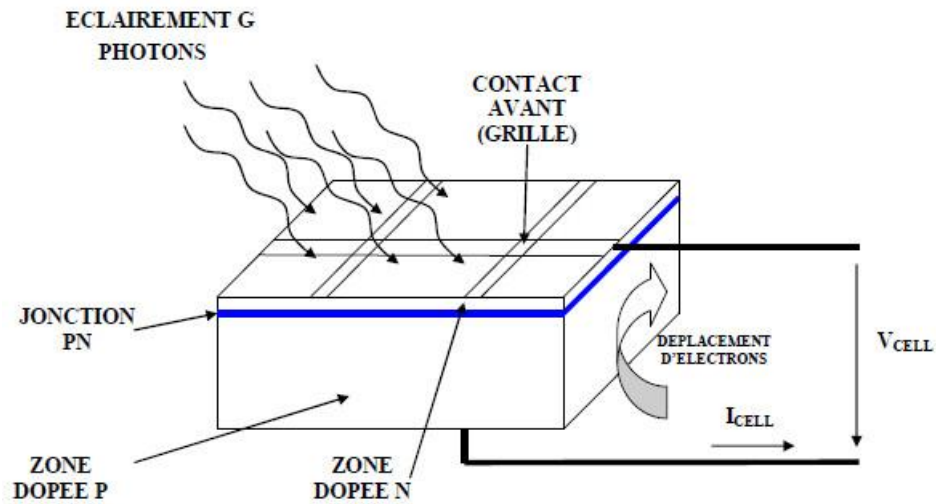


Figure I.7 : Coupe transversale d'une cellule PV typique

I.5.2 Principe de fonctionnement

L'absorption d'un photon par un semi-conducteur donne naissance à une paire d'électron/trou lorsque son énergie est supérieure à celle de la largeur de la bande interdite du matériau. Le champ électrique interne à la jonction, entraîne alors le trou vers la région P et l'électron vers la région N.

Par dopage du semi-conducteur de région de type P et de type N ; la cellule solaire est donc une jonction P-N avec des diverses parties représentées sur le schéma de la (figure I.8) :

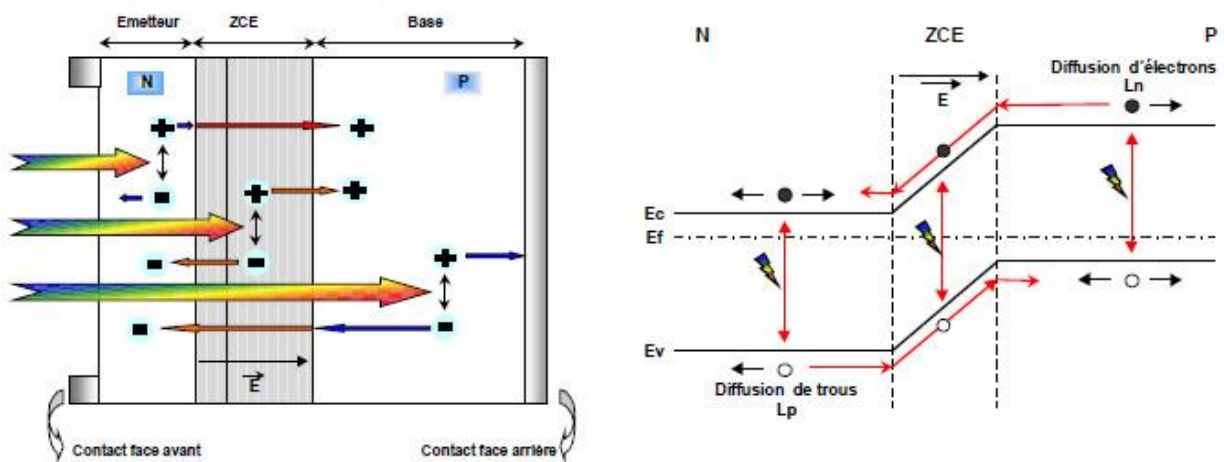


Figure I.8 : Principe de fonctionnement d'une cellule PV

I.5.3 Les différents types de cellules

Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs principalement à base de silicium (Si) et plus rarement d'autres semi-conducteurs : de sulfure de cadmium (CDs), de tellure de cadmium (Cd Te), de Germanium (Ge), de sélénium (Se) ou d'arséniure de gallium (Ga As). Le silicium est actuellement le semi-conducteur le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques, car il est très abondant dans la nature. En effet, il existe plusieurs types de cellules photovoltaïques dont les plus importants sont les suivantes:

A. Les cellules à silicium monocristallin

Les cellules photovoltaïques en silicium monocristallin sont formées d'un seul cristal. Elles sont en général d'un bleu uniforme.

➤ *Avantages :*

- Elles permettent d'obtenir des rendements élevés (rendement entre 13 à 17%).

➤ *Inconvénients :*

- Leur coût est très élevé.
- Rendement faible sous un faible éclaircissement.

B. Les cellules à silicium polycristallin

Elles sont constituées de plusieurs cristaux. La cellule a un aspect bleuté mosaïque (pas uniforme), leur rendement est de 11 à 15%.

➤ *Avantages :*

- Un bon rendement, mais cependant moins bon que pour les cellules monocristallines.
- Elles offrent actuellement un bon rapport qualité/prix.

➤ *Inconvénients :*

- Rendement faible sous un faible éclaircissement.

C. Les cellules amorphes

Le silicium est utilisé en couche mince, il n'est pas cristallisé. Il est déposé sur une plaque de verre. Ce type de cellule on le trouve le plus souvent dans les petits produits de consommation (montre, calculatrice).

➤ *Avantages :*

- Moins cher que les autres.
- Fonctionnement avec un éclaircissement faible.

➤ **Inconvénients :**

- Rendement faible.
- Performances qui diminuent avec le temps, durée de vie courte.

D. Les cellules multi-jonctions

Les cellules multi jonctions sont constituées de différentes couches qui permettent d'absorber la majorité de spectre solaire. Mais ces cellules ne sont pas commercialisées.

E. Les cellules organiques

Encore au stade de la recherche, cette nouvelle technologie permet à présent la production de cellules solaires organiques légères, flexibles sur une grande surface et moins chères à produire.

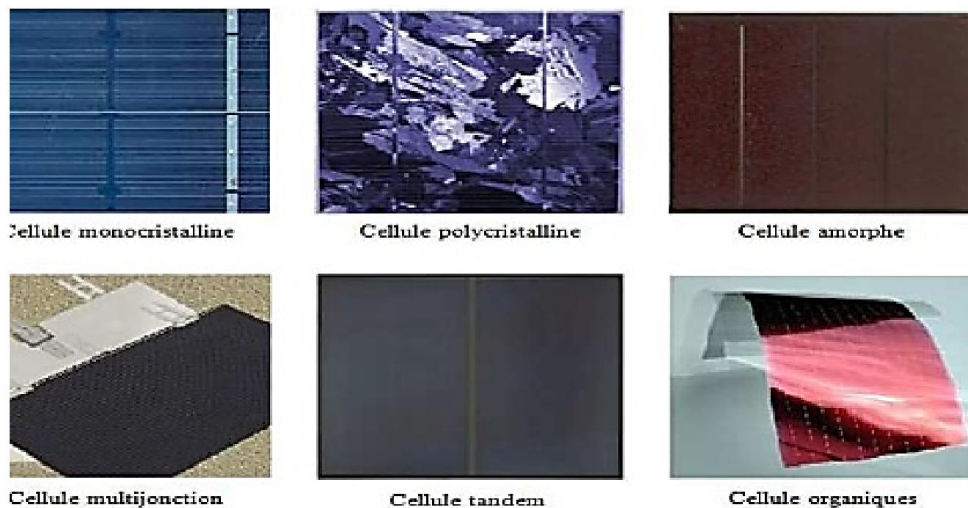


Figure I.9: Types de cellules photovoltaïques

I.5.4 Caractéristiques d'une cellule PV

La puissance électrique délivrée par une cellule photovoltaïque est le produit de la tension par le courant qu'elle génère. Ces deux grandeurs, courant et tension, dépendent à la fois des propriétés électriques de la cellule mais aussi de la charge électrique à ses bornes. Les propriétés électriques de la cellule sont synthétisées dans un graphe qu'on appelle caractéristique courant-tension. Tout dipôle électrique est entièrement défini par sa caractéristique courant-tension, qui lui est propre. Une cellule photovoltaïque, en tant que dipôle électrique, dispose de sa propre caractéristique courant-tension, ainsi qu'illustré sur la figure I.10.

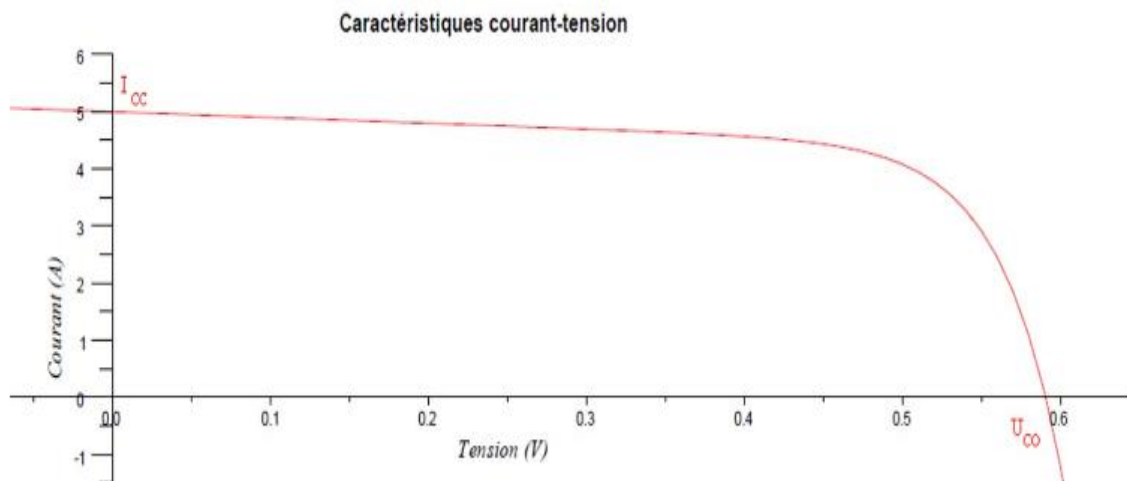


Figure I.10 : Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque

Cette caractéristique courant-tension ou caractéristique I-V représente la relation entre la tension et le courant délivrés par la cellule photovoltaïque ou tout générateur photovoltaïques. De cette courbe, nous relevons deux données importantes qui sont :

➤ **Le courant de court-circuit noté I_{CC}**

Il s'agit du courant qui traverse la cellule photovoltaïque lorsque celle-ci est court-circuit, c'est-à-dire lorsque le pôle + est relié au pôle - (la tension à ses bornes est alors nulle). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule $P = U \times I$ est nulle

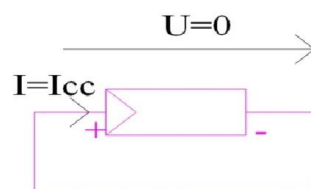


Figure I.11 : Le courant I_{CC}

➤ **La tension en circuit ouvert notée V_{CO}**

Il s'agit de la tension aux bornes de la cellule lorsque celle-ci est en circuit ouvert, c'est-à-dire lorsque le pôle + et le pôle - sont isolés électriquement de tout autre circuit électrique (le courant la traversant est alors nul). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule $P = U \times I$ est nulle.

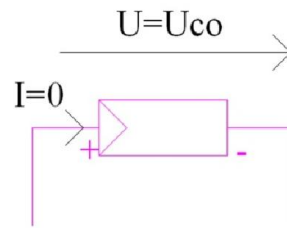


Figure I.12 : La tension V_{CO}

La puissance fournie par la cellule est tout simplement le produit du courant et de la tension. A partir de la caractéristique courant-tension, il est intéressant de dessiner le graphe de la puissance ($P = V_{CO} \times I$) en fonction de la tension V_{CO} , qu'on appelle aussi caractéristique puissance-tension (courbe verte) :

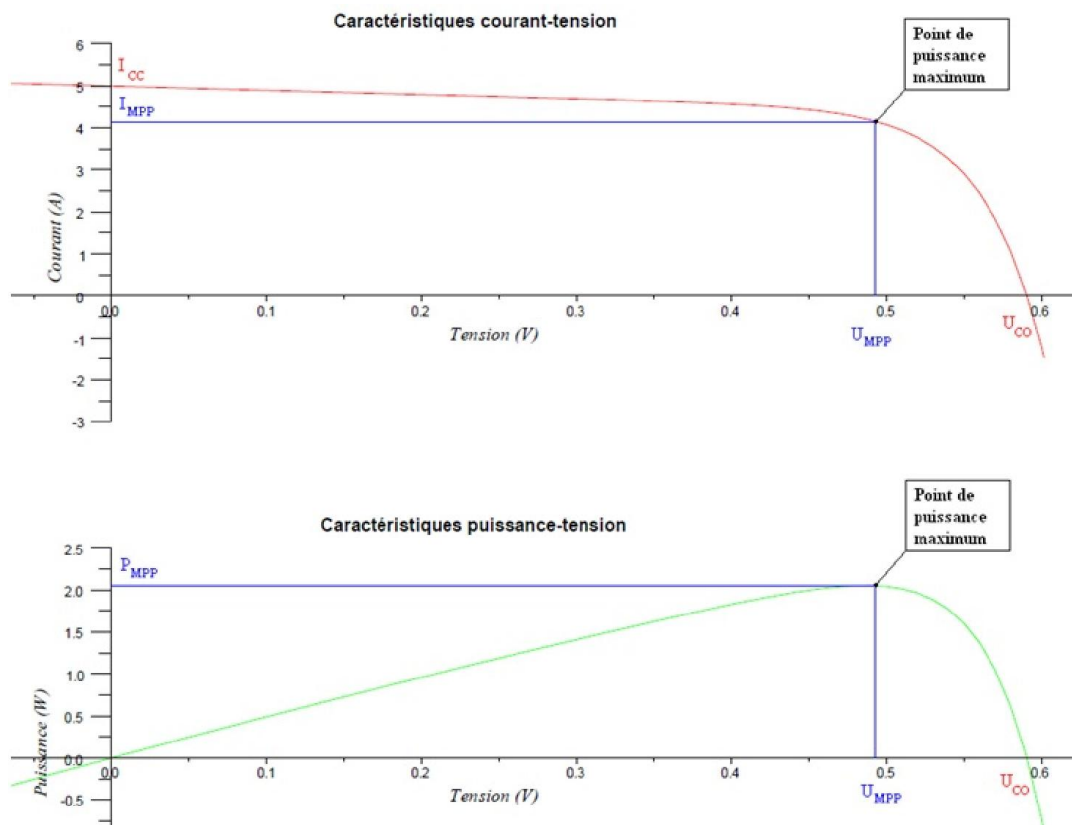


Figure I.13 : Caractéristiques courant-tension & puissance-tension d'une cellule photovoltaïque

On retrouve bien les deux cas énoncés précédemment (cellule en court-circuit et cellule en circuit ouvert) pour lesquels la puissance fournie est nulle.

Par ailleurs, la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque met en évidence un point de puissance maximum P_{MPP} (MPP signifie en anglais Maximal Power

Point, soit Point de Puissance Maximum). Ce point de puissance maximum est le produit d'un courant et d'une tension donnés. On appelle respectivement I_{MPP} et V_{MPP} le courant et la tension correspondant au point de puissance maximum, c'est-à-dire tel que $I_{MPP} \times V_{MPP} = P_{MPP}$.

Ainsi, pour résumer, 4 paramètres majeurs permettent de caractériser une cellule photovoltaïque :

- Le courant de court-circuit noté I_{CC} ,
- La tension à vide notée V_{CO} ,
- Le courant de puissance maximale noté I_{MPP} ,
- La tension de puissance maximale notée V_{MPP} .

La valeur des 4 paramètres ci-dessus varie plus ou moins en fonction d'un certain nombre de paramètres extérieurs dont :

- Le niveau d'éclairement de la cellule,
- La température de la cellule.

I.5.5 Circuit équivalent d'une cellule solaire :

Il existe plusieurs modèles de représentation d'une cellule PV, le plus utilisé est le modèle avec une diode, une résistance série et une résistance parallèle. Dans la figure suivante la diode symbolise la jonction PN caractéristique des semi-conducteurs. La source de courant représente la photo courante générée et les résistances représentent les pertes de cellules.

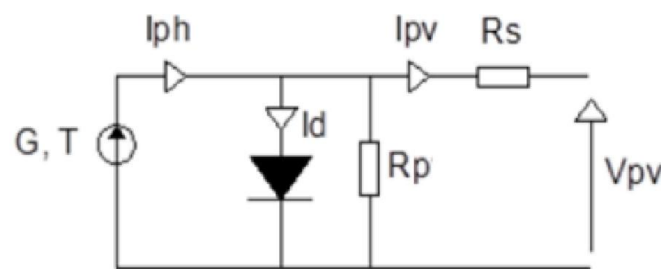


Figure I.14 : Circuit équivalent d'une cellule PV avec une diode, une résistance série et une résistance parallèle

L'analyse de la figure précédente conduit à l'équation (1) qui représente la loi de Kirchhoff :

$$I_{PV} = I_{ph} - I_d - I_{Rp} \quad (1)$$

Le courant de la diode est donné par l'équation suivante :

$$I_d = I_0 \left(\exp \left(\frac{q(V_{pv} + R_s I_{pv})}{mK_b T} \right) - 1 \right) \quad (2)$$

L'équation caractéristique de la cellule PV sera donc donnée comme suit :

$$I_{PV} = I_{ph} - I_0 \left(\exp \left(\frac{q(V_{pv} + R_s I_{pv})}{mK_b T} \right) - 1 \right) - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_p} \quad (3)$$

I.6 Générateur photovoltaïque (GPV)

Le générateur photovoltaïque GPV est composé d'un ou plusieurs modules photovoltaïques. Ces modules sont formés d'un assemblage série /parallèle de cellules photovoltaïques, qui réalise la conversion d'énergie solaire en électricité.

I.6.1 Module photovoltaïque

Le module photovoltaïque est un ensemble de cellules assemblées pour générer une puissance électrique exploitable, lors de son exposition à la lumière. Cet assemblage en série doit être protégé pour rendre le panneau apte à un usage en extérieur. Les cellules sont en effet des objets fragiles et sensibles à la corrosion, qu'il convient de protéger mécaniquement et de mettre à l'abri des rigueurs du climat (Humidité, variations de température, etc.). Des panneaux de diverses puissances sont réalisés selon la surface mise en œuvre (Typiquement de 1 à 300 Wc par panneau), ils constituent la partie productrice d'énergie dans un générateur photovoltaïque. Des panneaux plus puissants sont disponibles sur le marché, surtout depuis l'essor des installations connectées au réseau, les limites étant liées au poids, et à la manipulation de la structure, et aux contraintes de maintenance. Un module « classique » contient 36 ou 72 cellules, mais il existe des modules sur le marché de 40, 54, 60 cellules. La figure 1.15 montre la structure d'un module photovoltaïque face avant et face arrière contenant 36 cellules. La figure 1.16 montre le schéma d'assemblage des cellules du même module photovoltaïque.

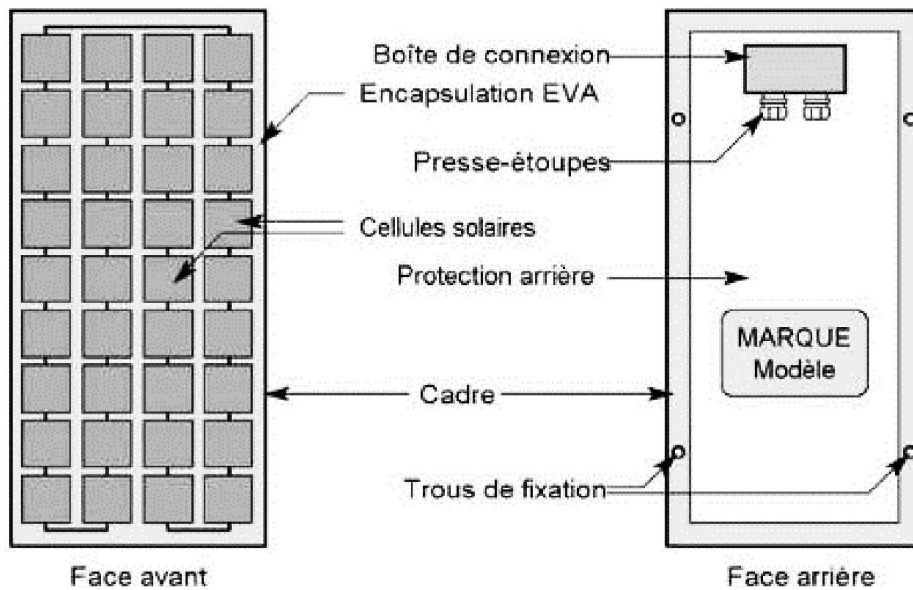


Figure I.15 : Structure d'un panneau photovoltaïque face avant et face arrière

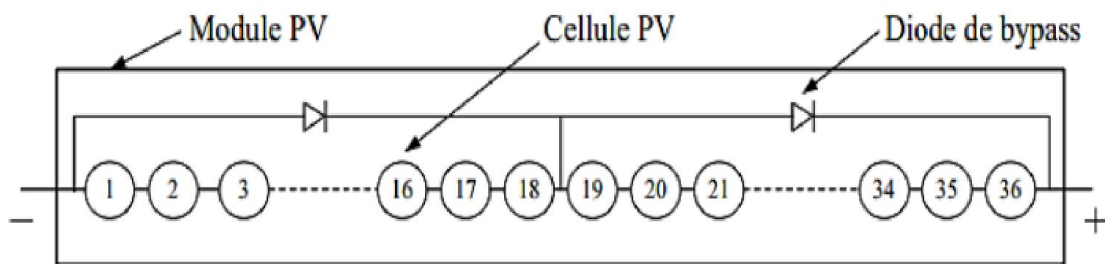


Figure I.16: Mise en série des cellules solaires en module PV

I.6.1.1 Module et groupement de cellules en série

La tension générée par une cellule étant très faible, il faudra dans la majorité des cas associer en série un certain nombre de cellules pour obtenir des tensions compatibles avec les charges à alimenter. C'est ce qui est réalisé dans un module photovoltaïque, où les cellules sont positionnées sous forme d'une guirlande dont les deux extrémités sont ramenées vers une boîte de connexion. Les électrodes supérieures d'une cellule sont connectées à la face arrière de la cellule suivante. La figure I.17 donne le schéma d'un module fermé sur sa résistance optimale R .

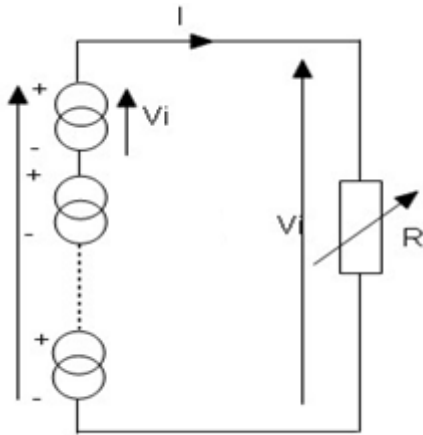


Figure I.17 Schéma de groupement des cellules en série

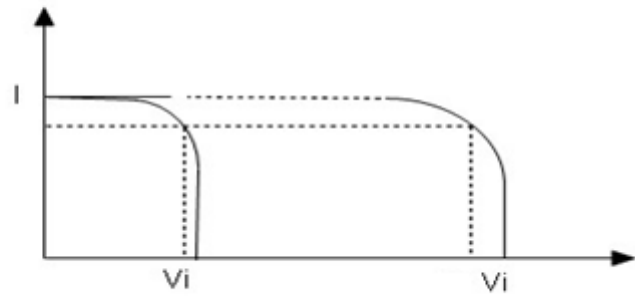


Figure I.18 Caractéristique I(V) d'un groupement des cellules en série

La figure I.18 représente la caractéristique courant-tension d'un groupement de cellules PV en série. Cette caractéristique du groupement est obtenue en multipliant point par point et pour un même courant, la tension par N_s (le nombre de cellule en série), le groupement série délivrera le courant I sous une tension égale à $(N_s \times V_i)$. Chacune des N_s cellules génère le même courant I pour une tension V_i .

I.6.1.2 Module et groupement de cellules en parallèle

Il est possible d'augmenter le courant fourni à une charge en plaçant en parallèle plusieurs cellules ou modules photovoltaïques comme indiqué sur la figure I.19. Sur cette figure, les générateurs de courant représentent soit des cellules individuelles, soit des cellules en série (modules), soit des modules en série (branches). On constate dans ce cas que c'est la tension générée qui est la même pour toutes les cellules (ou tous les modules ou toutes les branches).

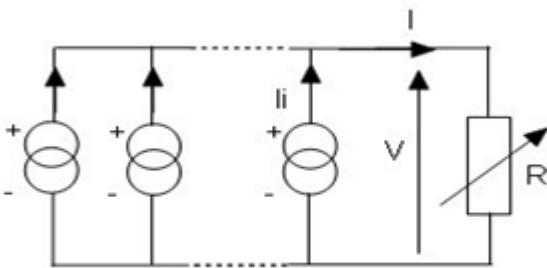


Figure I.19 Schéma de groupement des cellules en parallèle

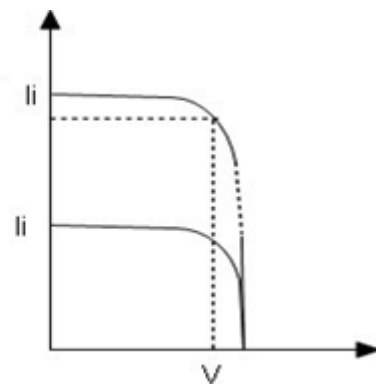


Figure I.20 Caractéristique I(V) d'un groupement des cellules en parallèle

La figure I.20 représente la caractéristique I.V d'un groupement de cellules en parallèle, ce groupement est obtenu en multipliant point par point et pour une même tension, le courant par N_p (nombre de cellule en parallèle), le courant augmentera pour qu'il soit égal à $(N_p \times I_i)$ pour une tension fixe V.

I.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur les systèmes photovoltaïques. Nous avons étudié le principe de l'effet photovoltaïque, nous avons ainsi montré la structure d'une cellule photovoltaïque qui est l'élément essentiel d'un système de production PV. Nous avons aussi défini les caractéristiques I-V et P-V d'un générateur PV, ces caractéristiques sont essentielles pour la suite de notre travail.

Nous avons aussi présenté la structure d'un module photovoltaïque, ainsi que les différents groupements possibles de ces cellules (série et/ou parallèle). Enfin, nous avons aussi exposé l'influence de différents paramètres environnants et structurels sur le fonctionnement et la forme des caractéristiques d'un générateur photovoltaïque.

CHAPITRE II

Caractérisation d'un panneau photovoltaïque

II.1 Introduction

Dans ce chapitre nous nous intéressons essentiellement à la caractérisation des panneaux photovoltaïques. Dans une première partie, l'objectif est de démontrer la nécessité d'utiliser des traceurs de courbes $I(V)$ pour identifier les anomalies des générateurs PV au moyen d'un contrôle visuel qualitatif et d'une mesure de performance quantitative.

Aussi, dans une deuxième partie nous présenterons quelques travaux sur la caractérisation électrique des modules PV, l'objectif principal de ces travaux est d'obtenir la caractéristique de la courbe $I(V)$ mais avec différentes méthodes et différents dispositifs.

II.2 La problématique de caractérisation

Dans un contexte de développement croissant des installations photovoltaïques, la nécessité de mettre en œuvre des méthodes et des outils de test et de diagnostic est devenu inévitable. Il est donc fondamental, pour le développement de la filière photovoltaïque, de contrôler ces systèmes dans les conditions réelles de fonctionnement et de pouvoir prévoir les améliorations à apporter aux systèmes, et à son monitoring pour une plus grande fiabilité et une sûreté de fonctionnement irréprochable.

C'est dans ce cadre que s'inscrit ce travail, dont l'objectif premier est de réaliser un outil qui permet de tester les modules PV en conditions réelles d'utilisation pour différentes technologies.

Bien que les modules photovoltaïques aient une structure électrique simple, leur maintenance doit être continue et périodique pour garantir leur fonctionnement dans les conditions prévues. De ce fait, une analyse électrique du fonctionnement des modules est nécessaire pour diagnostiquer les problèmes éventuels tels que l'ombrage, les connexions internes défectueuses, les fissures dans le verre et la saleté.

II.3 L'objectif de caractérisation

Les objectifs de la caractérisation d'un GPV peuvent être résumés dans ce qui suit :

- Préviation de l'intensité lumineuse et des conditions météorologiques à partir de données en station au sol ou satellites.
- Transposition de ces données dans le plan du panneau à partir de modèles.

- Évaluation de la perte d'intensité lumineuse due à l'ombrage ou à la pollution.
- Calcul la température des panneaux en fonction de la technologie PV, de l'installation, de la lumière incidente et de la température extérieure
- Modélisation des courbes I (V) en fonction des conditions d'éclairage et de la température
- Prise en compte des pertes dues aux câbles et aux Mismatch (tous les panneaux ne produisent pas le même courant pour des raisons différentes et le courant est chargé par le panneau le plus faible).
- Trouver le point de fonctionnement optimal (puissance maximum) du panneau PV.
- Prise en compte des pertes résultantes de l'onduleur (passage de la tension continue à la tension d'injection alternative dans le réseau électrique)
- Vérifier que le système fournit une puissance adéquate par comparaison avec les valeurs attendues, calculées à partir des valeurs de luminance et de température mesurées.

II.4. Les points essentiels d'une caractéristique

La courbe I-V offre des données utiles pour diagnostiquer la santé d'une cellule PV.

La figure II.1. Montre les métriques disponibles à partir d'une trace I-V.

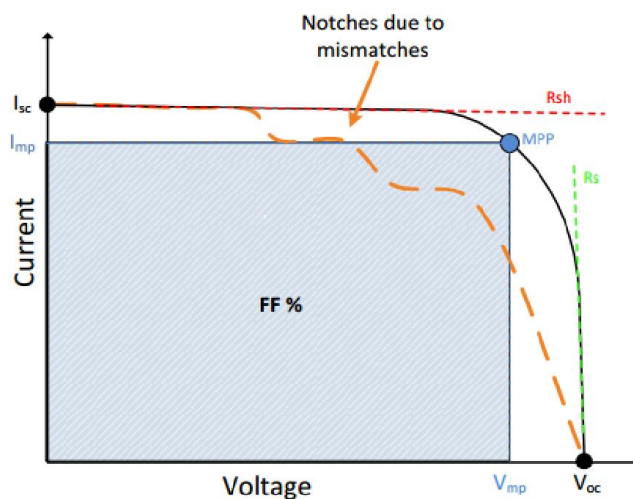


Figure II.1 : Toutes les métriques disponibles à partir d'une trace I-V

Chacune des mesures présentées dans la figure II.1 a son utilité dans le diagnostic de la santé d'un module PV. Les points de mesures sont expliquées ci-dessous :

Résistance shunt : Une valeur R_{sh} qui est trop petite, approximée à partir de la pente de la courbe I-V près de I_{sc} , est généralement un indicateur des chemins de shunt existant dans un module. Les chemins de dérivation sont des chemins de courant électrique en parallèle avec la sortie du module, dissipant la perte de puissance sous forme de chaleur. Ils sont également couramment identifiés par imagerie infrarouge, car ils peuvent provoquer une élévation importante de la température.

Résistance série : Une valeur R_s trop grande, approximée à partir de la pente de la courbe I-V près de V_{oc} , indique généralement une mauvaise connexion quelque part le long de la ligne qui crée une résistance excessive; cela peut également être causé par un fil de taille insuffisante. Cette valeur augmentant avec le temps peut également être utilisée comme métrique pour quantifier la dégradation du panneau. Des valeurs R_s élevées révèlent des pertes en série plus élevées.

Tension en circuit ouvert : Une V_{oc} plus faible que prévu peut également être un indicateur de défaillances. Cela peut signifier que la température de la cellule du module est plus élevée que prévu, qu'un seul module de la chaîne est uniformément ombré, ou indiquer une activité de diode de dérivation.

Courant de court-circuit : un I_{sc} plus faible que prévu indique généralement un encrassement uniforme à travers la chaîne PV ou un vieillissement uniforme. Il s'agit d'une métrique importante, avec le plus communément disponible I_{mp} et V_{mp} , à utiliser pour quantifier la dégradation sur une chaîne qui sinon a une courbe I-V idéale.

Point de puissance maximum : un MPP inférieur à celui attendu est généralement le résultat d'une autre métrique qui ne répond pas aux attentes. Un faible MPP peut être le résultat d'une courbe I-V visiblement déformée (qui peut être due à des encoches ou à des valeurs R_s et R_{sh} indésirables). Si la courbe est la forme correcte et le MPP est encore trop bas, I_{sc} ou V_{oc} est probablement trop bas aussi. Les courbes I-V peuvent également révéler tout écart par rapport à une courbe idéale ou théorique. Les encoches indiquent une activité de diode de dérivation, ce qui suggère des problèmes de discordance ou des diodes court-circuitées.

Le facteur de forme : est un paramètre qui, conjointement avec I_{sc} et V_{oc} , détermine le maximum d'énergie d'une cellule solaire. Il est défini comme le rapport de la puissance maximale de la cellule solaire au produit de I_{sc} et V_{oc} , ou $(V_{mp} \times I_{mp}) / (V_{oc} \times I_{sc})$. Graphiquement, le facteur de remplissage est une mesure de la "rectangulaire" de la courbe I-

V de la cellule solaire et est également l'aire du plus grand rectangle qui tiendra dans la courbe I-V

II.5 Défauts et anomalies dans le système photovoltaïque

Avant de détailler les techniques de caractérisation des panneaux photovoltaïque, il serait intéressant de survoler les défauts et les anomalies qui peuvent exister ou apparaître du côté des GPV.

II.5.1 Défauts dans le système photovoltaïque

La figure II-2 représente les différents défauts pour chaque élément d'une installation photovoltaïque.

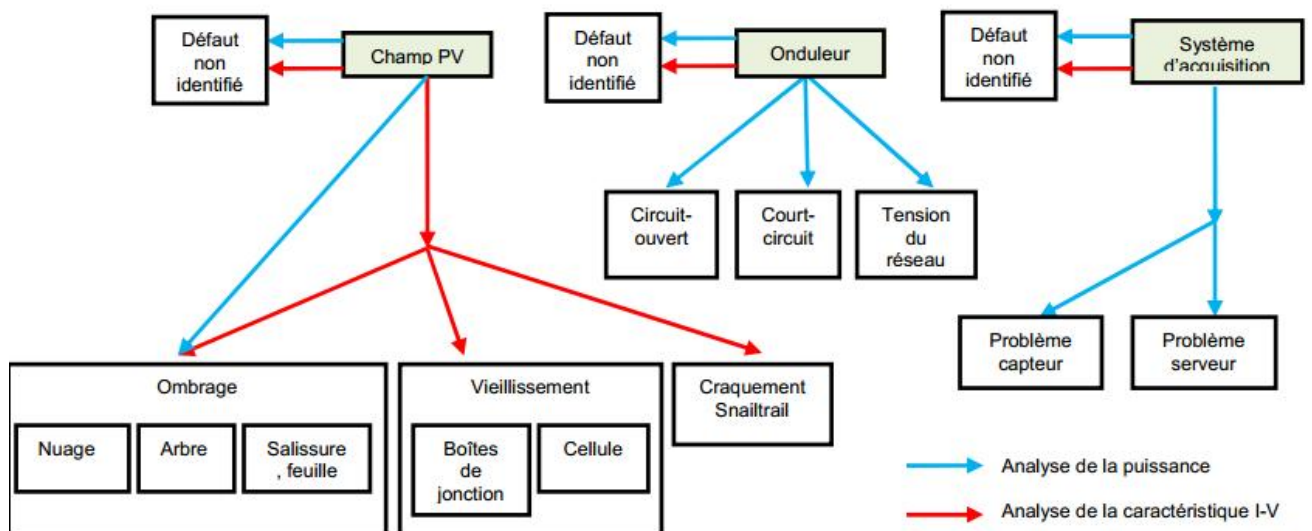


Figure II.2: Organigramme des différents défauts pouvant exister sur une installation solaire PV

II.5.2. Classification des défauts de générateur PV

Il existe plusieurs classifications des défauts qui sont citées dans la littérature. Dans notre travail, nous avons opté pour la classification par niveau d'apparition de défaut et l'étape à laquelle ils interviennent et s'ils peuvent modifier le comportement du composant de cette étape (cellule, groupe de cellules, modules, strings, champ). Le tableau II.1 présente cette classification.

Tableau II.1 : Classification des défauts et d'anomalies d'un champ PV

Composant	Nature des défauts	Dénomination des défauts
Cellule	Module arraché ou cassé Pylônes, cheminée, sable, neige etc. Echauffement des cellules Dégradation des interconnexions Fissure Corrosion des liaisons entre cellules Modules de performances différentes Détérioration des cellules Pénétration de l'humidité	Défaut de mismatch et d'ombrage
Groupe de cellules	Destruction de diodes Absence de diodes Inversion de la polarité des diodes Diode mal connectée Diode court-circuit	Défaut de diode de bypass
Module	Modules court-circuités Inversion de polarité du module Modules shuntés	Défaut de module
Chaîne	Rupture du circuit électrique Destruction de la liaison Corrosion des connexions Corrosion des contacts Court-circuit du circuit électrique Module déconnecté	Défaut de connectique
Champ	Destruction des diodes Absence de diodes Inversion de la polarité des diodes Diode mal connectée Diode court-circuitée	Défaut de diode anti-retour

II.6 Différentes techniques de mesure

Il existe plusieurs méthodes pour caractériser les modules PV, les principales couvrent cinq méthodes différentes avec des degrés de complexité, de fidélité et des coûts variables. En plus de cela, une caractéristique importante à prendre en compte dans un traceur de courbes est la flexibilité d'utilisation sur le terrain, la possibilité d'avoir une autonomie dans l'alimentation

électrique en plus du stockage de données, une connexion sans fil et un temps d'acquisition faible.

Les principales méthodes de caractérisation électrique de module PV sont :

- ❖ Résistance variable
- ❖ Charge capacitive
- ❖ Charge électronique
- ❖ Charge à 4 quadrants
- ❖ Convertisseur DC-DC

II.6.1 Résistance variable

La méthode la plus simple et la plus connue dans la caractérisation des modules PV ou est l'utilisation d'une charge résistive pure 'R' comme le montre la figure II.3. La variation de cette résistance R se fait par étapes ; de zéro à l'infini (de 0 à ∞) avec un pas régulier ou irrégulier afin de parcourir toute la courbe I-V du point de court-circuit au point de circuit ouvert, en relevant la tension et le courant dans chaque étape. Cette méthode n'est applicable qu'aux GPV de faible puissance, à cause de l'indisponibilité des résistances pour une puissance plus élevée. De plus, la variation de la résistance de charge se fait manuellement, ce qui rend le processus très lent de sorte que le rayonnement solaire et les conditions thermiques pourraient être modifiées pendant la mesure. La mesure de la tension et du courant se réalise à l'aide d'une paire de multimètre numérique par chaque étape. Par ailleurs, sur le plan pratique, on utilise un ensemble de résistances comme charge. Un tableau de relais contrôlé par ordinateur, est utilisé pour sélectionner la combinaison de résistances pour obtenir une résistance bien spécifique. Les résistances sont choisies de telle sorte que la diffusion des points soit autour du 'coude' de la courbe I-V. Deux canaux de convertisseur analogique/numérique d'une carte d'ordinateur sont utilisés afin de mesurer chaque paire(I,V). Avec cette approche, le réglage manuel de la résistance de charge est évité et le temps d'acquisition est amélioré.

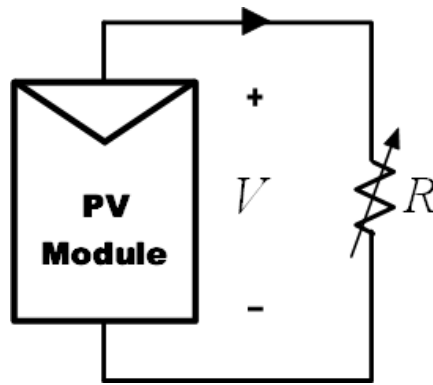


Figure II.3 : Caractérisation à l'aide d'une charge résistive.

II.6.2. Charge capacitive

Cette technique mesure la caractéristique I-V d'un dispositif photovoltaïque (module ou GPV) se base sur l'utilisation d'une charge capacitive, i.e. la polarisation du dispositif par un grand condensateur, initialement déchargé. Le condensateur commence à se charger dès l'ouverture des deux switches S2 et S3, avec une tension croissante et un courant décroissant qui s'annulera en fin de charge correspondant ainsi la condition de circuit-ouvert ($V=V_{oc}$).

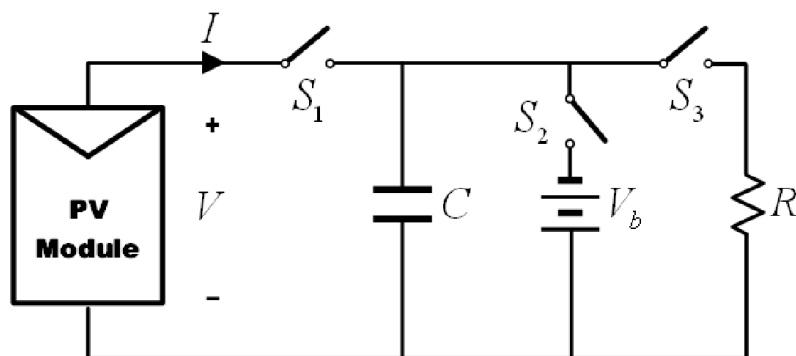


Figure II.4 Caractérisation à l'aide d'une charge capacitive.

Au lieu de commencer la deuxième charge avec le courant de court-circuit, nous pourrions commencer avec S2 fermé, de sorte que le condensateur serait initialement chargé à une tension négative et le balayage de la courbe I-V se ferait à partir du 2ème quadrant afin d'obtenir le courant de court-circuit I_{sc} . Par ailleurs, pour effectuer une nouvelle mesure, le condensateur doit se décharger préalablement à travers la résistance R par le biais de la fermeture de l'interrupteur S3. Il est à noter que les trois interrupteurs doivent être réactivés avec une séquence appropriée. Le temps de charge du condensateur est directement proportionnel à la valeur de C et la tension de circuit-ouvert du module ou GPV à caractériser et inversement proportionnel au courant de court-circuit.

En se basant sur cette technique, deux variantes ont été proposées et rapportées dans la littérature

Variante 1 : la tension et le courant sont mesurés à l'aide d'une carte d'acquisition pilotée par ordinateur. La mesure recommence quand la carte envoie un signal de déclenchement à l'interrupteur qui connecte le condensateur au dispositif PV.

Variante 2 : Il s'agit d'une charge capacitive portable à base de transistors bipolaires grilles isolées (IGBT) permettant la mesure la caractéristique I-V des champs PV en conditions réelles du site. Les interrupteurs de la figure II-8 sont substitués par des IGBT et le condensateur est une association en parallèle des capacités et des résistances.

II.6.3 Charge électronique

La méthode de charge électronique figure II-9 utilise un transistor (habituellement un MOSFET) en tant que charge. En variant la tension grille-source, la résistance entre drain et la source est et par conséquent le de courant fourni par le module l'est aussi. Lorsque le balayage de la courbe I-V est réalisé, le MOSFET doit fonctionner dans ses trois régimes de fonctionnement (coupure, linéaire ou triode et saturation). En conséquence, la plus grande partie de l'énergie fournie par Le module devra être dissipé par cet appareil, qui limite son application à la puissance moyenne

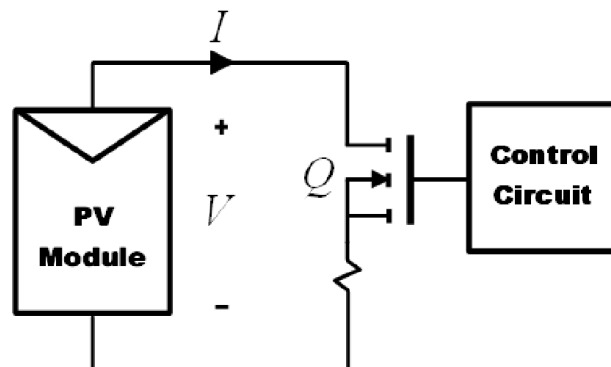


Figure II.5 Caractérisation à l'aide d'une charge électronique.

II.6.4 Charge de quatre quadrants

Une charge de quatre quadrants fonctionner comme source ou générateur de courant bidirectionnel et appliquer une tension positive ou négative, ce qui permet son utilisation comme charge réglable en d'autres termes une alimentation capable de délivrer et de dissiper de l'énergie ; En figure II-10 est illustrée la courbe I-V qui peut générer une

charge de quatre quadrants et en figure 2.5 est illustré le schéma fonctionnel du circuit qu'on peut implémenter pour réaliser une charge de quatre quadrants.

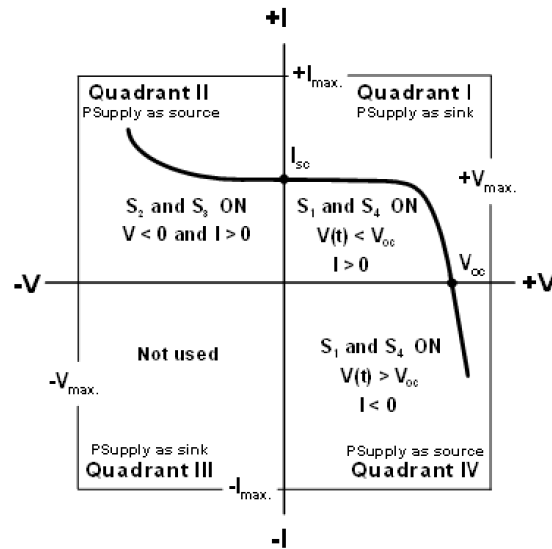


Figure II.6 : Courbe I-V dans les quadrants I, II et IV

Pour un module photovoltaïque, l'intérêt principal est d'obtenir la courbe I-V dans le premier quadrant. Mais, l'exploration des points situés dans la 2^{ème} et 4^{ème} quadrants pourraient servir comme outil de diagnostic important afin de détecter la désadaptation dans le fonctionnement du module PV tels que : l'ombrage, le mis match, le hot-spot,... etc. Le principe de fonctionnement d'une charge de quatre quadrants se base sur une alimentation où sa tension de sortie dépendant d'un signal de référence. Ce peut être modifié par une autre référence extérieure ou programmée, pour pouvoir réaliser un balayage de différentes valeurs

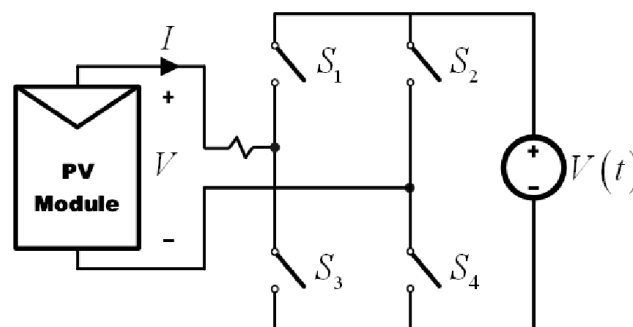


Figure II.7 : Schéma fonctionnel d'une charge de quatre quadrants.

II.6.5 Charges à base de convertisseurs DC/DC

Il y a un plusieurs topologies des convertisseurs DC-DC. Ils sont classés par catégorie selon que la topologie isolée ou non isolée. Les topologies isolées emploient un transformateur d'isolement fonctionnant à haute fréquence, elles sont très employées

souvent dans les alimentations à découpage. Les topologies les plus connues dans la majorité des applications sont le Flyback, en demi-pont et en pont complet. Dans les applications photovoltaïques (PV), les systèmes de couplage avec le réseau électrique emploient souvent ces types de topologies quand l'isolement électrique est préféré pour des raisons de sûreté

Les topologies non isolées ne comportent pas de transformateurs d'isolement. Elles sont généralement utilisées dans l'entraînement des moteurs à courant continu. Ces topologies sont encore classées en trois catégories :

- ❖ Abaisseurs (Buck)
- ❖ Elévateurs (Boost)
- ❖ Elévateurs - Abaisseurs (Buck-Boost)

II.6.5.1 Hacheur dévolteur ou série (Buck converter)

Le convertisseur dévolteur a pour rôle principal de convertir la tension d'entrée en une tension de sortie inférieure ($V_s < V_e$). Il est aussi appelé convertisseur Buck, convertisseur abaisseur de tension ou hacheur série. La figure II-12 montre la structure et les formes d'ondes du courant et de la tension de ce convertisseur qui est caractérisé par la disposition en série de l'interrupteur avec la source.

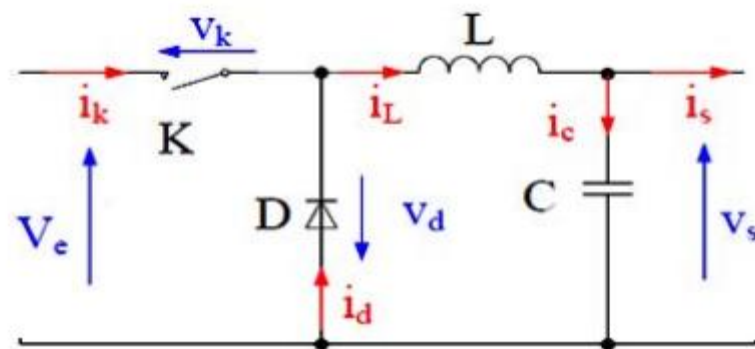


Figure II.8 : Structure de convertisseur Buck

II.6.5.2 Hacheur survolteur ou parallèle (Boost converter)

Le convertisseur survolteur a pour rôle principal de convertir la tension d'entrée en une tension de sortie supérieure ($V_s > V_e$). Il est aussi appelé convertisseur Boost, convertisseur élévateur de tension ou hacheur parallèle. La figure II.13 donne le schéma de principe de ce convertisseur, les intervalles de conduction de l'interrupteur et de la diode ainsi que les formes d'ondes de ses courants (à gauche) et tensions (à droite).

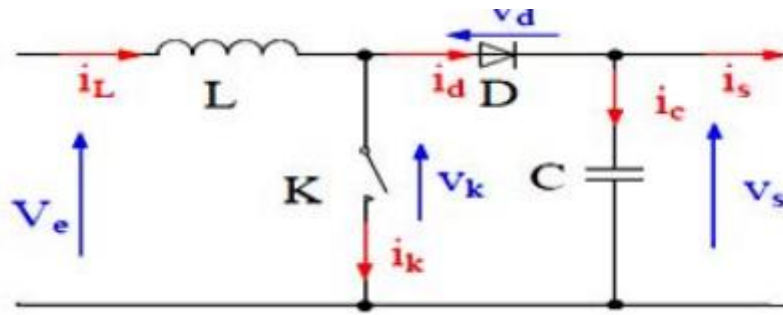


Figure II.9 : Structure d'un convertisseur Boost

II.6.5.3 Hacheur à stockage inductif (Buck-Boost converter)

Le convertisseur dévolteur-survolteur (ou Buck-Boost) combine les propriétés des deux hacheurs déjà étudiés. Il peut être employé pour transformer idéalement n'importe quelle tension continue d'entrée en n'importe quelle tension continue de sortie. Ce convertisseur est essentiellement utilisé pour les appareils électroniques portatifs, et permet d'optimiser la durée d'autonomie de la batterie tout en protégeant le système. La figure II.14 montre la structure et les formes d'ondes du courant et de la tension de ce convertisseur.

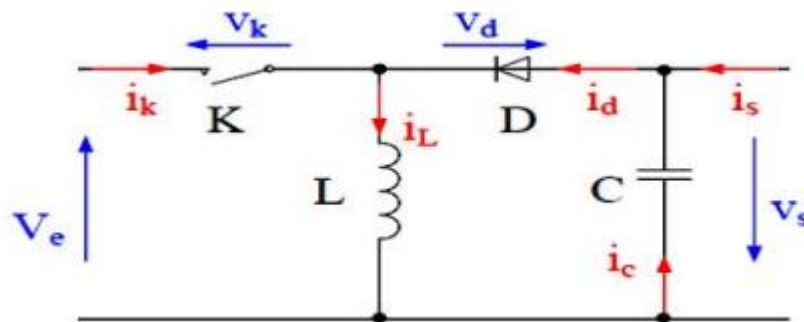


Figure II.10 : la structure de convertisseur Buck-Boost

II.7 Revue bibliographique

Dans cette section, une synthèse est faite pour de plusieurs bibliographies traitant de toutes les méthodes mentionnées ci-dessus.

Avec l'avènement de la microélectronique, les formes de caractérisation des modules PV ont considérablement évolué. Les premières formes traitent de la méthode résistive utilisant la lumière artificielle et des conditions de température ambiante contrôlées. Ensuite, la méthode capacitive a permis la caractérisation sur le terrain. Les méthodes de chargement électronique et de convertisseur continu-continu ont permis de faire beaucoup de recherches,

récemment, en raison de son faible cout et du grand développement des marchés des commutateurs à semi-conducteurs.

Dans le tableau sont montrés les principaux travaux recensés sur les traceurs à courbe I(V) pour les modules PV, les principales caractéristiques des travaux sont : le système d'acquisition de données, le temps d'acquisition de la courbe I(V) et le logiciel d'interface utilisé pour contrôler le système.

Tableaux II.2 :Résumé des travaux étudiés.

Travaux	Méthode utilisée	Système d'acquisition de données	Interface graphique	Temps d'acqui
(MUNOZ ; LORENZO, 2006) [11].	Capacitif	Oscilloscope	–	0,1 s
(KUAL ; YUVARAJAN, 2006) [12].	Charge Electronique	Oscilloscope	–	–
(BENGHANEM, 2009) [13].	Charge Electronique	PIC16F877	Matlab	–
(GASPARIN, 2009) [14].	Alimentation à quatre quadrants	Multimètres	Visual Basic	0,1 s
(RODRIGUES, 2009) [15].	Capacitif	Carte d'acquisition de données picolog1000	LabVIEW	1 s
(BELMILI, 2010) [16].	ChargeElectronique	PIC16F876	Visual Basic	–
(LEITE et al, 2010) [17].	Charge Electronique	Oscilloscope	–	–
(VALENTE, 2011) [18].	Charge Electronique	Carte d'acquisition de données NI USB 6008	Matlab	2 s
(PILIOUGINE et al, 2011) [19].	Alimentation à quatre quadrants	Multimètres	Borland Delphi	1 s
(LEITE et al, 2012) [20].	Charge Electronique	Carte d'acquisition de données NI USB 6008	LabVIEW	–
(SIMON ; MEYER, 2006) [21].	Charge Electronique	Carte d'acquisition de données NI PCI-6228	LabVIEW	2 s
(DURAN et al, 2012) [22].	Convertisseurs DC /DC	PIC16F877 / Oscilloscope	LabVIEW	0,2 s
(ISAAC, 2013) [23].	Résistance variable	Carte d'acquisition de données NI USB 6008	LabVIEW	–
(SAHBEL et al, 2013) [24].	Charge Electronique	Carte d'acquisition de données NI USB 6008	LabVIEW	6 s

II.8 Les Avantages et les inconvénients de différents Méthodes

(1) Résistance variable

❖ Avantages

- Très bon marché et facile à remplacer.
- Méthode la plus simple.

❖ Inconvénients

- Fiabilité et la réponse est faible nécessité de programmer en cas d'utilisation d'une résistance variable programmable

(2) Charge capacitive

❖ Avantages

- Excellentes utilisations de leurs caractéristiques pour conduisant une tension variable.
- En chargeant le condensateur à négatif le deuxième quadrant de tension peut être obtenue.

❖ Inconvénients

- Relativement peu fiable dans circuits pour chaque nouveau mesuré le condensateur doit être déchargé.
- Difficile de contrôler les commutateurs pour fonctionner correctement séquence.

(3) Charge électronique

❖ Avantages

- Très fable.
- La fréquence de MOSFET est très élevée (très vite).

❖ Inconvénients

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

(4) Charge à quatre quadrants

❖ Avantages

- L'affichage direct de la sortie est possible dans cette méthode.
- Avec cette méthode deuxième et troisième Des courbes en quadrant peuvent également être obtenues.

❖ Inconvénients

- Le coût est élevé.

- Difficile à construire en raison de plus nombre de commutateurs. Et ne peut pas être utilisé pour les grands systèmes PV.

(5) Convertisseurs DC/DC

❖ Avantages

- Haute efficacité.
- Peut gérer un grand courant de Sortie.

❖ Inconvénients

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

II.9 Traceurs industriels de courbes I-V

Il existe de nombreux traceurs de courbes I-V sur le marché, dont certains fonctionnent avec une la topologie de charge électronique et d'autres avec les topologies de charge capacitives. Les appareils portables sont généralement capacitifs lorsque les unités montées en rack sont conçues pour des tests de production avec un simulateur solaire sont de type à charge électronique DC. Exemple de dispositifs pour mesures portables et leur les caractéristiques sont données dans les paragraphes suivants :

II.9.1 Le PV200

Le PV200 est un traceur de courbe I-V compact et économique qui utilise opération simple par bouton-poussoir qui en fait un outil efficace et polyvalent testeur pour les systèmes PV. 999 jeux de données peuvent être stockés sur l'instrument et une fois téléchargé sur le logiciel SolarCert, le logiciel de comparaison conditions de test standard peuvent être faites.

Tous les tests sur le PV200 sont conformes aux exigences des normes CEI 61829 et CEI62446. En appuyant simplement sur un bouton, le PV200 peut mesurer les liaisons Voc, Ioc, d'isolation et de mise à la terre, avec enregistrement complet des résultats de test à bord avec exportation aisée vers le PC via une connexion USB.



Figure II.11 : PV200 Testeur PV solaire.

Optimisé pour une utilisation en extérieur avec un écran bien visible, même en plein soleil, le PV200 est prêt à tout moment et en tout lieu. Il est également léger, portable et répond rapidement, ce qui vous permet de configurer et d'effectuer tous les tests le plus rapidement possible.

Caractéristiques principales :

- ❖ Mesures de continuité Terre / Terre.
- ❖ Mesures de résistance d'isolement (auto court-circuit et point à point).
- ❖ Mesures de tension AC / DC.
- ❖ Tension de circuit ouvert jusqu'à 1000V DC.
- ❖ Tension maximale de point d'alimentation jusqu'à 1000V DC.
- ❖ Courant de court-circuit jusqu'à 15A DC.
- ❖ Courant maximum d'alimentation jusqu'à 15A DC.
- ❖ Calcul automatique du facteur de remplissage Courant de fonctionnement (nécessite une pince de courant incluse) jusqu'à 40 A.
- ❖ Mesure de courant continu jusqu'à 40 kW.
- ❖ Idéal pour tous les installateurs de systèmes PV, les techniciens PV O / M et les fabricants de modules PV.

II.9.2 L'analyseur de module solaire MECO

L'analyseur de module solaire MECO, modèle 9009, est un analyseur portable utilisé pour les tests, la maintenance et la recherche de l'efficacité de divers paramètres des panneaux et cellules photovoltaïques. L'analyseur peut être utilisé lors de l'installation de nouvelle équipement photovoltaïque afin de générer une puissance spécifique. Il peut identifier l'exigence des modules PV, de leur orientation, et aussi de diagnostiquer les modules cassés ou usés.

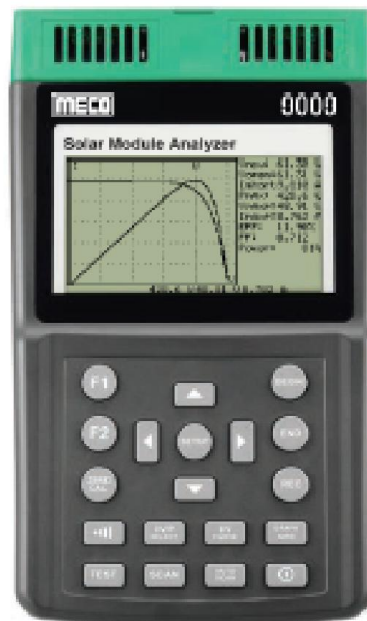


Figure II.12 : L'analyseur de module solaire MECO

Caractéristiques principales :

- ❖ Test de courbe I-V pour panneau solaire / module / cellule
- ❖ Max. Panneau solaire / Module / Puissance de la cellule (Pmax) recherche par balayage automatique : 60V, 12A (capacité 500W).
- ❖ Meilleure résolution : 1mV, 1mA.
- ❖ Test I-V manuel à point unique.
- ❖ Max. Tension (Vmaxp) à Pmax.
- ❖ Max. Courant (Imaxp) à Pmax.
- ❖ Tension en circuit ouvert (Vopen).
- ❖ Courant sur le circuit court (Ishort).
- ❖ Courbe I-V avec curseur pour afficher chaque point de données.
- ❖ Efficacité (%) Calcul du panneau solaire.
- ❖ Réglage de la zone du panneau solaire : 0,001 m² ~ 9999 m².

- ❖ Réglage standard de la source lumineuse : 10 W / m² ~ 1000 W / m².
- ❖ Communiquer avec un PC via un câble USB adaptateur secteur et batterie au lithium rechargeable.
- ❖ Taille de la mémoire : 100 enregistrements.
- ❖ Durée d'échantillonnage de l'enregistrement des données : 0 ~ 99 min.
- ❖ Grand écran LCD avec Backlight.

Applications de connexion

- ❖ Contrôle de qualité sur la ligne de production, entrepôt ou site d'installation.
- ❖ Identifier les exigences du système d'alimentation solaire.
- ❖ Maintenance des panneaux solaires.
- ❖ Vérifier les meilleurs angles d'installation des panneaux solaires.
- ❖ Recherche et développement.

II.9.3 Le I-V500w

Le I-V500w permet la détection sur le terrain de la courbe I-V et des principaux paramètres caractéristiques d'un seul module et de plusieurs chaînes de modules pour les installations photovoltaïques jusqu'à 1500V et 10A ou 1000V et 15A. Pour mesurer la courbe IV, le I-V500w gère une base de données interne des modules, qui peut être mise à jour à tout moment par l'utilisateur. La comparaison des données mesurées avec les valeurs nominales permet d'évaluer immédiatement si la chaîne ou le module remplit les paramètres d'efficacité déclarés par le fabricant. La courbe I-V peut également être mesurée en décentralisant la mesure de l'irradiation et de la température à l'aide de l'unité à distance optionnelle SOLAR02, à l'aide de la connexion par radiofréquence (RF) avec l'unité maître. Pour l'I-V500w également, l'affichage à la fin du test de la courbe I-V indique clairement la conformité aux spécifications déclarées par le fabricant du panneau.



Figure II.13 : Le I-V500w Testeur PV solaire

Caractéristiques principales :

- ❖ Facile, rapide et légère.
- ❖ Aucun sac à dos ou ordinateur portable nécessaire.
- ❖ Courbe I-V de 128 points.
- ❖ Mesure de la courbe I-V d'un ou plusieurs modules ou d'une chaîne complète jusqu'à 1500V / 10A.
- ❖ Mesure de la tension à vide et du courant de court-circuit V_{oc} / I_{sc} .
- ❖ Base de données de 30.000 modules photovoltaïques sélectionnables COV et ISC.
- ❖ Test Auto Start.
- ❖ Application HTANALYSIS.

II.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons argumenté la nécessité de concevoir des outils de diagnostic pour les systèmes photovoltaïques, ces outils reposent essentiellement sur la caractérisation des générateur PV. Nous avons aussi présenté les différentes méthodes de caractérisation des générateurs photovoltaïques. Chacune de ces méthodes présente des avantages et des inconvénients liés à leur implémentation matérielle.

Enfin, nous avons présenté quelques exemples d'appareils commerciaux utilisés dans le test et le diagnostic des panneaux photovoltaïques, ainsi que leurs principales caractéristiques techniques.

CHAPITRE III

Conception du système

III.1 Introduction

Ce chapitre présente quelques concepts du système embarqué que nous construisant et de la conception du système. Le chapitre commence par donner quelques définitions et caractéristiques d'un système embarqué. Ensuite, les concepts de base de la méthodologie de conception sont présentés, y compris un aperçu des étapes les plus courantes dans le flux de conception des systèmes embarqués, en particulier le traceur de caractéristiques de panneau photovoltaïque, qui sont : la spécification, la conception architecturale et la conception fonctionnelle

III.2 Analyse du système

Le but de ce travail est de construire un dispositif de mesure à base de composants électronique et de capteurs pour tracer les caractéristiques des modules PV. Cet appareil doit assurer un contrôle continue d'une installation PV sans affecté son fonctionnement normal. Le projet vise à concevoir un appareil facile à utiliser, portable, interagissant avec les appareils mobiles et les ordinateurs.

Nous pouvons, d'ores et déjà, prévoir certaines fonctionnalités et décrire certains détails de leur utilisation. Par exemple, l'utilisateur doit connecter les capteurs au module PV, puis il peut prendre les enregistrements, après quoi il peut afficher, envoyer ou stocker ces données. Nous avons décidé d'appeler ce projet un caractériser autonome pour panneau photovoltaïque.

La conception d'un tel dispositif requiert certaines compétences techniques et méthodologiques qui découlent du domaine des systèmes embarqués. De ce fait, nous allons adopter une approche de conception spécifique qui permet de mettre en œuvre le système visé, en garantissant la robustesse et la fiabilité nécessaire à ce type de dispositif.

III.3 Le concept général

Le concept général de notre projet est représenté dans la figure III.1, cette représentation permet de saisir les fonctions clés du système à concevoir, ainsi que les éléments matériels et logiciel qui garantissent son bon fonctionnement. Aussi, nous pouvons distinguer l'environnement dans lequel le système opère, et nous pouvons de cette manière décrire les différentes tâches nécessaires à l'achèvement de son objectif principal.

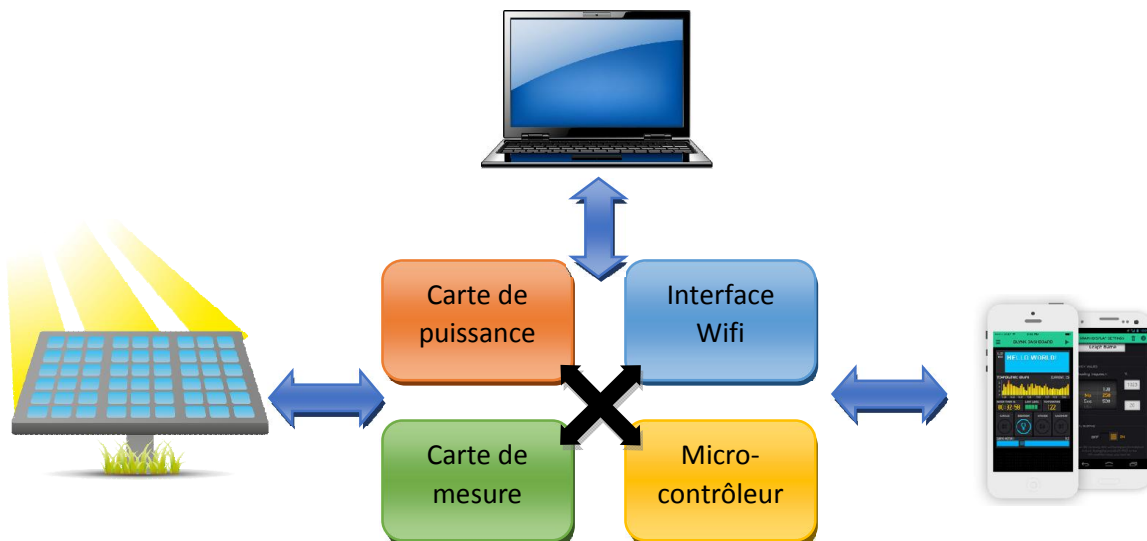


Figure III.1 : Vue d'ensemble du système de caractérisation pour panneau photovoltaïque.

A travers un certain nombre d'éléments matériels et logiciels, le système permettra de récupérer la caractéristique d'un module photovoltaïque, et de la rendre accessible à l'utilisation à tout moment. La disponibilité des données est assurée pour permettre entre-autre :

- Un suivi en temps réel de l'évolution de la production photovoltaïque,
- Un diagnostic efficace pendant le fonctionnement normal d'un module PV,
- Un diagnostic distant d'une installation PV,
- Une surveillance active pour garantir la pérennité de l'installation PV.

III.4 Conception et spécifications

Cette section définit les différentes fonctions, tâches, contraintes de conception et détermine les exigences de spécification du projet principal. Dans notre projet, le système est composé d'une partie matérielle qui intègre une partie Firmware et d'une application logicielle pour ordinateur et smartphone.

III.4.1 Exigence Fonctionnelles

Les exigences fonctionnelles décrivent ce que l'utilisateur peut faire avec le système, qu'il s'agisse du matériel ou du logiciel du système. Elles décrivent les caractéristiques du système ou des processus que le système doit exécuter. A quoi sert le système et que doit faire le système, les fonctions utiles...etc.

A - Exigences fonctionnelles de la partie matérielle

La partie matérielle du système est la partie électronique qui comprend un élément de traitement de donnée avec Firmware intégré, cette partie doit permettre aux utilisateurs de:

- Mesurer les valeurs de courant et de tension du module PV,
- Mesurer l'intensité de la lumière,
- Mesurer l'inclinaison du module PV,
- Mesurer la température du panneau photovoltaïque,
- Enregistrer les données dans un stockage d'une carte mémoire,
- Envoyer les données enregistrées à l'ordinateur et le Smartphone.
- La commande de la carte de puissance pour le balayage de la caractéristique du module photovoltaïque.

B - Exigences fonctionnelles du logiciel

L'application logicielle qui doit être installée sur un ordinateur ou un Smartphone doit permettre aux systèmes d'intégrer les fonctionnalités suivantes :

- La communication avec un PC. On peut utiliser l'interface USB, une interface de communication sans-fil telle que : le nRF, le Wifi, le Bluetooth...etc,
- La communication avec un serveur internet,
- La visualisation des données reçues,
- La Visualisation de l'historique des données reçues,
- La récupération des données,
- La configuration et le contrôle du système électronique,
- L'enregistrement des données reçues dans une carte mémoire.

III.4.2 Exigences de performance

Cette section définit avec quelle cadence le système doit exécuté certaines fonctions et avec quelles conditions de performance sont effectuées les choix des différentes solutions possibles:

A-Exigences de performances matérielles

La partie matérielle du système à concevoir doit :

- Consommer le moins d'énergie possible

- Faire le balayage de la caractéristique d'un module PV en un temps inférieur à 200ms,
- Récupérer toutes les mesures et les sauvegardé en moins de 500ms.
- Envoyer toutes les données via une interface sans-fil en moins de 1 seconde,
- Avoir un temps de latence minimal,
- Pouvoir stocker les données de mesure de plusieurs semaines dans une mémoire interne.
- Mesurer des courants jusqu'à 20A,
- Mesurer des tensions jusqu'à 25V,
- Le nombre de point de mesure doit être paramétrable de 10 points jusqu'à 100 points,
- Doit pouvoir fonctionner en mode autonome,
- Être facilement maintenable,
- Être facilement installable dans une installation PV.

B- Exigences de performances logicielles

La partie logicielle du système à concevoir doit garantir les performances de fonctionnement suivantes :

- Démarrage le plus rapide possible,
- Latence de communication faible,
- Doit avoir des procédures de test interne,
- Doit consommer le moins d'énergie possible
- Doit afficher les graphiques avec un précision relativement bonne,
- Doit afficher les données en temps réel,
- Pourvoir sauvegarder les données enregistrées en local ou sur un serveur distant.

III.4.3 Les contraintes de conception

Comme pour n'importe quel système technologique, la mise en œuvre doit prendre en compte des contraintes techniques et d'autres non technique à savoir :

- La partie matérielle doit être conditionné pour pouvoir fonctionner sous des contraintes environnementale et mécanique dures, telle que : de forte température, poussier, humidité élevée...etc,

- Doit respecter les normes techniques spécifiques aux installations photovoltaïques,
- Ne doit pas influé sur le fonctionnement d'une installation PV.
- La carte de puissance doit supporter les pics de courant et de tension accidentels,
- L'application doit être installable dans des Smartphone avec des versions d'Android supérieur à 5.0,
- L'application doit prendre un espace mémoire minimal,
- Le coût du système ne doit pas être élevé et influé sur le budget alloué à une installation PV,

III.5 Conception de l'architecture fonctionnelle

Les premières étapes de la conception sont l'analyse et la spécification des exigences, ceci permet d'aider le concepteur à définir le problème et à esquisser les fonctionnalités souhaitées, et à identifier les contraintes globales de conception.

Dans cette section nous allons essayer d'extraire les différentes fonctions du système, en définissons surtout les interactions entre l'utilisateur et le système et l'environnement du système. À ces fins, nous utilisons le langage de modélisation UML pour définir 3 modèles de système :

- Diagrammes des cas d'utilisation : qui décrit les fonctionnalités du système du point de vue de l'utilisateur.
- Diagrammes de structure : qui décrit la structure du système en termes d'objets, d'attributs, d'associations et d'opérations.
- Diagramme de séquence : qui décrit le comportement interne et l'activité interne du système

III.5.1 Diagramme des cas d'utilisation

Dans le diagramme de la figure suivante, nous décrivons les interactions de l'utilisation avec la partie matérielle du système.

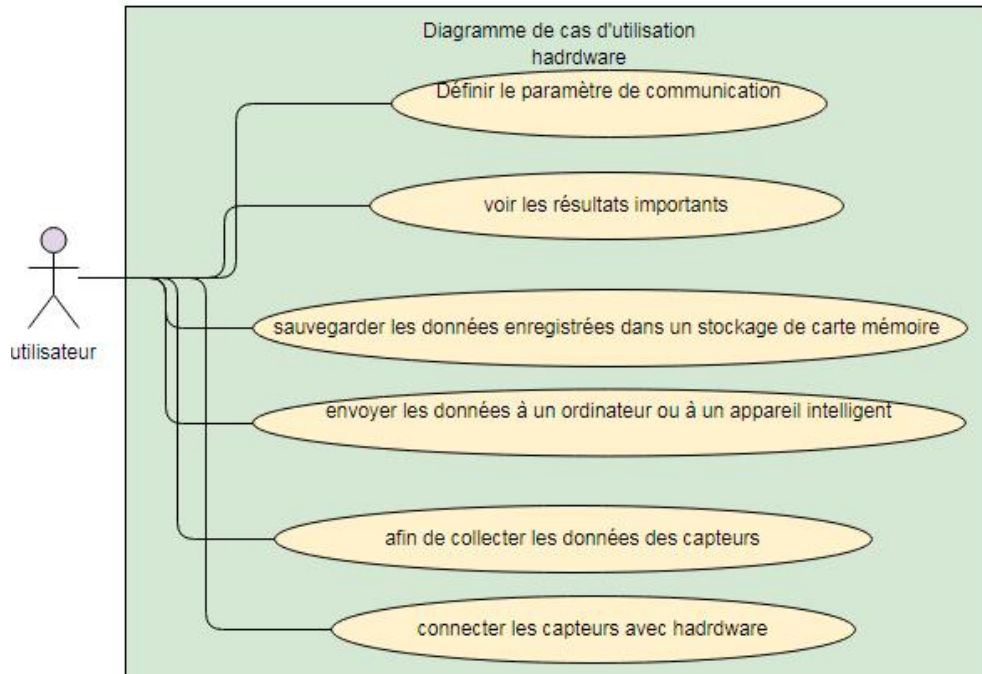


Figure III.2: Exemple de cas d'utilisation de la partie matérielle

Dans le diagramme de la figure suivante, nous décrivons les interactions de l'utilisation avec la partie logicielle du système.

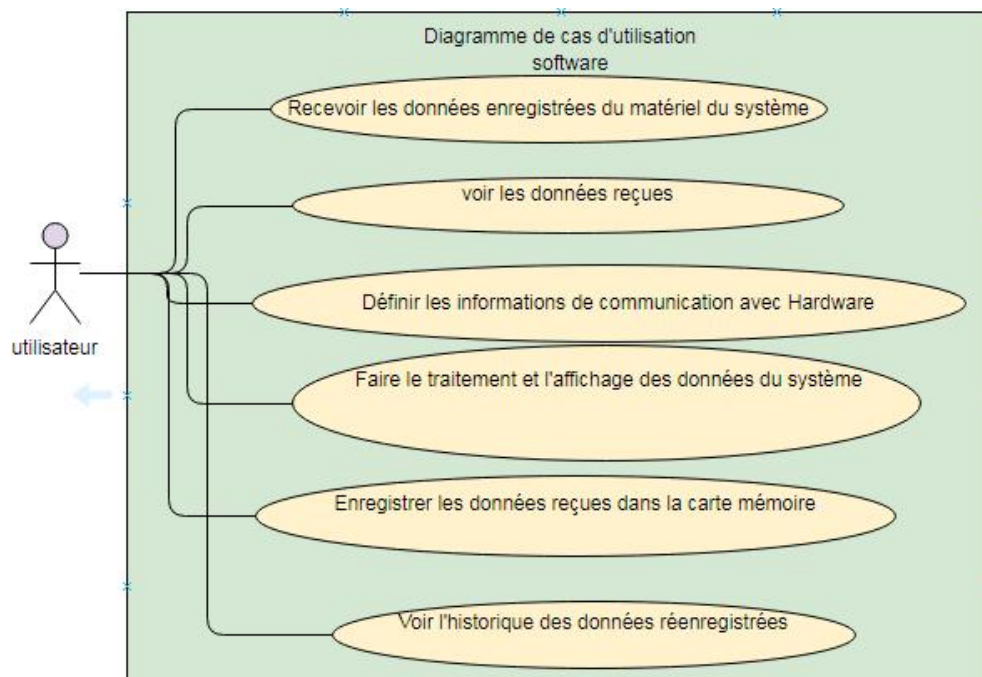


Figure III.3 : Exemple de cas d'utilisation de la partie logicielle

III.5.2 Diagramme des structures

A. Schéma fonctionnel du système

Cette section montre le schéma du système dans lequel les principales fonctions sont représentées par des blocs reliés par des lignes qui montrent les relations des blocs.

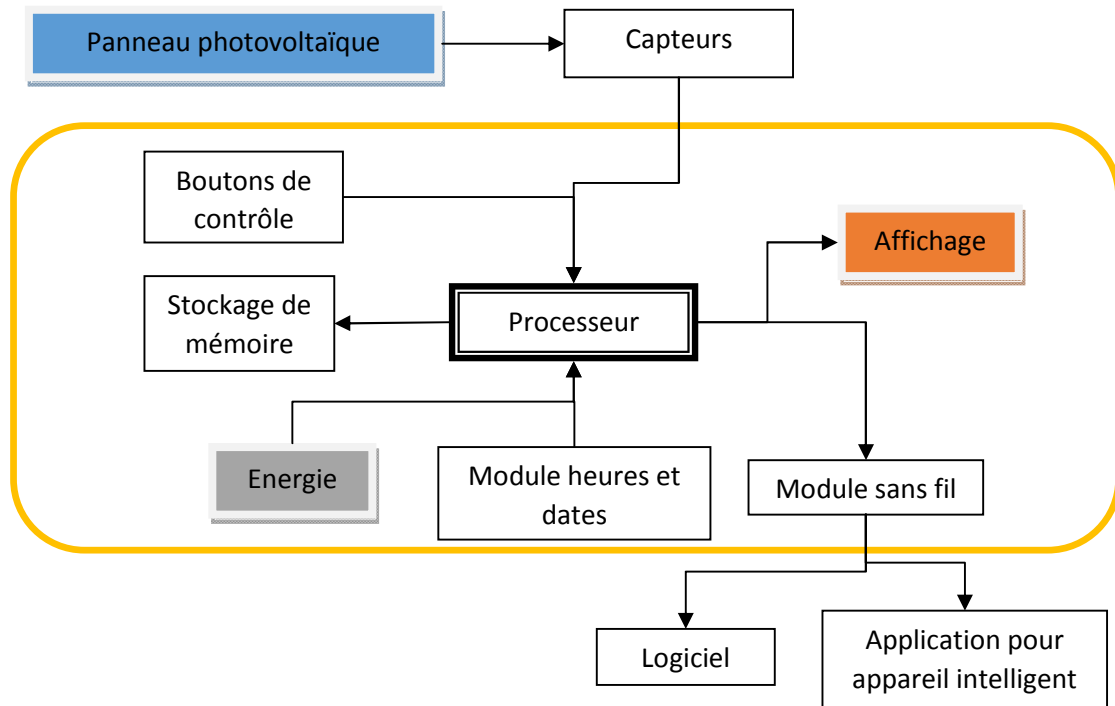


Figure III.4 : Schéma fonctionnel du système

Dans ce schéma bloc, le processeur est un élément de calcul qui permet de collecter les données nécessaires pour le fonctionnement du système, ensuite d'exécuter des algorithmes pour le traitement de ces données. Le choix de ce processeur dépend des besoins du système en termes de performances et de flexibilité. Cet élément de calcul peut être un microcontrôleur (tel que Arduino, ESP8266, ESP32...) ou un processeur (basé sur ARM par exemple) ou un circuit programmable de type FPGA.

L'appareil reçoit les commandes de l'utilisateur par les boutons d'entrée. L'utilisateur visualise les données et les informations sur écran ; il peut enregistrer les données dans une mémoire externe. Le module heure et date sert à obtenir l'heure et la date actuelles. En outre, le processeur envoie les données aux ordinateurs et aux appareils intelligents dans le module sans fil par sans-fil.

B. Schéma d'architecture du système

Dans cette section on propose une architecture physique du système. Comme montré dans la figure III.5, nous définissons dans cette architecture les éléments physiques du système ainsi que les relations entre les blocs internes de cette architecture.

L'architecture proposée permet d'identifier les éléments physiques du système, tels que les capteurs, les modules pour la communication sans-fil, une mémoire de stockage des données, une horloge temps réel RTC.

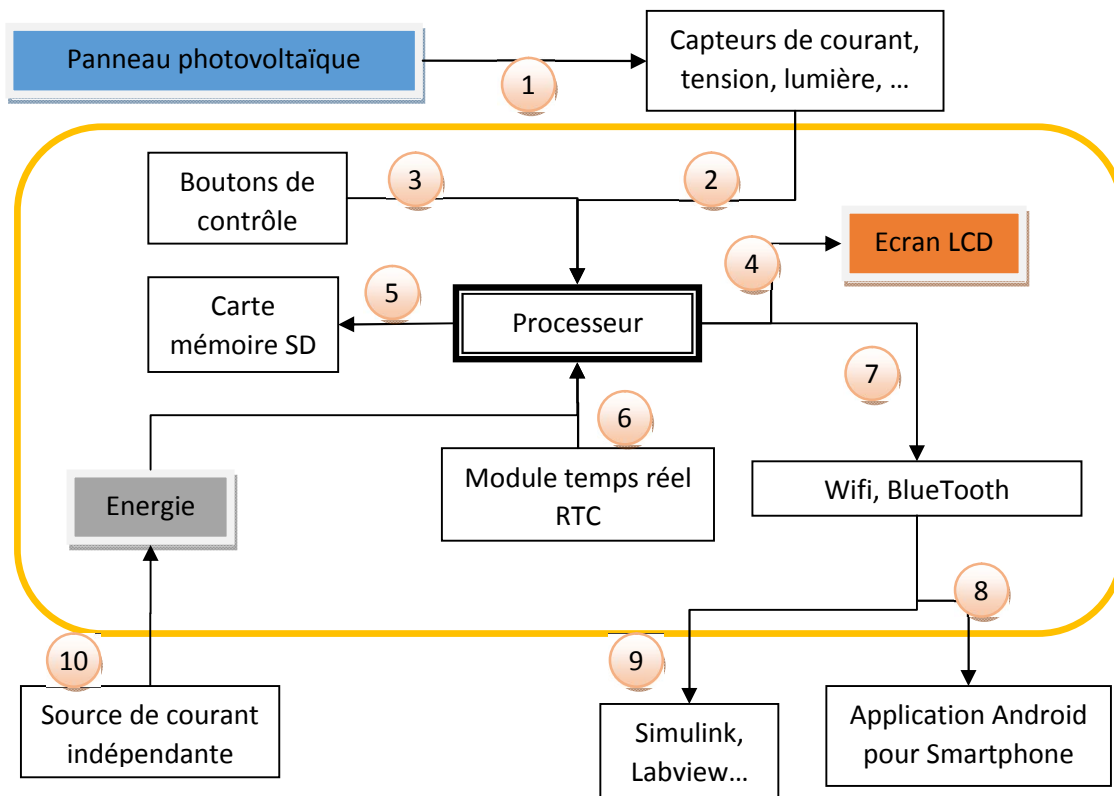


Figure III.5 : Schéma de l'architecture physique du système

Les relations entre les différents blocs de l'architecture montrent le flux des données entre les composants physiques du système, dans le tableau suivant nous détaillerons chaque ligne d'interface de l'architecture.

Tableau III.1 : Tableau du flux de données du diagramme d'architecture du système

<i>Ligne</i>	<i>Eléments de données</i>	<i>Descriptions</i>
1	Les rayonnements	Les valeurs des signaux provenant du module photovoltaïque.
2	Les signaux	Les valeurs des signaux provenant de l'ensemble des capteurs
3	Signaux de tension	Un signal de tension logique, si on est 1 ou off est 0, et 1 est 5 v ou 3,3 v et 0 est 0 v
4	Afficher les données	Un paquet d'informations indiquant sur quels écrans afficher, et avec quelles données remplir les champs
5	Paquet d'informations de données	Un paquet d'informations identifiant l'emplacement et les données où l'enregistrer dans le stockage de données externe
6	Données du temps	Un paquet d'informations identifiant la date et l'heure actuelles
7	Paquet d'informations de communication	Un paquet d'informations contenant les informations du serveur sans fil local ou les données qui seront envoyées au dispositif via le serveur local sans fil.
8,9	Données sans fil	Un paquet d'informations contenant les données qui sont envoyées par le matériel du système aux périphériques ont le logiciel du système
10	Puissance	Une source d'énergie qui alimente le système, où la tension et le courant doivent être compatibles avec les composants alimentés.

III.5.3 Diagramme des séquences

Cette section montre les interactions d'objets organisées en séquence temporelle. Nous devons l'utiliser car il montre la logique d'interaction entre les objets du système dans l'ordre temporel où les interactions ont lieu.

Un diagramme de séquence est une forme de diagramme d'interaction, ce qui montre que les objets comme des lignes de sauvetage réduisant la page. Les interactions représentées au fil du temps sont dessinées comme des connecteurs de message de la source *Ligne de Vie* à la *Ligne de Vie* cible. Les diagrammes de séquence sont bons pour montrer les objets qui communiquent avec d'autres objets. Et quels sont les messages qui déclenchent ces communications. Les diagrammes de séquence ne sont pas destinés à montrer la logique procédurale complexe

A. Partie matérielle

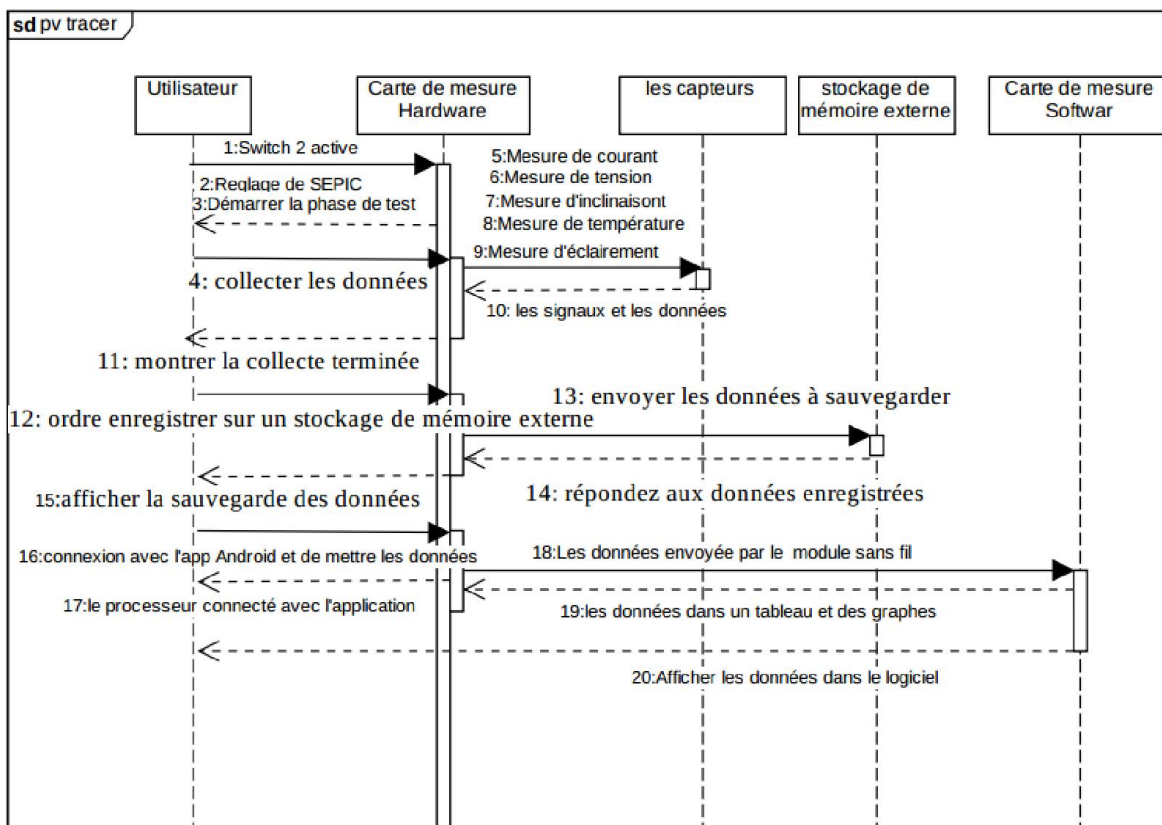


Figure III.6 : Diagramme des séquences de la partie matérielle du système

Graphiquement on représente un message synchrone par une flèche en traits pleins et à l'extrémité pleine partant de la ligne de vie d'un objet expéditeur et allant vers celle de l'objet cible comme on a déjà illustrée dans le diagramme de séquence.

Dans le système à concevoir, l'utilisateur appuie sur le Switch, l'opération démarre (Réglage du SEPIC et démarrage de la phase de test), après c'est le processeur qui envoie un message à la carte hardware pour colléte les données, la carte hardware envoie un message synchrone a l'objet "Capteurs" pour mesurer les grandeurs physiques. Après la mesure et la collection des données la carte hardware envoie un message de réponse au processeur. La deuxième partie dans notre diagramme c'est le stockage et la sauvegarde des données, comme montre dans la figure III.6 l'opération sera effectuée entre l'utilisateur est l'objet "Stockage en mémoire externe" et le troisième partie illustrées la connexion avec la partie intelligent du système et le processeur.

B. Partie logicielle

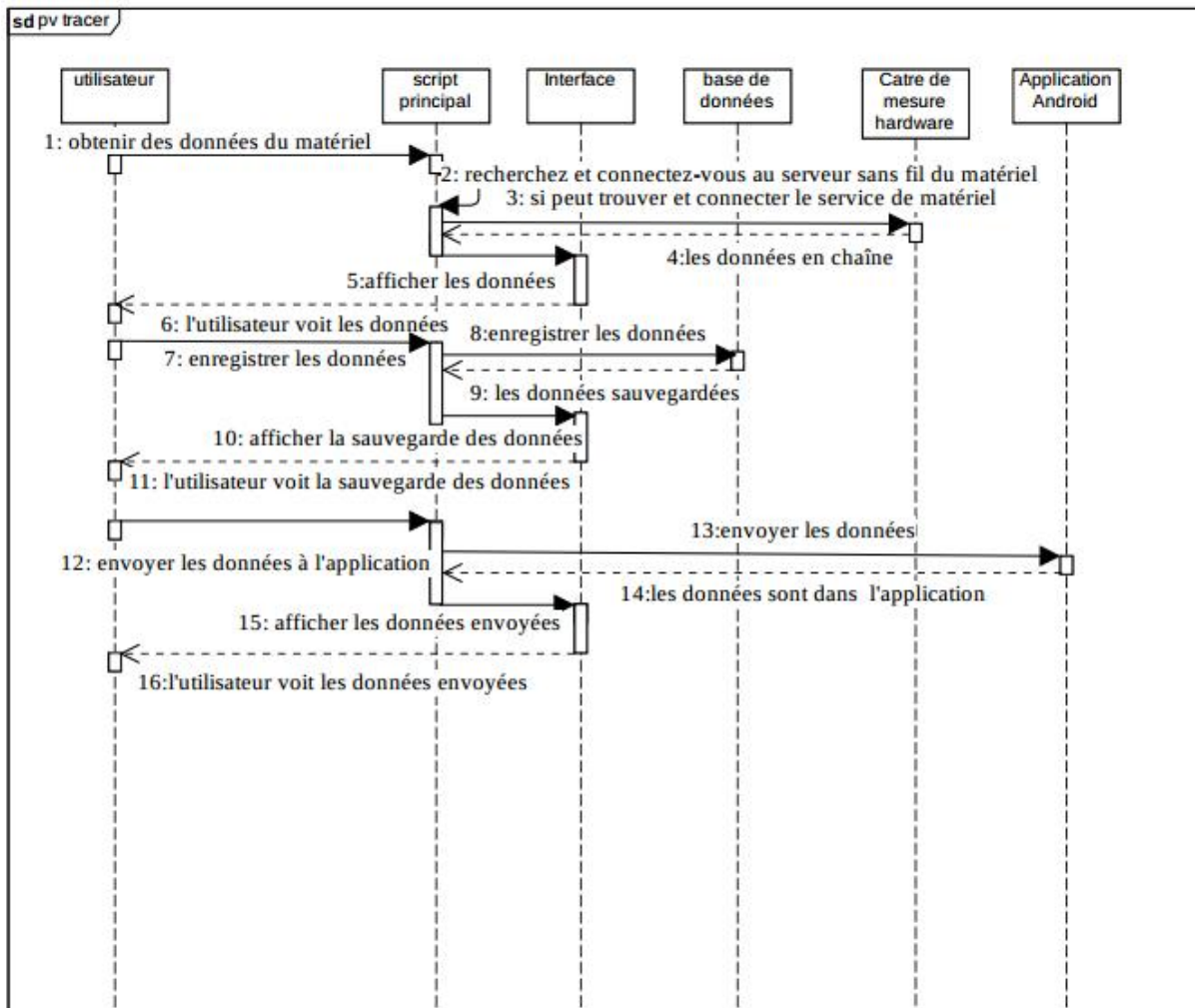


Figure III.7: Diagramme des séquences de la partie logicielle du système

La partie logicielle explique l'ensemble des opérations exécutées dans le système comme il est montré dans le diagramme.

La dimension verticale du diagramme représente le temps d'exécution des opérations, permettant de visualiser l'enchaînement des actions dans le temps, et de spécifier la naissance et la mort d'objets. Les périodes d'activité des objets de '1' jusqu'à '6' expliquent comment l'utilisateur communique et affiche les données qui sont symbolisées par des rectangles. Les messages de '7' à '11' permettent l'affichage et l'enregistrement des données de communication qui seront effectués entre l'acteur et les objets : main script, interface et données de base. Les messages entre '12' et '16' représentent la communication et l'envoi des données vers l'application Android.

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le concept général sur lequel se base le système, nous avons ainsi présenté les différents diagrammes qui montrent les principales fonctionnalités du système, ainsi que les éléments logiciels et matériels qui définissent l'architecture fonctionnelle et l'architecture physique du système. Ceci permet d'identifier les choix technologiques pour la mise en œuvre effective du système, avec ces deux composantes matérielle et logicielle.

CHAPITRE IV

Réalisation du système

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons faire la description du système qu'on veut réaliser, qui est un système embarqué de caractérisation de panneaux photovoltaïques. Le système est composé d'un module à microcontrôleur, d'un ensemble de capteurs, d'un convertisseur de puissance SEPIC et d'une application Android.

Ainsi, dans ce qui suit nous aborderons les étapes de mise en œuvre de notre projet, et les choix techniques que nous avons effectué.

IV.2 Description du système

Notre travail principal est de construire une carte de mesure à base des composants électronique et de capteurs pour tracer les caractéristiques des modules PV.

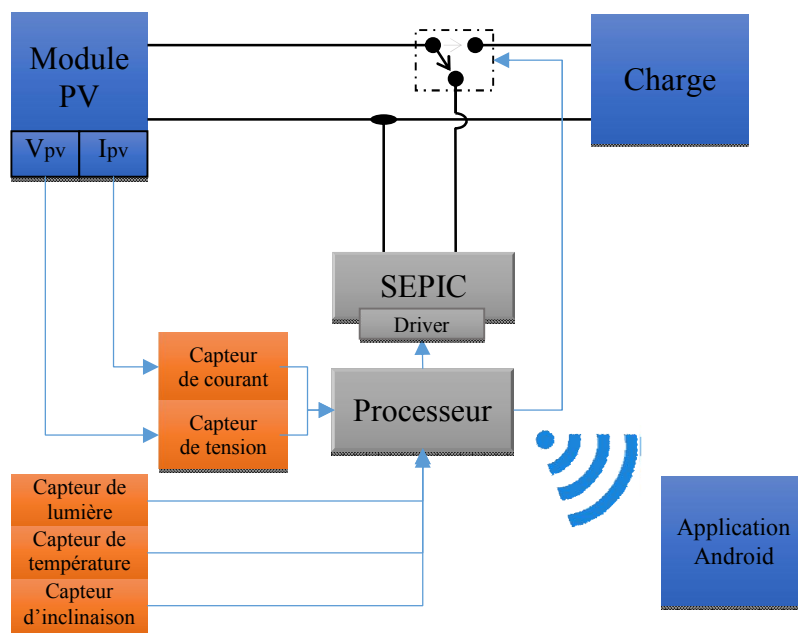


Figure IV.1 : Schéma synoptique du système

Le système que nous proposons est un système de caractérisation en ligne, qui permet de récupérer la caractéristique $I(V)$ d'un module PV sans le débrancher de sans installation. Pour ce faire, nous avons proposé le schéma de principe du système de mesure qui est illustré à la figure IV.1.

Le système est composé principalement d'un convertisseur de puissance continu/continu de type SEPIC implémenté avec des MOSFET de puissance, ainsi que son

circuit de commande de grille. Ainsi, qu'un module à base de microcontrôleur ESP32 et d'une carte de mesure avec des capteurs de tension et de courant. De manière générale, le système fonctionne comme suit : le convertisseur SEPIC émule une résistance dont la valeur est réglée à travers un contrôle adéquat du rapport cyclique du signal PWM de commande.

La carte de mesure est composée de 5 capteurs ;trois capteurs qui sont un capteur de température ,un capteur d'éclairement, un capteur d'inclinaison pour la mesure des paramètres de l'environnement, et deux capteurs pour la mesure du courant et de la tension de sortie du module PV, ces deux mesures sont nécessaires pour la reconstitution de la caractéristique I(V) du panneau photovoltaïque.

IV.2.1 Fonctions exécutées par le système

Les fonctions exécutées par le système sont décrites dans la représentation illustrée dans la figure IV.2.

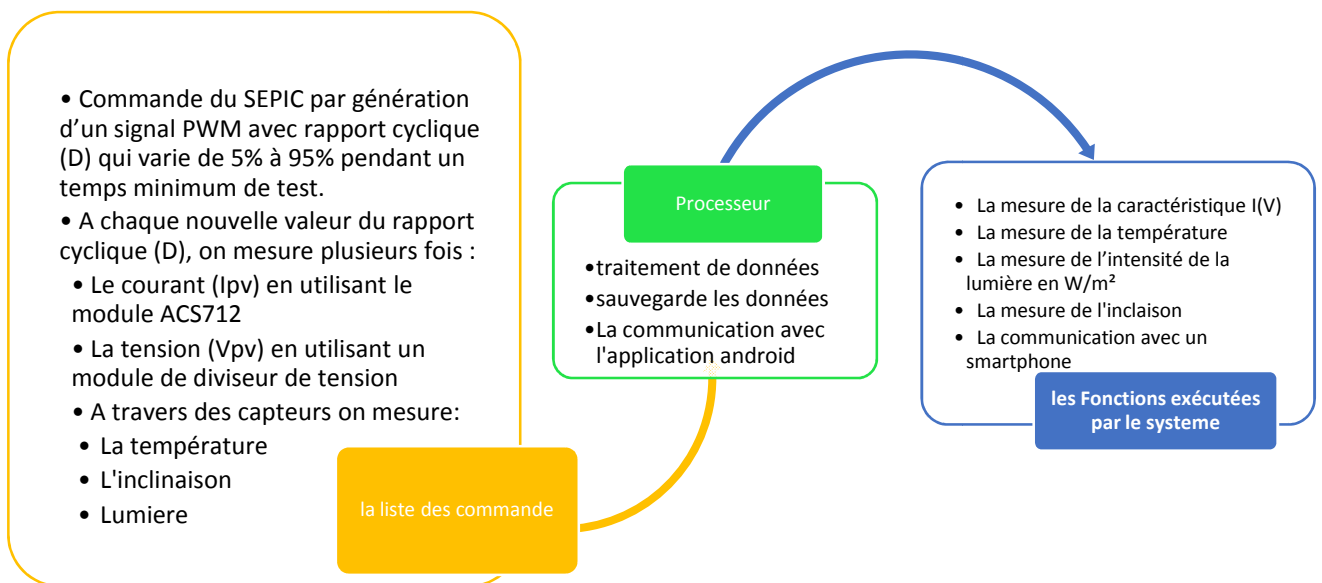


Figure IV.2 : Fonctions exécutées par le système

IV.2.2 Description des fonctionnalités du système

Comme illustré par le schéma synoptique de la figure IV.3. Le banc de mesure I-V des modules photovoltaïques est constitué de trois blocs principaux : Le premier bloc est constitué d'un bloc puissance : Convertisseur SEPIC + driver de MOSFET + charge. La seconde partie qui constitue l'étage de mesure : est composée par des circuits effectuant la mesure et l'adaptation des grandeurs du courant et de la tension constituant la caractéristique I-V ainsi

que la mesure de l'éclairement, d'angle inclinaison et la température du module au moment du test de caractérisation. La dernière partie est dédiée à l'acquisition des paramètres à mesurer, elle est constituée d'une carte à microcontrôleur du type ESP32 qui est connectée à une application Android, cette carte de ESP32 est utilisée comme interface d'entrées/sorties pour le déclenchement des tests et l'envoi des données à l'application Android.

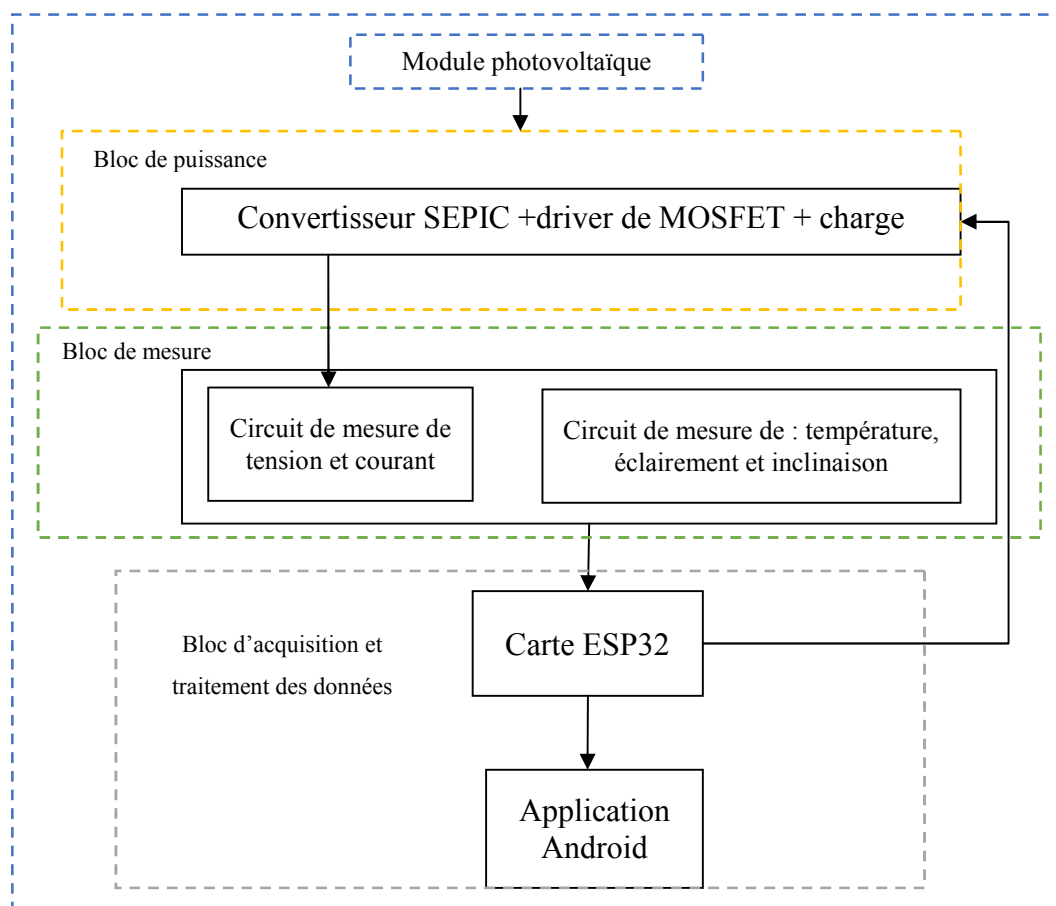


Figure IV.3 : Schéma synoptique du bloc de mesure

IV.3. Conception du bloc de puissance

Le bloc de la puissance utilisée est basé sur un convertisseur de puissance de type SEPIC avec son circuit de commande, plus une charge de type résistive.

IV.3.1 Principe de fonctionnement d'un convertisseur SEPIC

Un SEPIC est un convertisseur abaisseur-élevateur, mais il a l'avantage d'avoir la sortie non-inversée (la tension de sortie à la même polarité de la tension d'entrée), d'avoir une isolation entre l'entrée et la sortie (fournie par un condensateur en série) et un vrai mode d'arrêt : Lorsque l'interrupteur est éteint, sa sortie tombe à 0 volt

L'étude de ce type de convertisseur se fait en deux parties selon l'état de conduction de l'interrupteur de puissance K.

→ **De 0 à αT : Phase d'accumulation d'énergie**

On ferme l'interrupteur K.

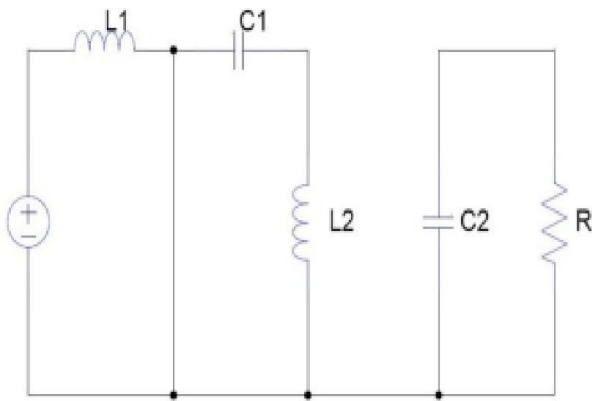


Figure IV.4 : SEPIC avec interrupteur fermé.

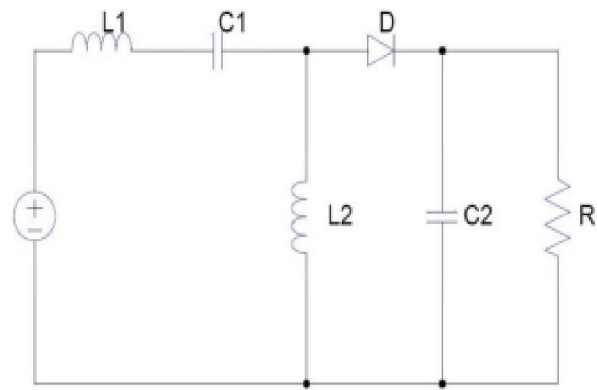


Figure IV.5 : SEPIC interrupteur ouvert

On applique aux bornes de l'inductance L1 la tension d'entrée V_e , le courant traversant L1 va augmenter linéairement, l'énergie est stockée dans L1. L'énergie contenue dans le condensateur C1 passe dans l'inductance L2, et celle du condensateur C2 vers la charge. La tension est maintenue constante par le condensateur C2 (Figure IV.4)

→ **De αT à T : Phase de roue libre**

On ouvre l'interrupteur K, ainsi la diode D se met à conduire. L'énergie emmagasinée dans l'inductance L1 est restituée dans le condensateur C1. L'énergie dans L2 est transférée vers C2 (Figure IV.5).

IV.3.2 Dimensionnement du convertisseur SEPIC

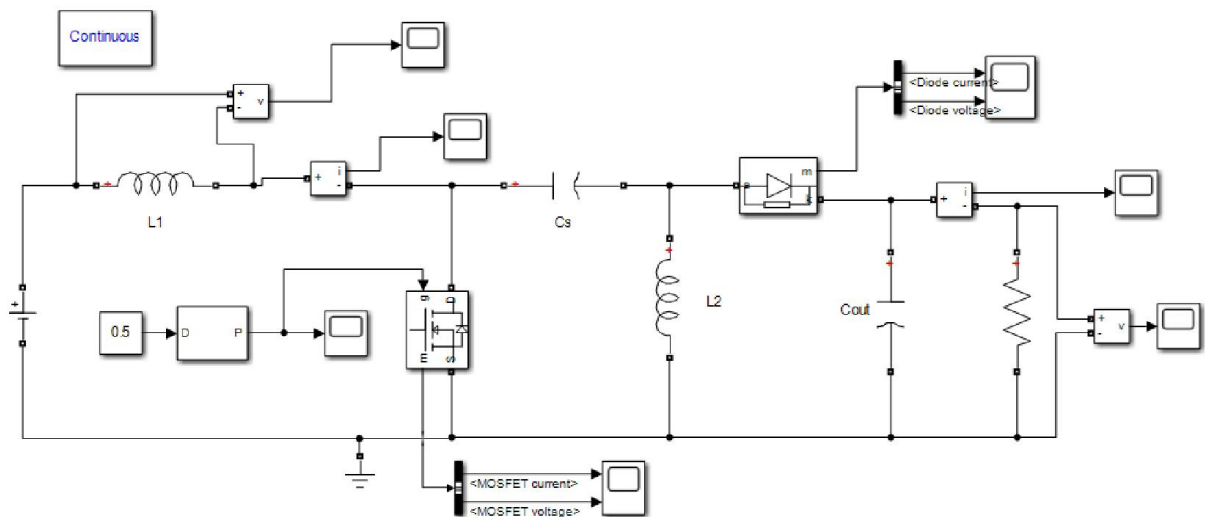
Dans le tableau suivant nous décrivons les différentes formules qui permettent de dimensionner les différents éléments du hacheur SEPIC utilisé.

Tableau IV.1 : Dimensionnement d'un hacheur SEPIC

	L'équation mathématique	Les variables impliquées
Rapport cyclique	$\alpha = \frac{V_e + V_d}{V_e + V_s + V_d}$	Ve : la tension d'entrée Vs : la tension de sortie et Vd : la tension de seuil de la diode
Inductances	L'ondulation de courant $\Delta I_L = I_{IN} \times 40\% = I_{OUT} \times \frac{V_{out}}{V_{in}} \times 40\%$ Le courant crête $I_{L1} = I_{OUT} \times \frac{V_{out} + V_d}{V_{in}} \times \left(1 + \frac{40\%}{2}\right)$ $I_{L2} = I_{OUT} \times \left(1 + \frac{40\%}{2}\right)$	L : la bobine Iout : courant de sortie Iin : courant d'entrée Vin : tension d'entrée Vout : tension de sortie
Condensateur de couplage	Le courant efficace $I_{C1} = I_{OUT} \times \sqrt{\frac{V_{out} + V_d}{V_{in}}}$ La tension crête $\Delta V_{C1} = \frac{I_{out} \times \alpha_{max}}{C1 \times f}$	C1 le condensateur
Condensateur de filtrage	$C2 = \frac{I_{out} \times \alpha_{max}}{V_{ripple} \times 0.5 \times f}$	Iout le courant dans la charge, V _{ripple} l'ondulation de tension. Le condensateur C2 à la sortie du convertisseur SEPIC
Le transistor de puissance	Le courant efficace $I_{K(rms)} = I_{out} \sqrt{\frac{(V_{OUT} + V_{IN(min)} + V_D) \times (V_{OUT} + V_D)}{V_{IN}^2}}$	IK(peak) : courant crête
La diode de puissance	La diode possède les mêmes contraintes que le transistor $I_{D(peak)} = I_{K(peak)}$ $V_D = V_{IN(max)} + V_{OUT(max)}.$	VD tension inverse de diode

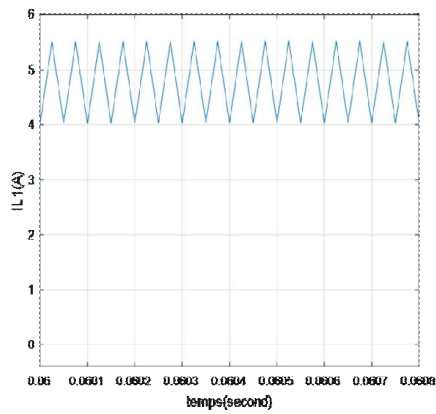
IV.3.3 Vérification du dimensionnement du SEPIC

Pour simuler le fonctionnement de l'hacheur SEPIC nous avons utilisé Matlab/Simulink system pour nous rapprocher du fonctionnement réel et vérifier le dimensionnement, avec $D=50\%$ ce qui est présenté par la figure (IV.6) avec afficher les résultats des courant et tension d'un composant SEPIC.

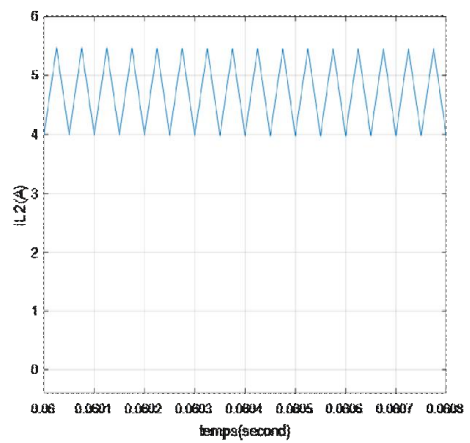


FigureIV.6 :Schéma du hacheur SEPIC réalisé dans Simulink.

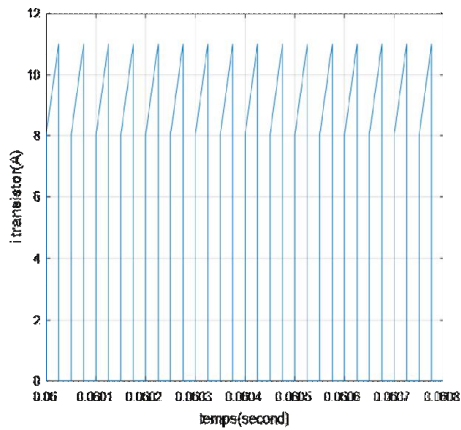
Les résultats montrés dans la figure IV.7valide les limites des courants dans les composants du SEPIC et de ce fait valideles valeurs calculées de ces valeurs de ces composants.



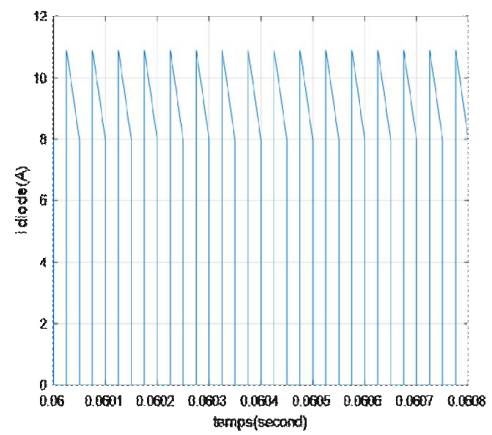
Courant aux bornes de bobine L1



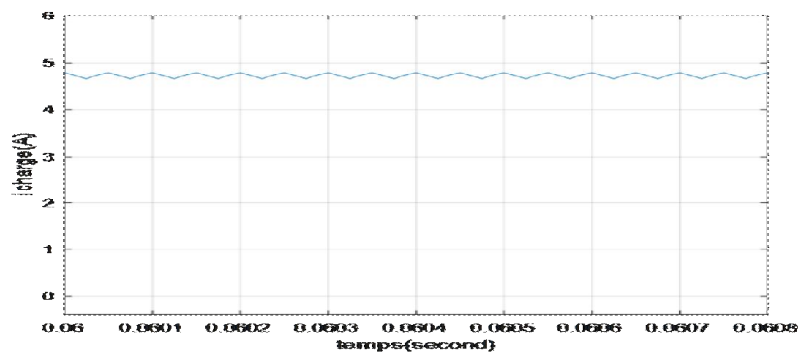
Courant aux bornes de bobine L2



Courant traversant le transistor



Courant dans la diode



Le courant dans la charge

Figure IV.7 : Représentation des résultats de simulation.

IV.4 Simulation du système

Dans cette partie, nous présenterons les simulations du SEPIC + Module PV pour le traçage des courbes caractéristique, afin de valider notre le bon fonctionnement du système.

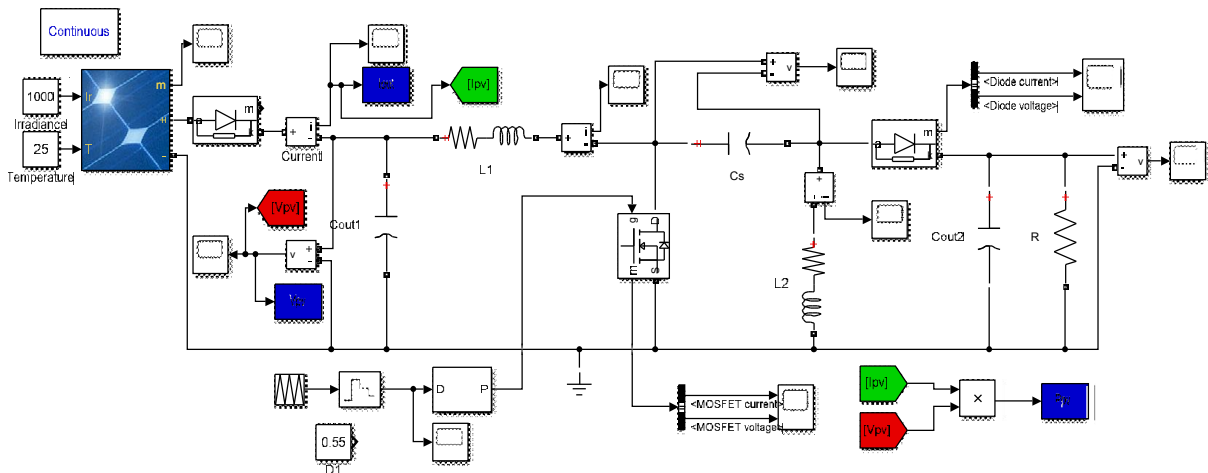


Figure IV.8 :Schéma fonctionnel sous Simulink pour le caractérisateur

Pour ce faire, nous avons générer le rapport cyclique de 2% à 98% ce qui permet de récupérer le maximum des points des courbes caractéristiques. Cependant, il est important de choisir le temps que dure le balayage de toute la courbe et le temps nécessaire pour stabiliser une valeur su rapport cyclique. Nous avons choisi un temps total de balayage de 100ms avec un pas de 200 μ s ce qui représente un nombre de point de 250 points, ce qui est largement suffisant pour récupérer les courbes caractéristiques des module PV.

Dans les figures IV.9 et IV.10 nous représentant un exemple de courbes caractéristiques I(V) et P(V), après reconstitutions des courants est des tensions mesurées.

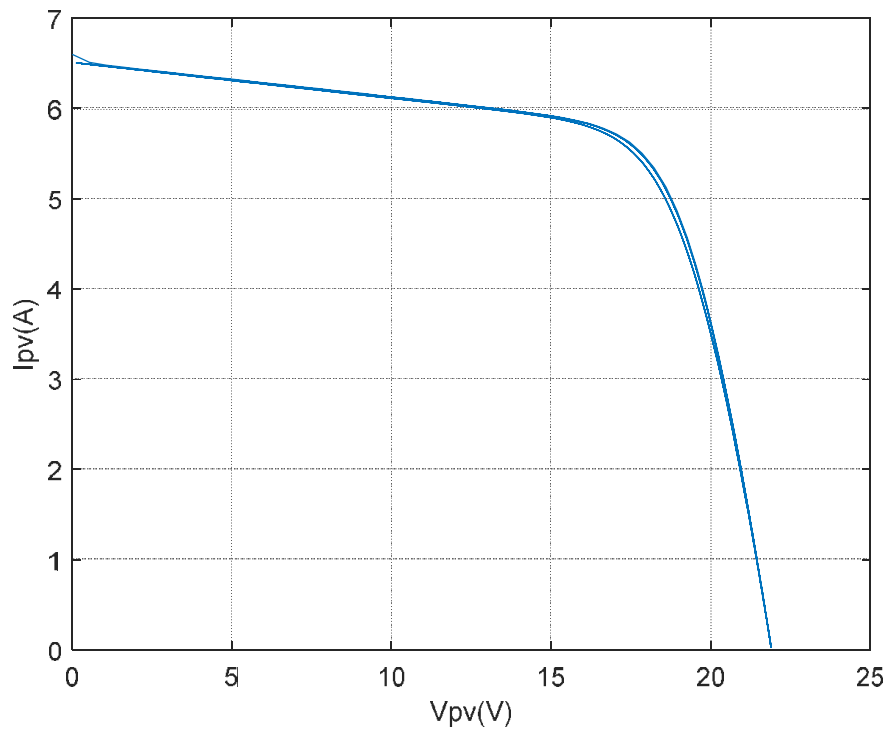


Figure IV.9 : Caractéristique I-V reconstituée pour le module photovoltaïque.

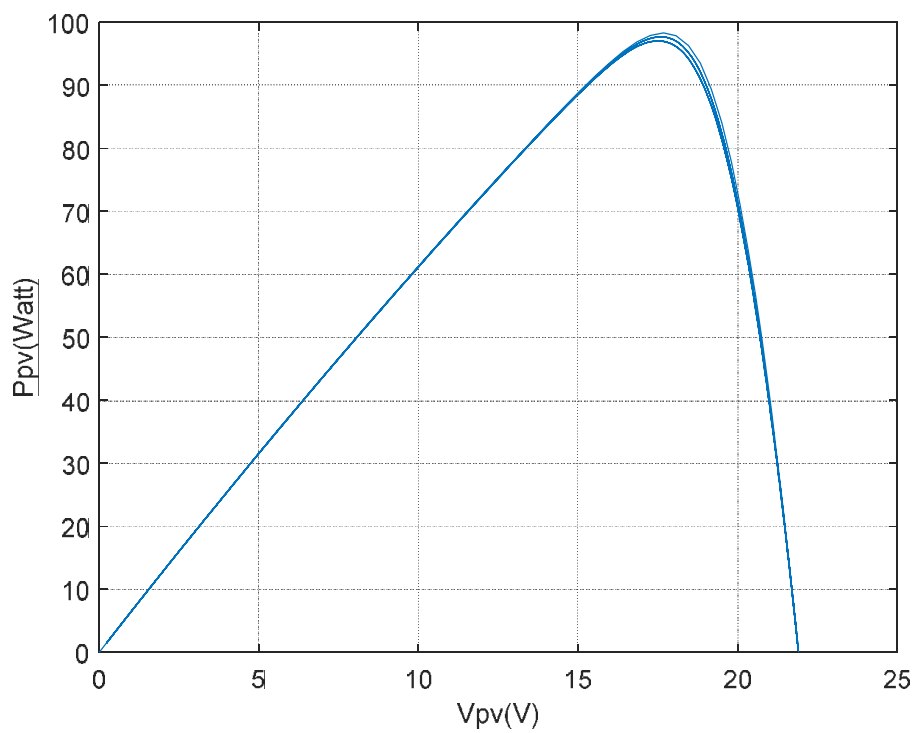


Figure IV.10 : Caractéristique P-V reconstituée pour le module photovoltaïque.

IV.5. Composants matériels du système

IV.5.1 Le driver pour MOSFET

Lors de la commande du convertisseur de puissance SEPIC, nous avons besoin d'un signal PWM puissant et qui adapté pour l'amorçage des MOSFET. Comme beaucoup de microcontrôleur celui que nous allons utiliser ne peut commander le MOSFET, la résolution de ce problème se fait en ajoutant un amplificateur pour l'objectif d'atteindre le seuil de la conduction, on propose le driver IR2104.

Le IR2104 est un de driver haute tension et haute vitesse pour la commande des MOSFET et IGBT avec des canaux de sortie dépendants, côté haut et côté bas. L'entrée logique est compatible avec les sorties standard CMOS ou LSTTL, jusqu'à un niveau logique de 3,3V. Les pilotes de sortie comportent un étage de tampon de courant à impulsions élevées conçu pour une conduction transversale minimale du conducteur. Le canal flottant peut être utilisé pour piloter un transistor MOSFET ou IGBT de puissance à canal N dans la configuration côté haut qui fonctionne de 10 à 600 volts.

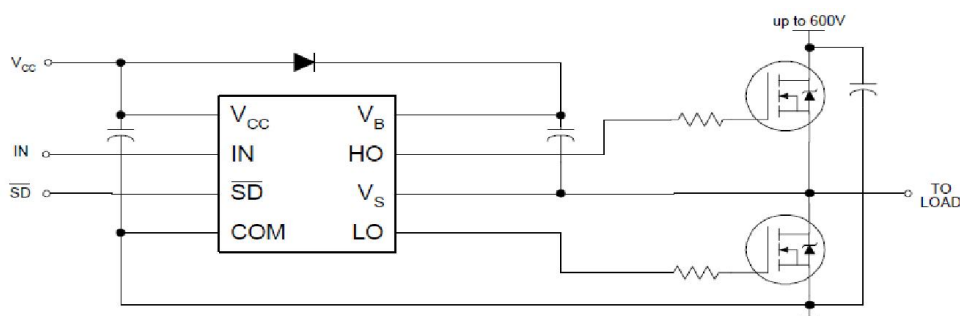


Figure IV.11 : Schéma de connexion d'un driver IR2104

Spécification

- Nombre de circuits d'attaque 2
- Type de grille IGBT, MOSFET à canal N
- Alimentation en tension 10 V ~ 20 V
- Tension logique – V_L, V_H 0,8 V, 3 V
- Courant de sortie de crête (source, réception) 210 mA, 360 mA
- Type d'entrée sans inversion
- Côté haut potentiel – max (amorçage) 600V
- Temps de montée / descente (typ.) 100 ns, 50 ns

IV.5.2 Bloc de Mesure

IV.5.2.1 Mesure du courant et de la tension

Le courant et la tension mesurés sont les données essentielles pour la caractérisation. Ils sont utilisés reconstituer la caractéristique $I(V)$ et de déduire la caractéristique $P(V)$. Ces mesures peuvent être utilisées pour la détection de défauts ou pour simplement tester le bon fonctionnement d'un GPV.

A. Capteur de courant

Les capteurs de courant ACS712 proposés sur Internet sont conçus pour être facilement utilisés avec des microcontrôleurs comme l'Arduino. Ces capteurs sont basés sur la puce Allegro ACS712ELC. Ces capteurs de courant sont proposés avec des valeurs de pleine échelle de 5 A, 20 A et 30 A. Le fonctionnement fonctionnel de base de chacun de ces appareils est identique. La seule différence est avec le facteur d'échelle à la sortie comme détaillé ci-dessous.

Tableau IV.2 : Caractéristiques des capteurs de courant ACS712

	5A Module	20A Module	30A Module
Supply Voltage (VCC)	5Vdc Nominal	5Vdc Nominal	5Vdc Nominal
Measurement Range	-5 to +5 Amps	-20 to +20 Amps	-30 to +30 Amps
Voltage at 0A	VCC/2 (nominally 2.5Vdc)	VCC/2 (nominally 2.5Vdc)	VCC/2 (nominally 2.5VDC)
Scale Factor	185 mV per Amp	100 mV per Amp	66 mV per Amp
Chip	ACS712ELC-05A	ACS712ELC-10A	ACS712ELC-30A

Cette carte de capteur de courant est basée sur la puce de capteur de courant à effet Hall bidirectionnelle Allegro ACS712ELCTR-20A qui détecte les courants circulant positifs et négatifs dans la plage de moins 20 ampères à 20 ampères positifs. La carte fonctionne à 5 V CC et le flux de courant à travers le capteur est converti en une tension de sortie commençant à $1/2 V_{cc}$ (ou 2,5 V) pour aucun flux de courant et monte de 100 mV par ampère pour le courant positif ou de -100 mV par ampère pour le négatif actuel.

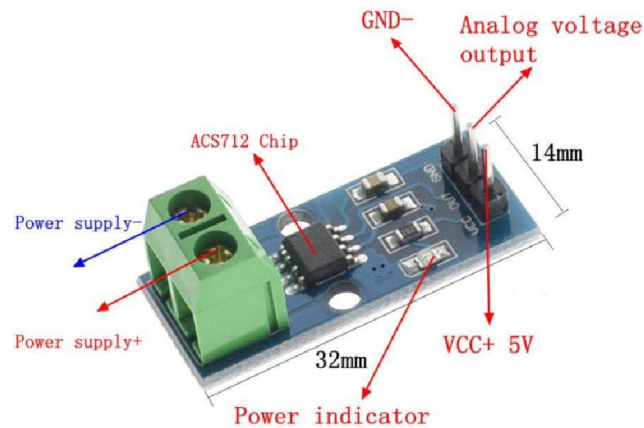


Figure IV.12 : Capteur de Courant ACS712 20A

Fonctionnalités

- Nouveau module de capteur de courant ACS712 de la gamme 20A pour Arduino
- Puce de capteur de courant : ACS712ELC-20A
- Alimentation Pin 5V, indicateur d'alimentation embarqué
- Le module peut mesurer les 20A positifs et négatifs, correspondant à la sortie analogique 100mV / A
- La tension de sortie est $VCC / 2$
- Bande passante de 80 kHz,
- 1,5% d'erreur de sortie à 25 degrés °C,
- 1,2mOhm résistance du conducteur interne,
- La tension de sortie proportionnelle aux courants AC ou DC

B. Capteur de tension

Nous allons utiliser pour la mesure de tension un module préfabriqué qui est composé d'un simple diviseur de tension.

La tension qu'on doit mesurer qui est généré par le GPV est d'un maximum de 23V, nous allons utiliser un microcontrôleur qui dispose déjà d'un convertisseur analogie-numérique, et qui n'accepte que des valeurs de tension inférieure à 5V, c'est pour cette raison qu'on utilise un diviseur de tension qui permet d'adapté la tension du GPV à la tension max accepté par le microcontrôleur.

Les tensions du diviseur sont reliées à la tension d'alimentation de 5V et à la masse d'un côté et à deux résistances de $R1=30k\Omega$ et $R2=7.5k\Omega$ d'un autre côté Figure IV.17.



Figure IV.13 : Capteur de tension.

IV.5.2.2 Mesure de la température

Les données de température peuvent être acquises en utilisant des capteurs de températures, de multitude de types de capteurs sont utilisé pour la mesure de la température des panneaux solaire. Des thermocouples ou des capteurs à semi-conducteur sont le plus souvent utilisés. Nous avons choisi d'utiliser un capteur à thermocouple de type K avec un circuit électronique de compensation MAX6675.

Le circuit intégré MAX6675 est utilisé pour mesurer une température de 0 ° C à 1024 ° C en utilisant n'importe quel microcontrôleur, car le MAX6675 transmet les données numérisées via une interface SPI. Le MAX6675 possède un circuit d'amplification un compensateur de jonction froide et un convertisseur analogique-numérique sur 12bits.

Ce capteur de température max6675 est adapté pour notre projet. Ce capteur peut mesurer les températures élevées avec une très faible résolution mais avec une grande précision. Le tableau ci-dessous résume les principales caractéristiques de ce circuit.

Tableau IV.3 : Caractéristiques du capteur Max6675

Paramètre	Value
Puissance	3.0V ~ 5.0V
Gamme	0°C to 1024°C
Résolution binaire	12 bits
Précision(20°C to 80°C)	±3°C
Résolution	0.25°C
Courant consommé	1.5mA

La figure IV.14 illustre le module MAX6675 avec une sonde thermocouple de type K.

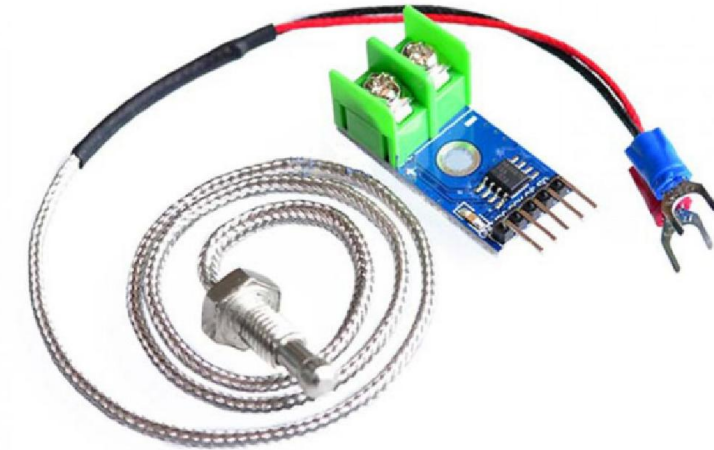


Figure IV. 14 : Carte d'un capteur de température MAX6675.

IV.5.2.3. Mesure de l'éclairement

Pour la conception de notre projet nous pouvons utiliser des capteurs qui transforment la quantité de lumière reçue en un signal électrique

Capteur de lumière OPT101

OPT101 est une photodiode monolithique avec amplificateur de trans-impédance sur puce. La tension de sortie augmente linéairement avec l'intensité de la lumière. L'amplificateur peut être utilisé en mode d'alimentation simple ou double, ce qui en fait un fonctionnement idéal ou avec batterie. La photodiode est utilisée en mode photoconducteur pour une excellente linéarité et un faible courant d'obscurité.



FigureIV.15 : Capteur de lumière OPT101.

IV.5.2.4 Mesure d'inclinaison

Dans notre projet on utilise un gyroscope MPU6050 pour détecter l'inclinaison de notre panneau photovoltaïque. Le module MPU-6050 combine un gyroscope à 3 axes et un accéléromètre à 3 axes permettant des mesures indépendantes, mais basées sur les mêmes axes, ce qui permet d'éliminer les problèmes d'erreurs entre axes lors de l'utilisation de dispositifs séparés.

Spécifications du capteur :

- Tension d'alimentation : 2,3 – 3,4 V
- Consommation : 3,9 mA maxi
- Accéléromètre :
 - Plages de mesure : ± 2 g ± 4 g ± 8 g ± 16 g
 - Tolérance de calibration : $\pm 3\%$
- Gyroscope :
 - Plages de mesure : $\pm 250/500/1000/2000$ °/s
 - Tolérance de calibration : $\pm 3\%$
- Interface I2C
- Capteur de température intégré
- Température de service : -40°C à $+85^{\circ}\text{C}$
- Dimensions : 25,5 x 15,2 x 2,48 mm

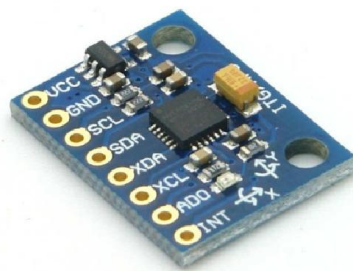


Figure IV.16 : Un gyroscope MPU6050.

IV.5.3. Bloc d'acquisition et traitement de données

Cet étage est constitué d'une carte d'entrée/sorties de type ESP32 utilisée comme interface entre les cartes de mesure et un pc dans lequel est implémenté un programme permettant de piloter la carte interface pour déclencher les tests de mesures et leur acquisition.

IV.3.3.1. Présentation de L'ESP32

Les caractéristiques de L'EPS32

Module basé sur un ESP32 cadencé à 240 MHz et exécutant le Firmware open source NodeMCU. Cette carte se programme via l'IDE Arduino et est compatible avec les scripts LUA.

Le microcontrôleur ESP32 dispose d'une interface Wifi et d'une interface Bluetooth idéales pour les objets connectés. Des connecteurs latéraux mâles et femelles permettent d'enficher le module sur une plaque de montage rapide. L'interface sans-fil Wifi permet la création de point d'accès sans fil, l'hébergement d'un serveur, la connexion à internet et le partage des données par exemple.

Le module se programme directement à partir de l'IDE Arduino (installation d'une extension nécessaire) et nécessite un cordon microUSB. Son implantation le rend compatible avec les plaques de connexions rapides.

Caractéristiques

- Alimentation :
 - 5 Vcc via micro-USB
 - 3,3 Vcc via broches Vin
- Microcontrôleur : ESP32
- Processeur : Tensilica LX6 Dual-Core
- Fréquence : 240 MHz
- Mémoire SRAM: 512 kB
- Mémoire Flash: 4 Mb
- 10 E/S digitales compatibles PWM
- Interfaces: I2C, SPI, UART, DAC, ADC
- Interface Wifi 802.11 b/g/n 2,4 GHz
- Bluetooth : Classique / BLE

- Antenne intégrée.
- Température de fonctionnement : -40 à 125 °C
- Dimensions : 48 x 26 x 11,5 mm.

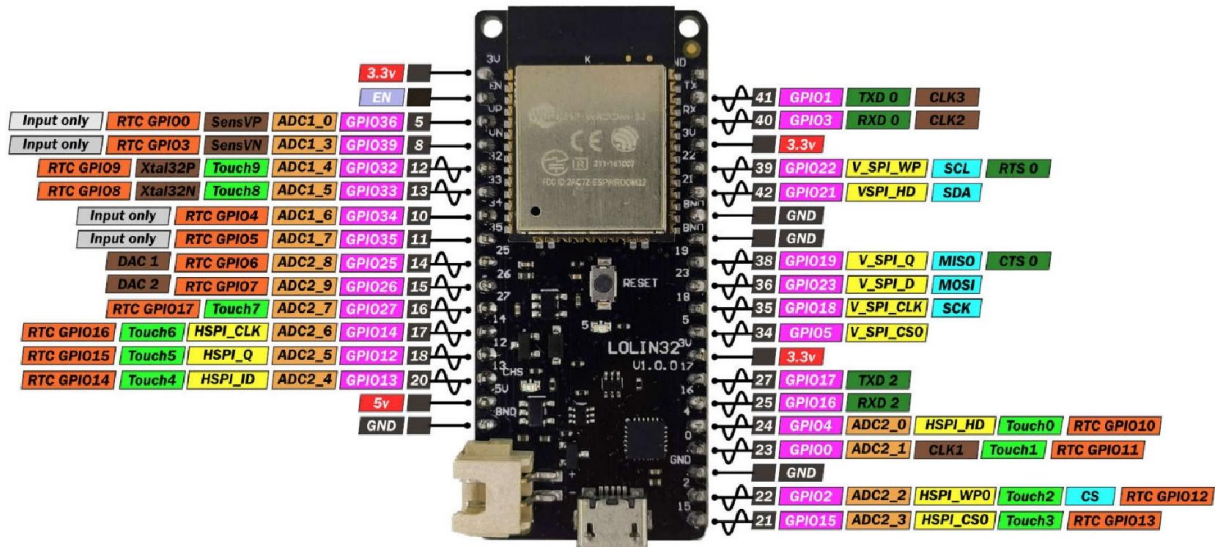


Figure IV.17 : Module ESP32 Lolín32 avec les illustrations des E/S

IV.6. Simulation Proteus/ISIS

Pour valider le fonctionnement du caractériser de module photovoltaïque nous allons exécutés plusieurs simulations en utilisant le simulateur de système électronique Proteus ISIS. Mais avant tout, il faut fixé l'algorithme et le programme qui s'exécuteront sur la carte ESP32 pour commander le caractériser.

Remarque :

Pour les besoins de la simulation, nous remplaceronsle module ESP32par une carte Arduino Nano, étant donné queL'ESP32 n'est pas encore intégré dans la bibliothèque des composants simulable de Proteus. Ce remplacement est possible parce que le fonctionnement d'un programme avec Arduino nano est similaire qu'avec l'ESP32.

IV.6.1. Schéma du système électronique

L'architecture que nous avons utilisé pour la conception du caractériser de module PV est représentée sur la figure IV.18, nous pouvons résumer la structure de cette architecture en cinq parties :

- Partie module photovoltaïque : un modèle mathématique est utilisé pour reproduire le fonctionnement et les caractéristiques du module PV choisi.
- Partie puissance : Convertisseur SEPIC + driver de MOSFET + charge résistive.
- Partie mesure : Capteur de courant (ACS712) + capteur de tension (diviseur de tension) + capteur de lumière + capteur de température + capteur d'inclinaison.
- Partie contrôleur : Carte Arduino Nano.
- Partie Interface : Afficheur LCD + module sans fils (Wi-Fi).

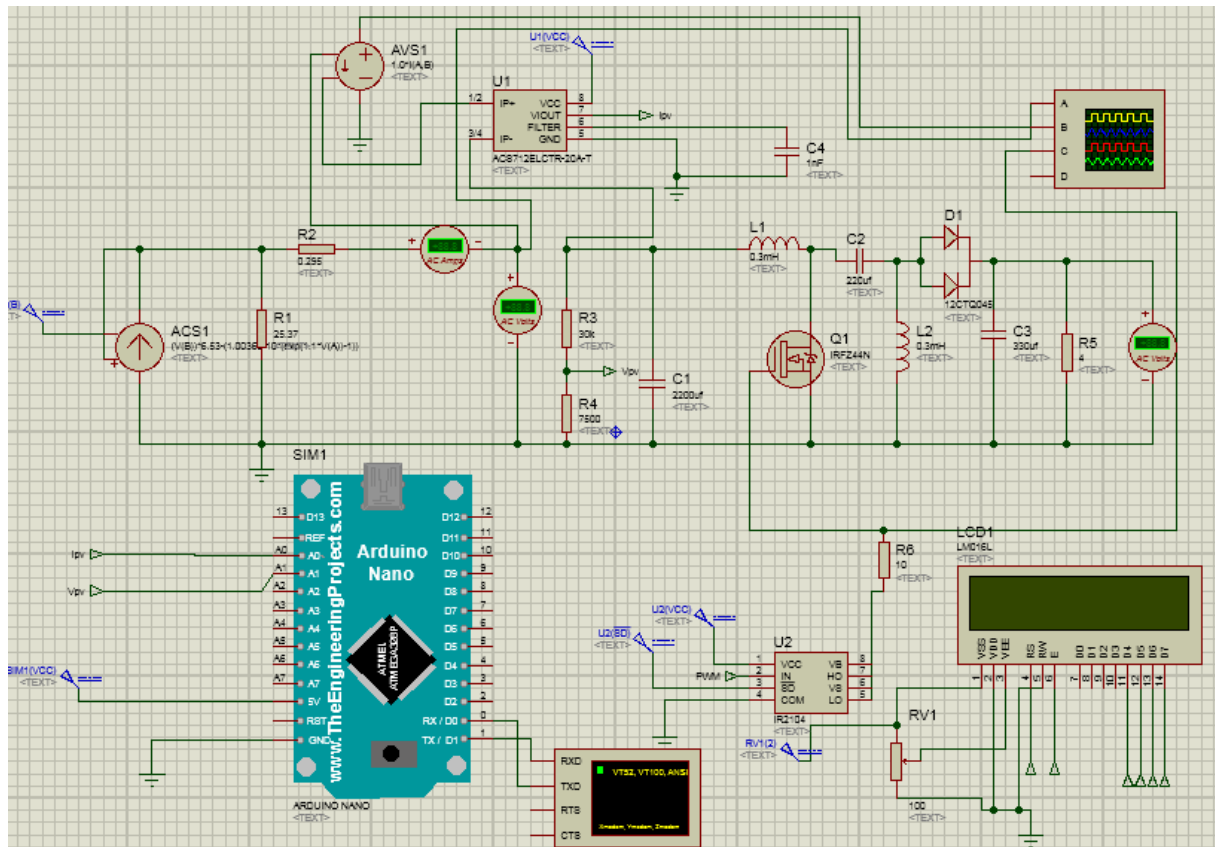


Figure IV.18 : Schéma Proteus du testeur de module PV

IV.6.2. La réalisation du programme de commande avec ESP32

Cet organigramme permet de reproduire avec une carte ESP32 les résultats que nous avons obtenus avec la simulation par Simulink. Il permet de générer un signal PWM avec un cycle bien défini et des temps d'établissement adéquat pour permettre des mesures correctes est rapide.

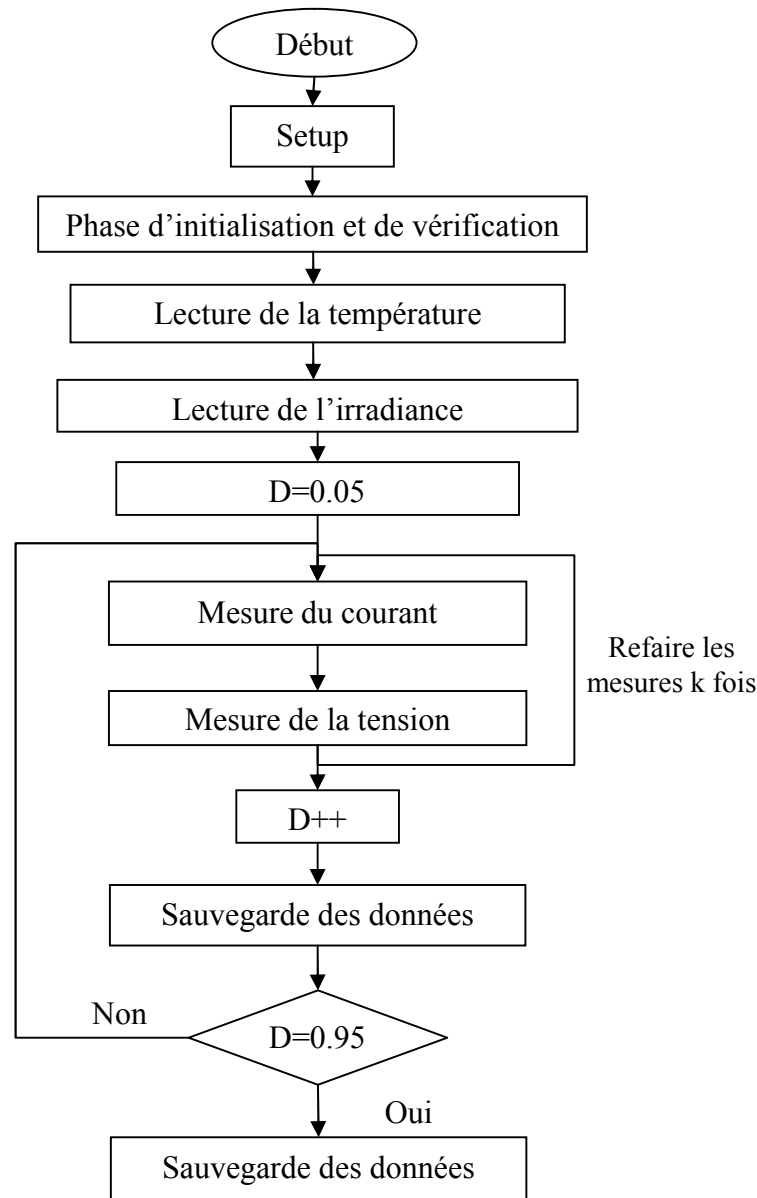


Figure IV.19 : Organigramme du fonctionnement du caractériser de panneaux photovoltaïques.

IV.6.3. Résultats de simulation

Pour effectuer les simulations nécessaires afin de valider le fonctionnement du système, nous devons utiliser le schéma illustré dans la figure IV.18 et nous devons programmer la carte ESP32 avec un programme C++ qui reprend les le fonctionnement et le comportement de l'organigramme déjà présenté.

Nous avons fixé 3 paramètres que nous pouvons variés afin d'avoir les meilleures performances, à savoir : le délai entre chaque variation du rapport cyclique, le pas de variation du rapport cyclique ($D \in [0, 255]$),

❖ **Simulation 1** : • Fréquence PWM = 32kHz • délai = 10ms • Pas=5ms

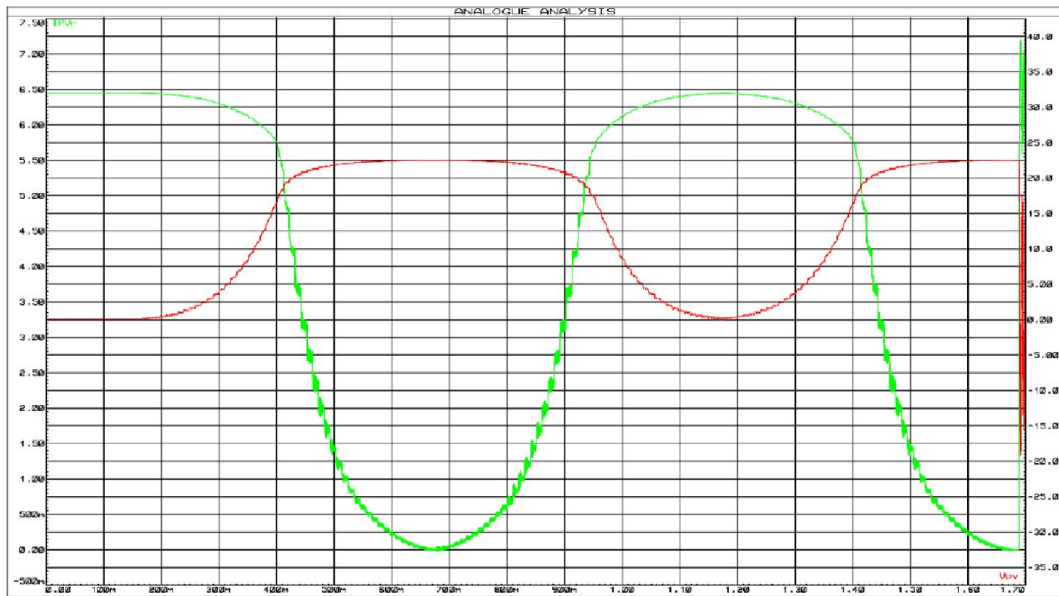


Figure IV.20 : Allure du courant I_{pv} et tension V_{pv} pour Sim1

❖ **Simulation 2** : Fréquence PWM = 32kHz • délai = 1ms • Pas=1ms

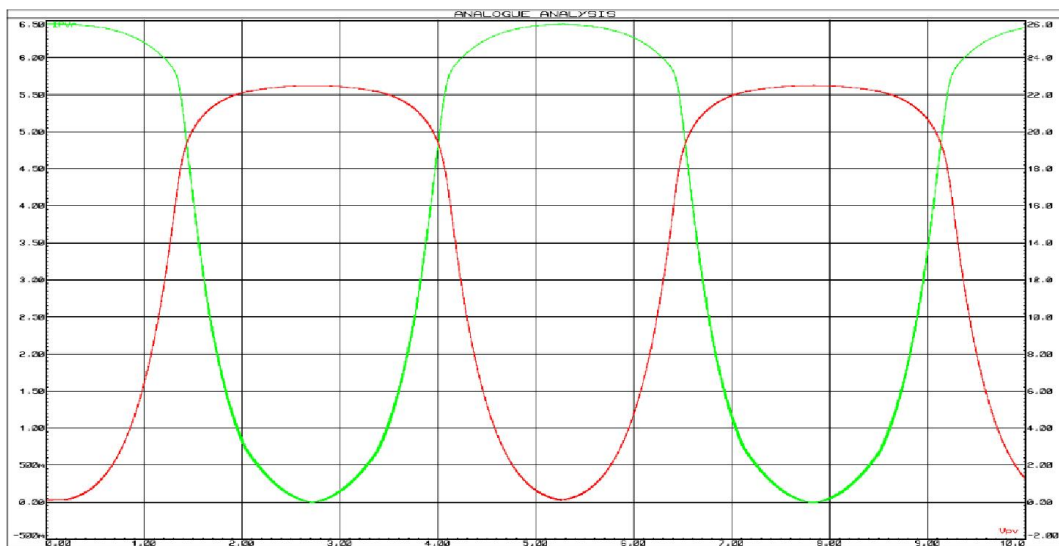


Figure IV.21 : Allure du courant I_{pv} et tension V_{pv} pour Sim2

Dans les simulations des figures précédentes, nous avons choisi celle qui ont donné de meilleurs résultats, ceci dit pour avoir de bonnes courbes qui reproduisent les caractéristiques I-V et P-V d'un module PV, nous devons avoir un délai assez grand avec un pas minimum qui est de '1ms', mais pour avoir les résultats de caractérisation et de test le plus rapidement possible il faut faire des compromis entre vitesse et précision,

IV.7 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les éléments nécessaires à la conception et à la réalisation d'un système de caractérisation pour module photovoltaïque. Nous avons présenté les éléments constituant le système, et nous avons validé son architecture et son dimensionnement à travers différentes simulations en utilisant le logiciel Matlab/Simulink.

Ensuite, nous avons réalisé plusieurs simulations en utilisant le logiciel Proteus/ISIS, pour valider le fonctionnement de l'algorithme de commande de carte ESP32 et ainsi du fonctionnement de système. La simulation avec Proteus/ISIS permet d'avoir une meilleure précision, qui prend en compte les composants électroniques choisis.

Finalement, nous avons réussi à choisir la bonne configuration qui permet de collecter les points essentiels pour reproduire les caractéristiques du module PV.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire, porte sur « *La conception d'un caractérisateur autonome pour panneau photovoltaïque* », l'objectif de ce travail est la récupération et le traçage des caractéristiques électriques courant-tension et puissance-tension d'un panneau photovoltaïque, ainsi que l'évaluation de ces paramètres de fonctionnement dans des conditions réelles de travail.

Nous avons fait un rappel sur les généralités et sur le fonctionnement des systèmes photovoltaïques, où nous avons étudié l'influence des différents paramètres environnants sur les caractéristiques des modules PV. Nous avons ensuite présenté les différentes techniques de caractérisation présentées dans la bibliographie scientifique, ainsi que quelques outils commercialisés pour le test et la caractérisation.

Dans la deuxième partie de ce travail, nous avons étudié les convertisseurs de puissance utilisés dans la caractérisation, où nous avons choisi le convertisseur SEPIC comme base de développement pour notre système. Nous avons présenté ensuite, les éléments clés pour la conception d'un système embarqué dédié à la caractérisation des modules PV, avec des fonctionnalités telles que le stockage des données, la communication Wifi, le contrôle distant avec Smartphone et le traçage des courbes caractéristiques.

Enfin, nous avons détaillé la mise en œuvre du système en présentant des simulations qui valident les choix que nous avons fait tout au long de l'étude, de l'analyse et de la conception des parties matérielles et logicielles du système.

Malheureusement, nous n'avons pas réussi à faire la réalisation finale et le test effectif de notre système de caractérisation, même si nous avons préparé une bonne partie de la plateforme matérielle, ceci pour cause de la situation sanitaire actuelle.

En perspective, nous espérons trouver des solutions appropriées et normalisées pour poursuivre ce travail.