

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 : LEBOUAZDA TURKIYA  
REDAOUI SIHEM**

**Intitulé**

**Conception d'un testeur intelligent de panneaux  
photovoltaïques**

**Soutenu devant le jury composé de :**

Mr. ATTALAH Bilal	Université de M'Sila	Président
Mr. BENHAMADOUCHE Abdelouahab	Université de M'Sila	Rapporteur
Mr. BELLOUTI Adel	Université de M'Sila	Examineur

**Année universitaire : 2018 /2019**



## **DEDICACE (1)**

*Je voudrais dédier cet humble travail A :*

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

*Encouragements tout le long de ma formation.*

*Mes chers frères "ADEL" et "NOR ELISLAM", pour*

*Leurs appuis et leurs encouragements.*

*A Toutes ma famille.*

*A mon binôme "TURKIYA".*

*A toutes mes chers amis surtout : INASS, MARWA, IKRAM,  
AMEL, NADJET, RAYHANA, RADHYA, ABIR, BOUTHAYNA,  
BOCHRA, HASSIBA, CHOROUK,*

## **DEDICACE (2)**

*Je voudrais dédier cet humble travail  
À toute ma famille, à ma chère maman et mon cher père  
Qui nous a quitté à jamais, Qui ont veillé à ce que  
Je sois ce que je suis devenu maintenant.  
À mon binôme SIHEM.  
À tous mes amis*

## **Remerciements**

*Avant tout, Nous remercions DIEU le miséricordieux de nous avoir donné la volonté, le courage et la patience qui nous ont permis de réaliser ce travail, et de poursuivre nos études supérieures et de les réussir et d'avoir la chance d'atteindre le niveau MASTER II.*

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

*Nous remercions également Les étudiants **hafidi nouh** et **touama tariqe** pour leur aide précieuse.*

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

*Nous remercions également, les membres de jury d'avoir accepté d'honorer notre soutenance de leur présence, qu'ils trouvent ici l'expression de notre gratitude.*



## Résumé

Ce mémoire présente le développement et la vérification d'un traceur de module photovoltaïque (PV). Le système développé permet d'obtenir les courbes courant / tension (I-V) et puissance / tension (P-V), où les variables mesurées sont stockées sur une carte mémoire puis transférées vers un ordinateur. Pour acquérir toutes les valeurs de courant et de tension du module PV, un convertisseur DCDC SEPIC est utilisé. En ajustant son rapport cyclique, la résistance équivalente vue par le module PV sera modifiée pour obtenir toutes les valeurs de courant et de tension fournies par le module PV. En outre, l'analyse des principes de fonctionnement et des formes d'onde des modules PV sera réalisée au moyen de simulations informatiques et de résultats expérimentaux.

## Abstract

This paper presents the development and experimental verification of a photovoltaic (PV) module tracer. The developed system allows obtaining the current/voltage (I-V) and power/voltage (P-V) curves, where measured variables are stored on a memory card and subsequently transferred to a computer. To acquire all the current and voltage values of the PV module, a DCDC SEPIC converter will be used. Adjusting its duty cycle, the equivalent resistance seen by the PV module will be modified, obtaining all the current and voltage values provided by the PV module. In addition, the analysis of the operating principles and PV module waveforms will be performed through computer simulations and experimental results.

## ملخص

في هذا العمل سنقوم بتطوير وتحقيق تجريبي لجهاز تتبع واختبار لوحة الكهروضوئية. يسمح النظام المطور بالحصول على منحنى التيار/الفولتية (I-V) ومنحنى الطاقة/الجهد (P-V)، حيث يتم تخزين المتغيرات المقاسة على بطاقة ذاكرة ونقلها لاحقاً إلى جهاز كمبيوتر. للحصول على جميع القيم لوحدة PV، سيتم استخدام محول SEPIC DCDC. عند ضبط دورة التشغيل، سيتم تعديل المقاومة المكافئة التي تراها الوحدة الكهروضوئية، للحصول على جميع قيم التيار والجهد التي توفرها الوحدة الكهروضوئية. بالإضافة إلى ذلك، سيتم إجراء تحليل لمبادئ التشغيل والأشكال الموجية للوحدات الكهروضوئية من خلال محاكاة الكمبيوتر والنتائج التجريبية.

## Table des matières

Remerciement	i
Dédicaces	ii
Table des matières	iv
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	viii
Introduction générale	1

### Chapitre I : Étude et présentation d'un système photovoltaïque

I.1 Introduction.	3
I.2 Le système photovoltaïque.	3
I.2.1 Systèmes autonomes avec stockage « couplage indirect ».	3
I.2.2 Systèmes autonomes hybrides	4
I.2.3 Systèmes autonomes au fil du soleil « couplage direct »	4
I.2.3.1 Alimentation directe	4
I.2.3.2 Le pompage au fil du soleil	5
I.2.4 Systèmes raccordés au réseau	5
I.3 La cellule photovoltaïque.	6
I.3.1 Structure d'une cellule photovoltaïque.	6
I.3.2 Principe de fonctionnement.	7
I.3.3 Les différents types des cellules photovoltaïques.	7
I.3.4 Caractéristique des cellules photovoltaïques	8
I.3.4.1 Tension de circuit ouvert $V_{co}$	8
I.3.4.2 Courant de court-circuit $I_{cc}$	8
I.3.4.3 Puissance	9
I.3.4.4 Rendement	9
I.3.5 Modélisation d'une cellule photovoltaïque.	10
I.4 Générateur photovoltaïque (GPV)	11
I.4.1 Le module photovoltaïque.	11
I.4.1.1 Module et groupement de cellules en série.	11
I.4.1.2 Module et groupement de cellules en parallèle.	12
I.4.2 Les paramètres qui influent sur la caractéristique $I = f(V)$	13
I.4.2.1 Influence de l'éclairement.	13
I.4.2.2 Influence de la température	13

I.4.2.3 Influence du facteur de qualité.	14
I.4.2.4 Influence de la résistance série.	14
I.4.2.5 Influence de la résistance shunt	15
I.5 Conclusion.	16

## **Chapitre II. Caractérisation d'un panneau photovoltaïque**

II.1 Introduction.	17
II.2 La problématique de caractérisation.	17
II.3 Défauts rencontrés dans un champ PV.	17
II.4 Traceur de caractéristiques I(V)/P(V).	19
II.4.1 Traceurs à base de Charge électronique.	19
II.4.2 Traceurs à base d'Amplificateur De Puissance Bipolaire.	20
II.4.3 Traceurs à base d'Alimentation à quatre quadrants.	21
II.4.4 Traceurs à base de Résistance variable.	22
II.4.5 Traceur à base des convertisseurs DC/DC.	23
II.4.6 Traceurs à base de charge capacitive.	24
II.5 Revue bibliographique.	24
II.6 Les Avantages et les inconvénients de différents Méthodes.	26
II.7 Traceurs industriels de courbes I-V.	27
II.7.1 Le PV200 Testeur PV solaire avec traçage de courbe I-V.	27
II.7.2 L'analyseur de module solaire (testeur de courbe photovoltaïque I-V).	28
II.7.3 L'I-V500w.	30
III.8 Conclusion.	31

## **Chapitre III : Choix et modélisation du convertisseur de puissance**

III.1 Introduction.	34
III.2 Les convertisseurs de puissance continu-continu.	34
III.3 Classification des convertisseurs DC-DC (ou hacheurs).	35
III.3.1 Convertisseurs DC-DC réversibles.	35
III.3.2 Convertisseurs DC-DC non réversibles	36
III.3.2.1 Hacheur dévolteur ou série (Buck converter).	36
III.3.2.2 Hacheur survolteur ou parallèle (Boost converter).	37
III.3.2.3 Hacheur à stockage inductif (Buck-Boost converter).	38
III.3.2.4 Hacheur à stockage capacitif.	39
III.4 Récapitulatif d'analyse et choix du convertisseur	41

III.5 Avantages du convertisseur SEPIC.	42
III.6 Principe de fonctionnement d'un convertisseur SEPIC.	43
III.7 Dimensionnement du convertisseur SEPIC.	45
III.7.1 Rapport cyclique.	45
III.7.2 Inductances.	45
III.7.3 Condensateur de couplage.	45
III.7.4 Condensateur de filtrage.	45
III.7.5 Le transistor de puissance.	45
III.7.6 La diode de puissance.	46
III.7.7 Radiateur.	46
III.8 Conclusion.	48

## **Chapitre IV: Conception et Réalisation d'un testeur de panneaux**

IV.1 Introduction	49
IV.2 Structure détaillée du système	49
IV.2.1 Fonctions exécutées par le système	50
IV.2.2 Composants pour la réalisation du dispositif de caractérisation	52
IV.3 Description du système	52
IV.3.1 Mesure du courant et de la tension	52
IV.3.1.1 Capteur de courant	52
IV.3.1.2 Mesure de tension	53
IV.3.2 Mesure la température	54
IV.3.2.1 Sonde thermocouple	54
IV.3.2.2 Capteur de température	54
IV.3.3 Mesure de l'éclairement	55
IV.3.3.1 Capture de lumière photorésistance (LDR)	55
IV.3.3.2 Capteur de lumière photodiode	56
IV.3.4 Driver IRF2104 pour MOSFET	57
IV.4 Etage traitement de données	58

IV.4.1	Présentation de l'Arduino Nano	58
IV.4.2	Caractéristiques techniques générales de l'Arduino Nano	59
IV.5	Partie simulation	60
IV.5.1	Simulation Matlab/Simulink	60
IV.5.1.1	Vérification du modèle du photovoltaïque	60
IV.5.1.2	Vérification du dimensionnement du SEPIC	61
IV.5.1.3	Simulation du traceur de courbe	65
IV.5.2	Simulation Proteus ISIS	69
IV.5.2.1	Schéma du système électronique	69
IV.5.2.2	Algorithme de commande	70
IV.5.2.3	Simulation	71
IV.6	Conclusion	73
	<b>Conclusion général</b>	<b>74</b>



## Liste des figures :

Figure I.1 Schéma du Systèmes autonomes avec stockage.	4
Figure I.2 Systèmes autonomes au fil du soleil « couplage direct ».	5
Figure I.3 Schéma du système raccordé au réseau.	6
Figure I.4 Coupe transversale d'une cellule PV typique.	7
Figure I.5 principe de fonctionnement d'une cellule PV.	7
Figure I.6 Caractéristique I(V) d'un d'une cellule PV.	9
Figure I.7 Caractéristique P(V) d'un d'une cellule PV.	9
Figure I.8 Schéma électrique équivalent d'une cellule PV.	10
Figure I.9 Schéma de groupement des cellules en série.	12
Figure I.10 Caractéristique I.V d'un groupement des cellules en série.	12
Figure I.11 Schéma de groupement des cellules en parallèle.	12
Figure I.12 Caractéristique I.V d'un groupement des cellules en parallèle.	12
Figure I.13 Influence de l'éclairement sur les caractéristiques électriques P-V et I-V.	13
Figure I.14 Influence de la température sur les caractéristiques électriques P-V et I-V.	14
Figure I.15 Influence du facteur de qualité sur les caractéristique électrique P-V et I-V pour un $G=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$ .	14
Figure I.16 Influence de la résistance série sur les caractéristiques électriques P-V et I-V.	15
Figure I.17 Influence de la résistance shunt sur les caractéristiques électriques I(V) et P(V).	15
Figure II.1 Traceurs à base de Charge électronique.	19
Figure II.2 Traceurs à base d'Amplificateur De Puissance Bipolaire.	20
Figure II.3 Traceurs à base d'alimentation à quatre quadrants.	21
Figure II.4 Traceurs à base de Résistance variable.	22
Figure II.5 Traceurs à base de convertisseurs DC/DC.	23
Figure II.6 Traceurs à base de charge capacitive.	24
Figure II.7 PV200 Testeur PV solaire.	27
Figure II.8 L'analyseur de module solaire MECO.	29
Figure II.9 L'I-V500w Testeur PV solaire.	30
Figure III.1 Tensions $V_e$ et $V_s$ dans un convertisseur DC/DC.	34

Figure III.2 Différents types de convertisseurs DC-DC.	35
Figure III.3 Synoptique d'un convertisseur DC-DC réversible.	35
Figure III.4 Synoptique d'un convertisseur DC-DC non réversible.	36
Figure III.5 Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Buck.	37
Figure III.6 Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Boost.	38
Figure III.7 Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Buck-Boost.	39
Figure III.8 Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Cük.	40
Figure III.9 Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur SEPIC.	41
Figure III.10 Schéma simplifié du traceur PV proposé.	42
Figure III.11 SEPIC avec interrupteur fermé.	42
Figure III.12 SEPIC interrupteur ouvert	43
Figure III.13 Schéma du modèle SIMULINK pour le dimensionnement du convertisseur SEPIC.	47
Figure IV.1 Schéma synoptique du système	49
Figure IV.2 Capteur de Courant ACS712 30A.	52
Figure IV.3 Capteur de tension.	53
Figure IV.4 Carte d'un capteur de température MAX6675.	55
Figure IV.5 : Photorésistances.	56
Figure IV.6 capteur de lumière OPT101.	57
Figure IV.7 Schéma de connexion d'un driver IR2104.	58
Figure IV.8 Carte microcontrôleur Arduino Nano.	59
Figure IV.9 Présente la caractéristique Courant-Tension du panneau PV pour l'éclairement $G = 1000W /m^2$ et de température $T_c = 25^\circ C$ .	61
Figure IV.10 Présente la caractéristique Puissance-Tension du panneau PV pour l'éclairement $G = 1000W /m^2$ et de température $T_c = 25^\circ C$ .	61
Figure IV.11 Présente schéma de hacheur SEPIC réalisé dans Simulink.	62
Figure IV.12 Présente courbe de courant d'une bobine L1.	62
Figure IV.10 Présente courbe de courant d'une bobine L2.	63
Figure IV.14 Courbe du courant traversant le transistor MOSFET.	63
Figure IV.15 Courbe du courant traversant la diode.	64
Figure IV.16 Courbe du courant dans la charge.	64

Figure IV.17 Schéma fonctionnel sous Simulink pour le traceur de courbe des modules photovoltaïques.	65
Figure IV.18 Quelques configurations pour le choix du rapport cyclique pour la commande du MOSFET.	66
Figure IV.19 Courant géré du module photovoltaïque.	66
Figure IV.20 Tension gérée du module photovoltaïque.	67
Figure IV.21 Puissance gérée du module photovoltaïque.	67
Figure IV.22 Caractéristique I-V reconstituée pour le module photovoltaïque.	68
Figure IV.23 Caractéristique P-V reconstituée pour le module photovoltaïque.	68
Figure IV.24 Schéma Proteus du testeur de module PV	69
Figure IV.25 Organigramme du fonctionnement teste de caractéristiques panneaux photovoltaïques.	70
Figure IV.26 Allure du courant $I_{pv}$ et tension $V_{pv}$ pour Sim1.	71
Figure IV.27 : Allure du courant $I_{pv}$ et tension $V_{pv}$ pour Sim2.	71
Figure IV.28 Allure du courant $I_{pv}$ et tension $V_{pv}$ pour Sim3.	72
Figure IV.29 Allure du courant $I_{pv}$ et tension $V_{pv}$ pour Sim4.	72

## Liste de Tableau :

Tableau II.1 classification défauts et d'anomalies d'un champ PV	18
Tableaux II.2 Résumé des travaux étudiés.	25
Tableaux II.3 Les Avantages et les inconvénients des différents Méthodes.	26
Tableau III.1 Récapitulatif des caractéristiques des convertisseurs DC/DC.	42
Tableau III.2 Récapitulatif des pertes par conduction et par commutation.	46
Tableau III.3 les valeurs des inductances et des capacités et du rapport cyclique $\alpha$ .	48
Tableau IV.1 Description générale des composants électroniques	51
Tableau IV.2 caractéristique d'un capteur	53



## **Introduction générale**

Les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée qui regroupé en un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée étudiée obtenue. L'une des filières les plus prometteuses des énergies renouvelables est l'énergie photovoltaïque.

L'énergie photovoltaïque provient de la conversion directe de l'énergie solaire en électricité. Cette conversion se fait par le biais d'une cellule photovoltaïque dont le principe est basé sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque. Ce dernier, a pour rôle de produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque.

L'intégration de l'énergie photovoltaïque dans les systèmes électriques nécessite une sûreté de fonctionnement et une stabilité de la production, or les générateurs photovoltaïques sont sujet à des perturbations en continue, où leur fonctionnement peut être altéré de façon durable ou occasionnel. Alors, la nécessité de se doter de moyen électronique de test et de diagnostic est inéluctable.

Le test des panneaux photovoltaïque peut rassembler un certain nombre d'objectif, notre travail se concentre sur la caractérisation électrique de ces panneaux photovoltaïques dans les conditions réel de travail. Pour trouver les problèmes mentionnés, il est nécessaire d'observer et d'étudier la courbe courant-tension  $I(V)$  du module. Cette courbe est caractéristique de chaque type de module et exprime les principaux paramètres électriques du module. Les fabricants de modules fournissent souvent cette courbe avec les principaux paramètres électriques du module dans le catalogue de produits, mais uniquement pour les conditions de test standard. Ces conditions sont rarement rencontrées sur le terrain, conditions typiques des tests de laboratoire.

Notre travail consiste en la conception et la réalisation d'un système embarqué pour la caractérisation des panneaux photovoltaïque.

Le manuscrit présenté est composé de quatre chapitres :

Le premier chapitre décrit le fonctionnement et les différents types de systèmes photovoltaïques. Le deuxième chapitre présente un état de l'art sur les méthodes et outils de

caractérisation des panneaux photovoltaïque. Le troisième chapitre présente les étapes de dimensionnement et de conception d'un convertisseur (DC/DC) de type dévolteur/survolteur (SEPIC). Le quatrième chapitre est consacré à la conception, la simulation et la réalisation du système étudié.

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

## I.1 Introduction

Notre travail consiste en la conception d'un dispositif de test de panneau photovoltaïque. Dans ce contexte, nous nous intéressons plus particulièrement à la compréhension du fonctionnement et de la composition de ces panneau PV.

Ainsi, nous présentons tout d'abord les systèmes photovoltaïques et leurs différents composants, ensuite nous décrivons le principe de fonctionnement des cellules solaires ainsi que leurs caractéristiques courant-tension et puissance-tension.

Enfin, nous décrivons la modélisation des générateurs photovoltaïque et nous présenterons les différents paramètres qui influent leur fonctionnement, et leur performance.

## I.2 Les systèmes photovoltaïques

Un système photovoltaïque comporte plusieurs parties, il se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adapte l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs (charge, injection dans le réseau). Cet ensemble, appelé aussi "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.2.1 Systèmes autonomes avec stockage « couplage indirect »

C'est la configuration la plus courante des systèmes photovoltaïques autonomes que les anglophones appellent Stand-Alone Systems. L'ensemble est le plus souvent en courant continu (DC). Ce qui est préférable car plus simple. Mais dès que l'on touche à l'habitat, il y a presque toujours des appareils en courant alternatif (AC) à alimenter, parce qu'ils n'existent pas en continu.

La batterie d'un tel système se charge le jour, et sert de « réservoir » d'énergie en permanence, tout comme la citerne d'eau du système de pompage solaire décrit précédemment. Elle peut sans problème, à un instant donné, recevoir un courant de charge et débité un courant de décharge de valeur différente. Les appareils alimentés sont donc câblés sur la batterie au travers du régulateur de charge.

Lorsque la batterie est pleine, ce dernier, coupe la charge pour éviter qu'elle ne souffre de surcharge, ceci a pour conséquence la perte d'une part de l'énergie produite en été notamment sous nos climats [4]. (Voir la figure I.1).

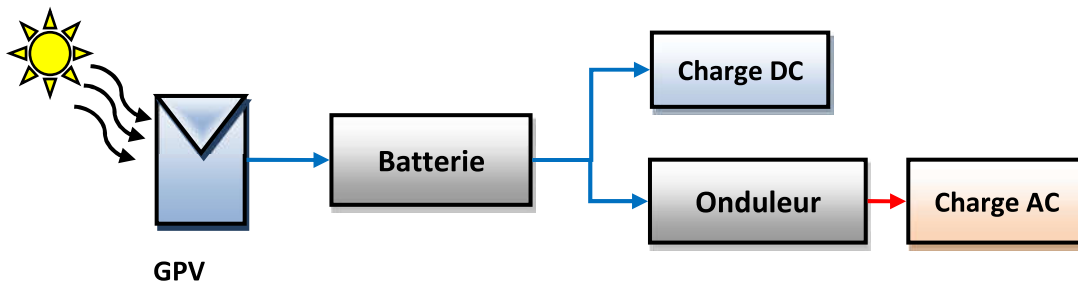


Figure I.1 Schéma du Systèmes autonomes avec stockage.

## I.2.2 Systèmes autonomes hybrides

Une des limites d'un système autonome purement photovoltaïque, comme on vient de le décrire, est qu'il fournit une puissance donnée, variable selon la saison, mais que l'on ne peut pas dépasser, au risque de détruire la batterie par décharge profonde. Or, les consommateurs que nous sommes ne sont pas des machines et ont des besoins qui évoluent, et pas forcément en phase avec les saisons. Avoir un système hybride, c'est disposer d'une autre source d'électricité autonome qui vient compléter l'apport photovoltaïque. Cette autre source peut être un groupe électrogène (appelé aussi « génératrice ») ou une éolienne.

On retiendra l'éolienne si le site est bien venté, de préférence au cours des saisons où l'ensoleillement est plus bas. Mais quand l'approvisionnement en diesel est possible, le groupe électrogène est plus confortable, car on y a recours à volonté. Et il permet en outre de recharger la batterie lorsqu'elle est faible [1].

## I.2.3 Systèmes autonomes au fil du soleil « couplage direct »

Ce sont les systèmes les plus simples puisque l'énergie photovoltaïque est utilisée directement à partir des panneaux. On peut les trouver dans les deux cas suivants :

### I.2.3.1 Alimentation directe

Dans ce cas, les fonctions du système autonome se réduisent à produire et à utiliser de l'énergie. L'appareil alimenté ne fonctionnera qu'en présence d'un rayonnement lumineux et dès que l'éclairement sera suffisant pour atteindre la puissance demandée. C'est intéressant pour toutes les applications qui n'ont pas besoin de fonctionner dans l'obscurité, et pour lesquelles le besoin en énergie coïncide avec la présence de la lumière. S'il y a de la lumière, cela fonctionne, sinon cela s'arrête ; Mais il faut calculer le panneau ou la cellule solaire de sorte qu'il ait assez de puissance pour alimenter l'appareil à l'éclairement le plus faible

rencontré, et c'est souvent contraignant puisque par le fait, on ne profite pas toujours des éclaircissements plus élevés : pas de stockage, donc pas de récupération du surplus d'énergie solaire [2]. (Voir la figure (I.2))

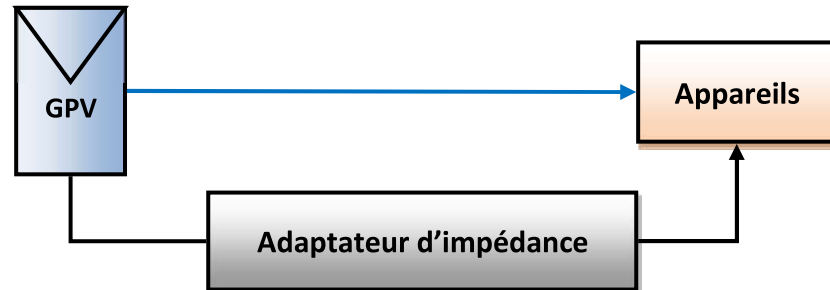


Figure I.2 Systèmes autonomes au fil du soleil « couplage direct ».

### I.2.3.2 Le pompage au fil du soleil

Il s'agit de stocker de l'eau dans un réservoir. La pompe solaire est branchée directement sur les panneaux solaires par l'intermédiaire d'un régulateur ou d'un convertisseur. Le débit d'arrivée de l'eau dans le réservoir est donc variable, directement fonction du rayonnement solaire, d'où l'expression « au fil du soleil ». Quant à l'utilisation, elle pourra se faire à n'importe quel moment.

### I.2.4 Systèmes raccordés au réseau

Un tel système s'installe sur un site raccordé au réseau. Généralement sur des habitations ou des entreprises qui souhaitent recourir à une forme d'énergie renouvelable et qui bénéficient d'un bon ensoleillement.

L'énorme avantage de cette solution est l'absence de batterie. On ne stocke plus l'énergie, on l'injecte directement dans le réseau local ou national. Et ceci sans limite quantitative, donc toute l'énergie est récupérée. Il y a un compteur qui tourne dans un sens pour la consommation, et un autre dans l'autre sens pour la production.

Mais il faut tout de même convertir le courant continu des panneaux en alternatif au travers d'un onduleur, et celui-ci doit être homologué par la compagnie d'électricité qui va recevoir ce courant, car il doit respecter des normes sur sa qualité « sinusoïdale ».

Ces systèmes ne sont pas des alimentations de secours en cas de coupure du réseau, car ils ne comportent aucune réserve d'énergie. Dans certains cas, on ajoute au système une batterie de secours pour les coupures de courte durée [2]. (Voir la figure (I.3)).

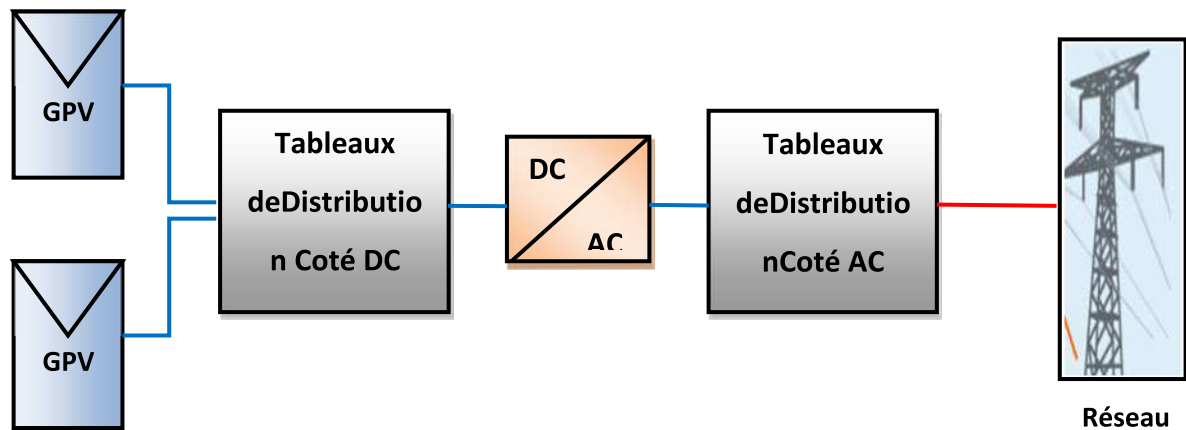


Figure I.3 Schéma du système raccordé au réseau.

### I.3 La cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque ou photopile est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Le principe de fonctionnement de cette cellule fait appel aux propriétés du rayonnement et celles des semi-conducteurs.

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé « effet photovoltaïque » qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé, de sa disposition, de la température de la cellule ainsi que le vieillissement de la cellule [3].

#### I.3.1 Structure d'une cellule photovoltaïque

La structure de base d'une cellule solaire photovoltaïque est une jonction PN (Figure I.4) constituée de la manière suivante : un semi-conducteur dopé P est recouvert d'une couche mince dopée N (quelque millièmmes 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 on peut indiquer les principales couches d'une cellule solaire qui 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 photogénérés. Les contacts doivent être ohmiques.

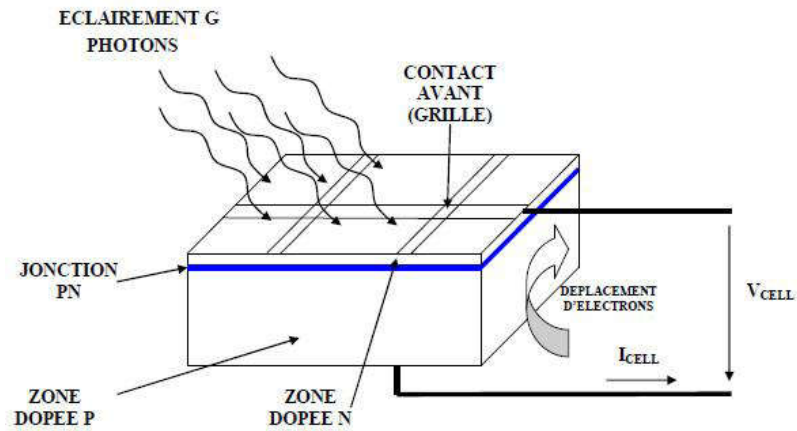


Figure I.4 Coupe transversale d'une cellule PV typique [5].

### I.3.2 Principe de fonctionnement

L'absorption d'un photon par un semi-conducteur donne naissance à une paire 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. [3]

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.5):

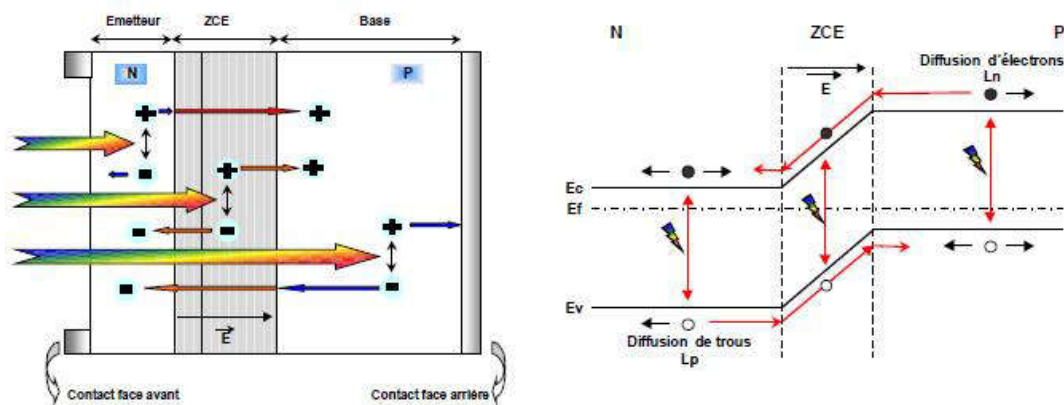


Figure I.5 Principe de fonctionnement d'une cellule PV [5].

### I.3.3 Les différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïque)

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par un rendement et un coût qui lui sont propres. Cependant, quel que

soit le type, le rendement reste assez faible : entre 8 et 23 % de l'énergie que les cellules reçoivent [4].

Actuellement, il existe trois principaux types de cellules :

✓ **Les cellules monocristallines**

Elles ont le meilleur rendement (de 12 à 18% voir jusqu'à 24.7 % en laboratoire). Cependant, elles coûtent trop chers due à leur fabrication complexe [4].

✓ **Les cellules polycristallines**

Leur conception est plus facile et leur coût de fabrication est moins important. Cependant leur rendement est plus faible : de 11% à 15% jusqu'à 19.8% en laboratoire [5].

✓ **Les cellules amorphes**

Elles ont un faible rendement (5% à 8%, 13% en laboratoire), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres. L'avantage de ce dernier type est le fonctionnement avec un éclairage faible (même par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment) [4]

### **I.3.4 Caractéristiques d'une cellule PV**

#### **I.3.4.1 Tension de circuit ouvert $V_{co}$**

Si on place une cellule sous une source lumineuse constante, sans aucun récepteur à ses bornes, celle-ci va produire une tension continue d'environ 0,6 V, appelée tension en circuit ouvert  $V_{co}$  (elle varie légèrement avec l'éclairage). Cette valeur correspond à la tension de coupure d'une diode, ce qui confirme le fait qu'on puisse assimiler une cellule solaire à une jonction P-N. Pour obtenir une tension plus élevée à la sortie du module, il va falloir associer les cellules en série [4]

#### **I.3.4.2 Courant de court-circuit $I_{cc}$**

A l'inverse du cas précédent, si l'on place une cellule en court-circuit, elle va débiter un courant maximal à tension nulle. Ce courant est dit courant de court-circuit  $I_{cc}$ . De même que pour la tension, il faudra associer les cellules en parallèle pour augmenter significativement la valeur de l'intensité en sortie du module [4].

### I.3.4.3 La puissance

Le but recherché par tous les utilisateurs de générateur photovoltaïque est que l'énergie produite soit la plus optimale possible. La figure I.6 représente la caractéristique courant tension d'une cellule sous illumination ainsi qu'une courbe théorique de puissance constante (puissance = tension  $\times$  intensité) (voir figure I.7).

### I.3.4.4 Le rendement

Le rendement énergétique est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale produite  $P_m$  et la puissance du rayonnement solaire parvenant au module. Soit ( $S$ ) la surface du module et ( $E$ ) l'éclairement, ce rendement a pour expression :  $\mu = \frac{P_m}{E * S}$ .

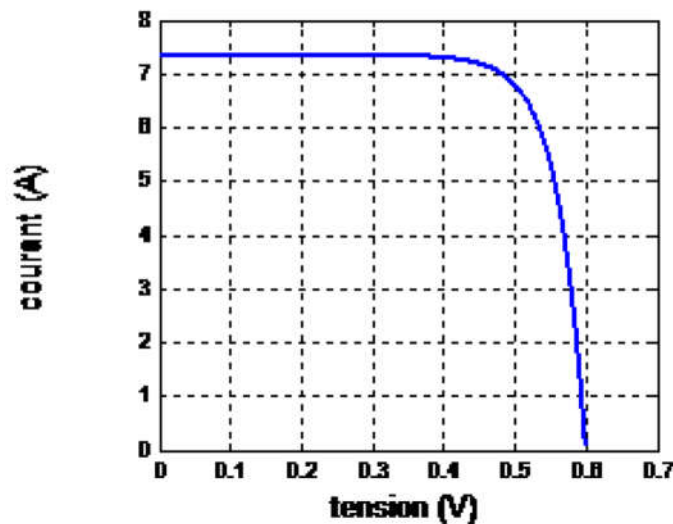


Figure I.6 Caractéristique I(V) d'un d'une cellule PV

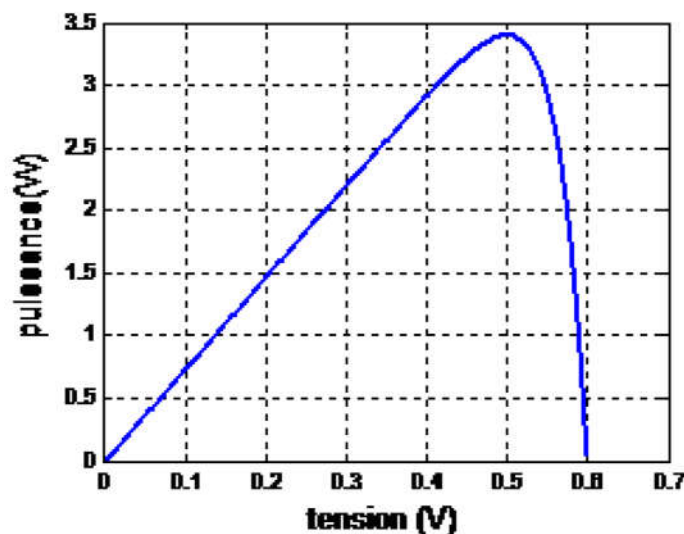


Figure I.7 Caractéristique P(V) d'un d'une cellule PV

### I.3.5 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

Dans la littérature, il existe plusieurs modèles de la cellule photovoltaïque, dont le but est l'obtention de la caractéristique courant-tension  $I(V)$ . Ces modèles diffèrent entre eux par la procédure et le nombre des paramètres intervenants dans le calcul de la paire courant-tension [5].

Les principaux modèles existants dans la littérature sont énumérés ci-dessous :

- Le modèle explicite,
- Le modèle à deux exponentielles,
- Le modèle à cinq paramètres,
- Le modèle à quatre paramètres,
- Le modèle à deux paramètres,
- Le modèle simplifié,

Dans notre modélisation, nous nous intéressons au modèle simplifié, le modèle à une seule diode. (Voir La figure I.8) représente le schéma équivalent d'un générateur photovoltaïque. Ce modèle est composé d'un générateur de courant dont la valeur du courant est proportionnelle à l'éclairement reçu à la surface de la cellule PV, une diode qui modélise la jonction PN présente dans une cellule PV, une résistance série qui modélise les pertes ohmiques due aux contacts électriques et enfin une résistance shunt qui modélise les courants de fuite présents dans la cellule PV.

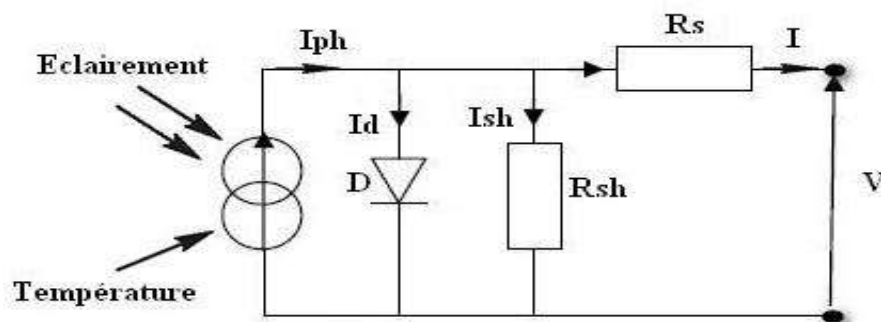


Figure I.8 Schéma électrique équivalent d'une cellule PV

La loi de Kirchhoff nous permet d'écrire la relation suivante :

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

Le courant qui passe dans la résistance shunt est donné par l'expression :

$$I_{sh} = \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (I.2)$$

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

$$I_d = I_0 \left[ \exp\left(\frac{q(V + I \cdot R_s)}{n \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right] \quad (I.3)$$

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

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{q(V + I \cdot R_s)}{n \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right] - \frac{(V + I \cdot R_s)}{R_{sh}} \quad (I.4)$$

## I.4 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.4.1 Modules photovoltaïques

La tension générée par une cellule photovoltaïque au silicium mono ou multi cristallin, fonctionnant au point de puissance maximale sous l'éclairement de référence de  $1KW \cdot m^{-2}$ , est de l'ordre de 0,55 V et le courant est fonction de la surface de la cellule. Il convient donc de grouper en série et parallèle des cellules élémentaires pour adapter la tension et le courant en fonction des contraintes de la charge à alimenter.

Il est important de noter dès à présent que la caractéristique courant tension d'un groupement de cellules photovoltaïques, qu'elles coupent, sera directement homothétique de la courbe I(V) d'une cellule de base. Il en sera de même pour tout le réseau de caractéristiques. En conséquence, tout ce qui a été dit pour une cellule individuelle restera valable pour un groupement.

#### I.4.1.1 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.9 donne le schéma d'un module fermé sur sa résistance optimale R.

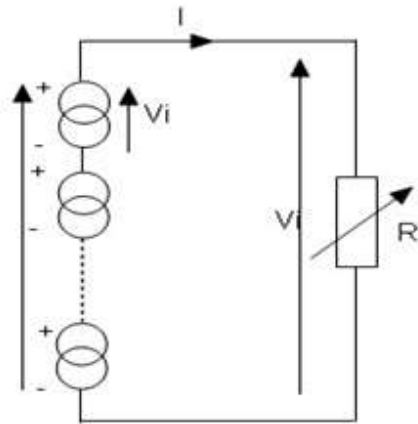


Figure I.9 Schéma de groupement des cellules en série

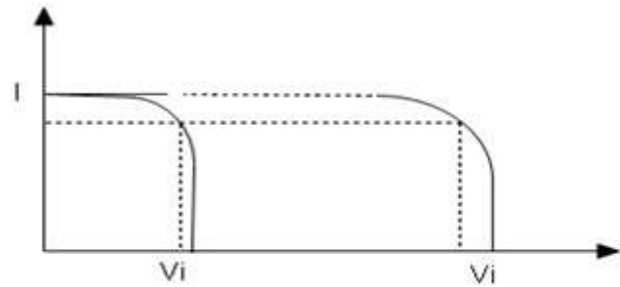


Figure I.10 Caractéristique I(V) d'un groupement des cellules en série

La figure I.10 représente la caractéristique courant-tension d'un groupement des 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 groupement série délivrera le courant  $I$  sous la tension ( $N_s \times V_i$ ). Chacune des  $N_s$  cellules générant ce courant  $I$  et la tension  $V_i$ .

#### I.4.1.2 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.11. 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).

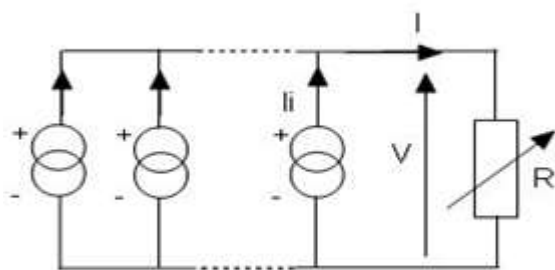


Figure I.11 Schéma de groupement des cellules en parallèle

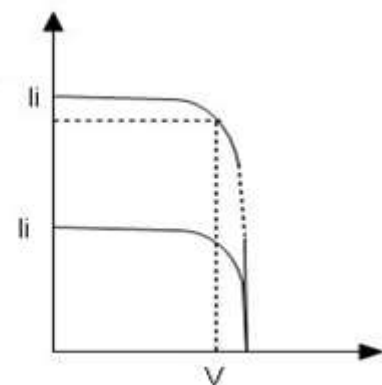


Figure I.12 Caractéristique I(V) d'un groupement des cellules en parallèle

La figure I.12 représente la caractéristique I.V d'un groupement des cellules en parallèle, ce groupement est obtenue en multipliant point par point et pour une même tension, le courant par  $N_p$ , il augmentera le courant ( $N_p \times I_i$ ) et fixe la tension  $V$ .

## I.4.2 Les paramètres qui influent sur la caractéristique $I = f(V)$

### I.4.2.1 Influence de l'éclairement

L'augmentation de l'éclairement est directement proportionnelle à l'intensité du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement montre dans la figure I.13

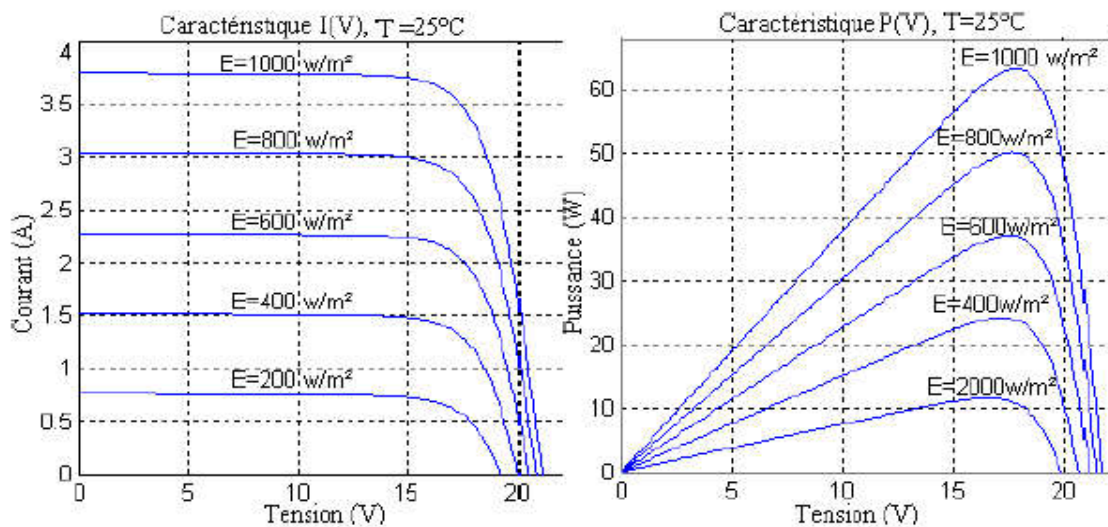


Figure I.13 Influence de l'éclairement sur les caractéristiques électriques  $P(V)$  et  $I(V)$

### I.4.2.2 Influence de la température

La température est un paramètre important dans le comportement du générateur photovoltaïque. La figure I.14 montre que l'augmentation de la température entraîne une diminution nette de la tension de circuit ouvert et une augmentation du courant de court-circuit, ainsi qu'une diminution de la puissance maximale.

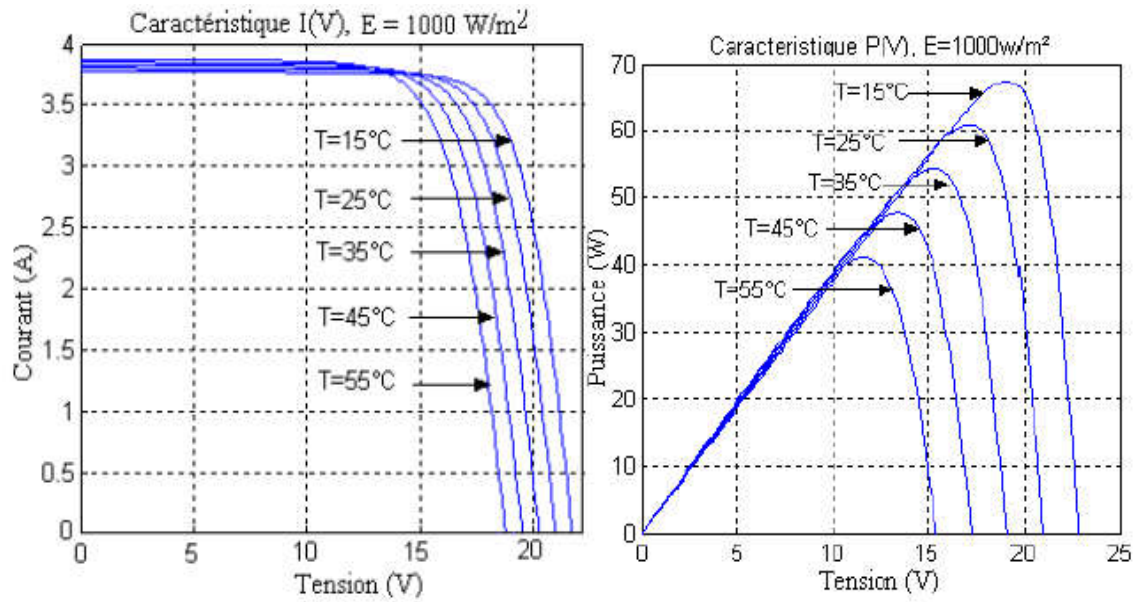


Figure I.14 Influence de la température sur les caractéristiques électriques P(V) et I(V)

### I.4.2.3 Influence du facteur de qualité

L'augmentation du facteur d'idéalité de la diode influe inversement sur la zone ou le point de puissance maximale et cela se traduit par une baisse de puissance au niveau de la zone de fonctionnement.

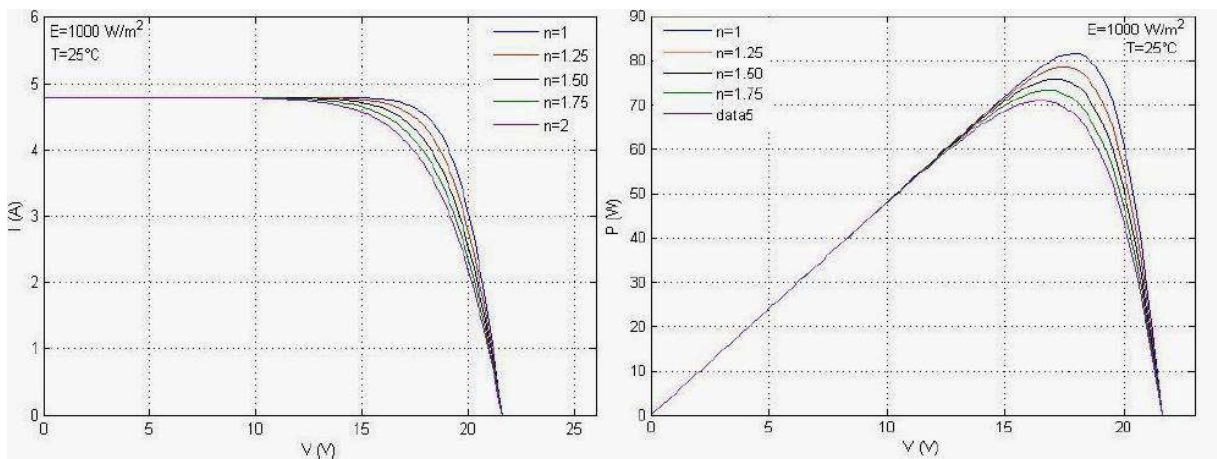


Figure I.15 Influence du facteur de qualité sur les caractéristique électrique P(V) et I(V) pour un  $G=1000W/m^2$  et  $T=25^{\circ}C$

### I.4.2.4 Influence de la résistance série

La figure I.16 montre l'influence de la résistance série sur la courbe I(V). Un générateur photovoltaïque qui se traduit par une diminution de la pente de la courbe de puissance P(V) dans la zone où le générateur photovoltaïque fonctionne comme générateur de tension constant.

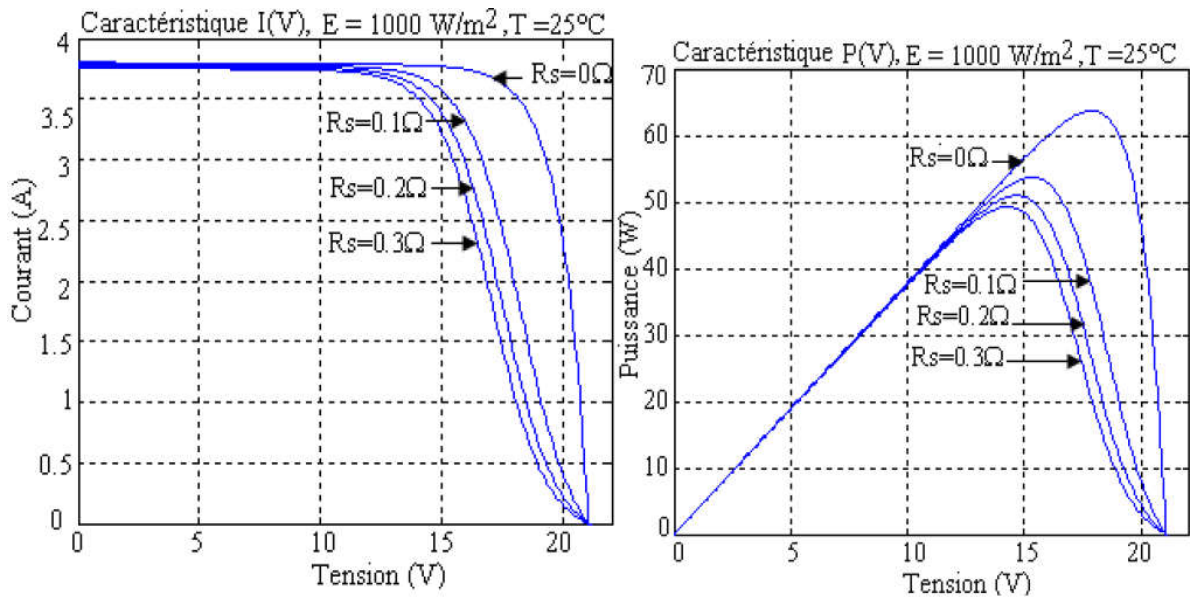


Figure I.16 Influence de la résistance série sur les caractéristiques électriques P(V) et I(V)

#### I.4.2.5 Influence de la résistance shunt

La résistance shunt est une résistance qui prend en compte les fuites inévitables du courant qui intervient entre les bornes opposées positives d'une photopile. En générale, la résistance shunt est très élevée, son effet se fait sentir surtout dans la partie génération du courant.

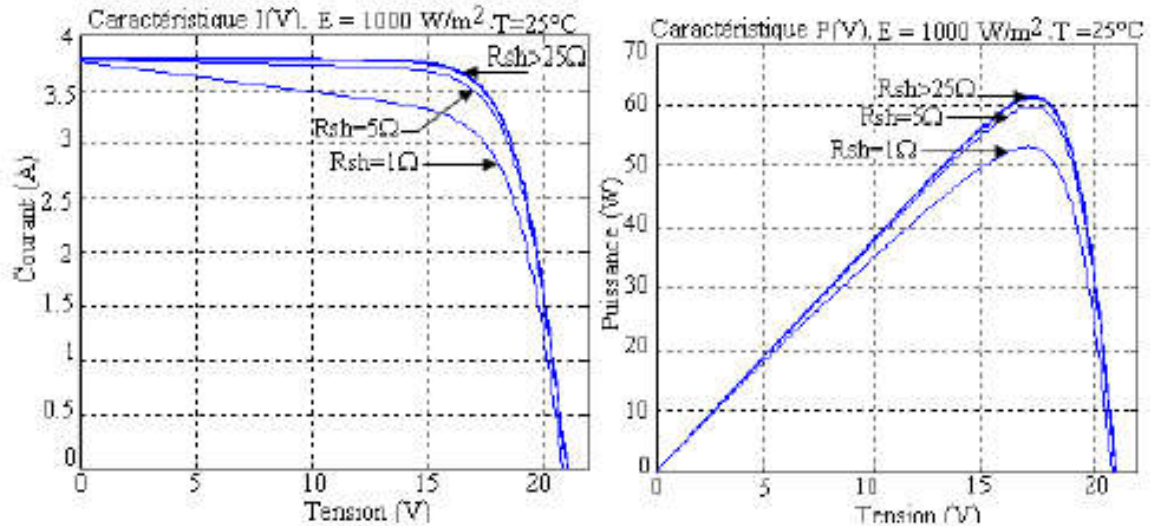


Figure I.17 Influence de la résistance shunt sur les caractéristiques électriques I(V) et P(V).

## **I.6 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude non exhaustive sur les systèmes photovoltaïques ainsi que leurs principales composantes. Nous avons donné les éléments essentiels sur les cellules solaires ainsi que les différents groupements possibles de ces cellules (série et/ou parallèle). Ces différentes associations constituent le module photovoltaïque, alors que la liaison de ces modules aboutit au panneau ou générateur photovoltaïque. Nous avons aussi présenté les caractéristiques courant-tension et puissance-tension, ainsi que l'influence de différents paramètres environnants et structurels sur leurs formes et leurs valeurs.

## **II.1 Introduction**

Dans ce chapitre nous nous intéressons essentiellement à la caractérisation des panneaux photovoltaïques. Dans une première partie, nous discuterons les principaux facteurs responsables des anomalies dans les courbes caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  des panneaux photovoltaïques. L'objectif est de démontrer la nécessité d'utiliser des traceurs de courbes  $I(V)$  pour identifier ces anomalies 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 PV, de comprendre les systèmes PV dans des conditions réelles de fonctionnement et ainsi prévoir les améliorations à apporter aux systèmes, et à son monitoring pour une plus grande fiabilité et sûreté de fonctionnement.

C'est dans ce cadre que s'inscrit ce travail, dont l'objectif premier est de tester les modules PV en conditions réelles d'utilisation pour différentes technologies. Les mesures sont nécessaires à tous les niveaux, dès les phases de développement jusqu'à jusqu'au module PV en opération. En effet, les caractérisations en laboratoire, dans des conditions dites standard de test, sont importantes pour comparer les cellules ou modules entre eux, mais ne traduisent pas leur fonctionnement dans d'autres conditions.

Bien que les modules photovoltaïques aient une structure électrique simple à utiliser, 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 Défauts rencontrés dans un champ PV**

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

défauts et les anomalies survenue varient d'une installation à une autre en fonction de sa conception, installation, opération et maintenance.

Au cours de son fonctionnement, une installation photovoltaïque peut être éventuellement soumise à des différents défauts et conditions de fonctionnement anormal. Les défauts et les anomalies apparus varient d'une installation à une autre en fonction de sa conception, installation, opération et maintenance. Le tableau II.1 présente les principaux défauts et anomalies classés suivant l'emplacement de leur apparition dans une installation PV

**Tableau II.1** classification défauts et d'anomalies d'un champ PV.

<b>Composant</b>	<b>Nature des défauts</b>	<b>Dénomination des</b>
<b>Cellules</b>	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
<b>Groupes de cellules</b>	Destruction de diodes Absence de diodes Inversion de la polarité des diodes Diode mal connectée Diode court-circuitée	Défaut de diode de bypass
<b>Module</b>	Modules court-circuités Inversion de polarité du module Modules shuntés	Défaut de module
<b>String</b>	Rupture du circuit électrique Destruction de la liaison Corrosion des connexions Corrosion des contacts Court-circuit du circuit électrique Module déconnecté	Défaut de connectique
<b>Champ</b>	Destruction des diodes Absence de diodes Inversion de la polarité des diodes Diode mal connectée Diode court-circuitée	Défaut de diode anti- retour

## II.5 Traceur de caractéristiques I(V)/P(V)

Dans cette partie de ce chapitre nous détaillons les différentes techniques de caractérisation rencontrée dans la littérature scientifique.

Un traceur photovoltaïque révèle plus sur la performance d'un module PV que toutes autres méthodes de mesure. Il est également le meilleur moyen pour tester les performances d'un générateur photovoltaïque et faire apparaître ces caractéristiques, il est aussi utilisé comme un outil standard par les installateurs solaires dans l'industrie photovoltaïque [1]. Parmi les types de traceurs de la caractéristique I(V)/P(V) on a : Les traceurs à base de charge électronique, le traceur à base de résistance variable, le traceur à base d'un convertisseur statique DC-DC (hacheur) et le traceur à base de condensateur.

### II.5.1 Traceurs à base de Charge électronique

La méthode de la charge électronique (Figure II.1) utilise un transistor (habituellement un transistor MOSFET) comme charge ; la résistance entre le drain et la source est modulée par la tension de porte-source, et par conséquent le débit du courant fourni par le module. Quand cette méthode est utilisée pour tracer la courbe I(V) du module, le transistor MOSFET doit fonctionner dans ses trois modes de fonctionnement (coupure, actif et ohmique). En conséquence, la majeure partie de la puissance fournie par le module devra être absorbée par ce dispositif, qui limite son application à la puissance moyenne.

Dans [2] Une charge électronique simple, basée sur un MOSFET est proposée pour obtenir la courbe I(V) des panneaux en balayant rapidement la charge. Son avantage est la variation rapide de la résistance de charge équivalente du transistor MOSFET. Le MOSFET linéaire est entraîné par un signal de balayage à basse fréquence avec une amplitude suffisamment grande pour couvrir la gamme complète des caractéristiques du panneau.

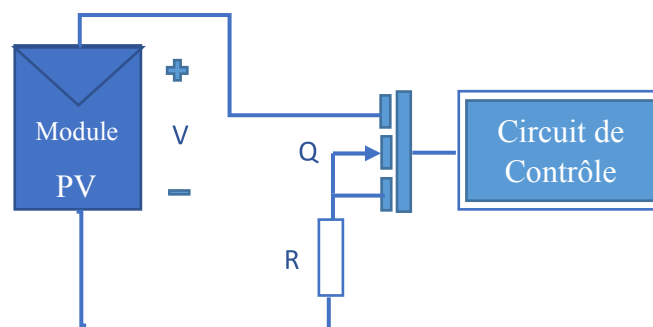


Figure II.1 Traceurs à base de Charge électronique.

La tension de sortie et le courant sont détectés à l'aide d'un diviseur de tension et une résistance de détection respectivement.  $I_{sc}$  et  $V_{oc}$  sont obtenus en utilisant deux détecteurs de crête et des signaux de tension et de courant sont multipliés en utilisant un multiplieur pour obtenir la puissance instantanée, ainsi un troisième détecteur de crête peut être utilisé pour capturer la valeur de  $P_m$  [3].

La charge électronique est constituée de plusieurs transistors en cascade. En diminuant progressivement le courant de base du transistor, le générateur photovoltaïque se déplace à partir du point de court-circuit à l'état de la tension en circuit ouvert. Une carte d'acquisition de données avec un convertisseur AC/DC à grande vitesse est utilisée pour mesurer le courant et la tension, durant les changements des points de fonctionnement. L'innovation de ce circuit est que l'analyse de la courbe I-V est contrôlée par une rampe de courant, au lieu d'utiliser une rampe de tension [4].

### II.5.2 Traceurs à base d'Amplificateur De Puissance Bipolaire

Cette méthode implique un circuit simple qui permet aux courants et tension dans le module d'être renversés, et donc il est possible de mesurer les courbes I(V) du module. Son plan est basé sur un amplificateur de puissance traditionnel de classe-b (Figure II.2). Il utilise deux transistors IGBT comme charge, pour le courant en avant et en inverse respectivement. Les transistors bipolaires doivent fonctionner dans ces trois modes de fonctionnement (coupure, active et saturation). En conséquence, la majeure partie de la puissance fournie par le module doit être absorbée par ces dispositifs, qui limitent son application à la puissance moyenne [5].

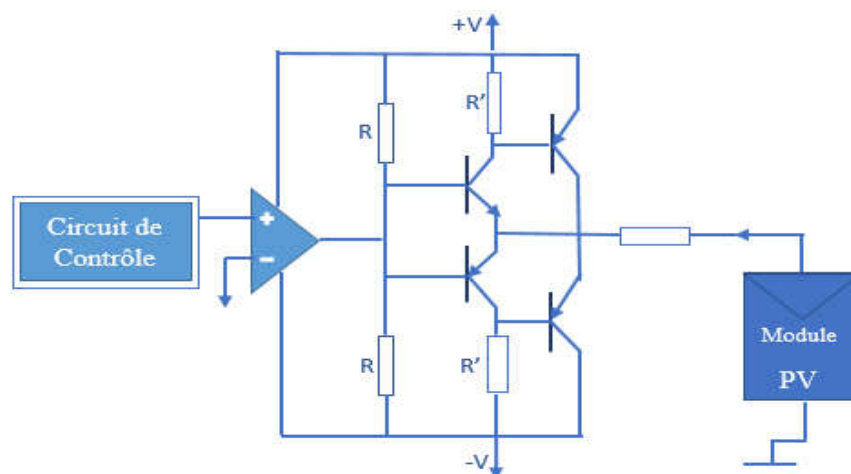


Figure II.2 Traceurs à base d'Amplificateur De Puissance Bipolaire.

### II.5.3 Traceurs à base d'Alimentation à quatre quadrants

Une alimentation à quatre quadrants est un système aussi bien capable de fournir que d'absorber la puissance, en d'autres termes, elle peut augmenter ou descendre le courant avec la tension bipolaire (positive ou négative). Elle peut être utilisée comme une charge réglable pour d'autres alimentations d'énergie ou tout autre équipement.

Pour un module photovoltaïque l'intérêt principal est d'obtenir la courbe  $I(V)$  dans le premier quart du cercle. Mais, l'exploration des points se situe dans le deuxième et le quatrième quart du cercle.

Une alimentation à quatre quadrants peut être considérée comme une source d'alimentation  $V(t)$ . Dont la sortie peut être modifiée par un signal d'entrée de référence ou programmée pour balayer une gamme de valeurs. Le circuit montré dans la figure II.3 est une vue fonctionnelle de l'alimentation à quatre quadrants. Le circuit schématique pour une alimentation à quatre quadrants est plus complexe et dépasse le cadre de cette analyse.

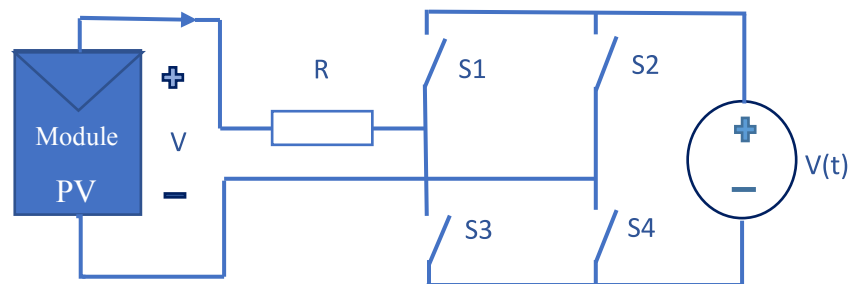


Figure II.3 Traceurs à base d'Amplificateur De Puissance Bipolaire.

Avec  $k_1$  et  $k_4$  fermés et  $V(t)$  supérieure à la tension en circuit ouvert du module photovoltaïque sous test, le point de fonctionnement du PV est décalé dans le quatrième quadrant. Avec  $k_1$  et  $k_4$  fermées et  $V(t)$  mineur de  $V_{oc}$ , le point de fonctionnement du PV est décalé dans le premier quadrant. Enfin, si  $k_2$  et  $k_3$  sont fermés, la tension  $V$  du panneau PV est forcée à  $-V(t)$  et le point de fonctionnement du PV est décalé dans le deuxième quadrant. Ce type de charge est intrinsèquement coûteux. En effet, les quatre quadrants d'alimentations qui travaillent avec plus de 1 kW et sont à peine disponibles. Cette méthode n'est pas applicable pour mesurer un générateur photovoltaïque entier [6].

### II.5.4 Traceurs à base de Résistance variable

La manière la plus simple de mesurer la courbe  $I(V)$  d'un module photovoltaïque est d'utiliser une résistance variable  $R$  comme il est montré dans la Figure II.4, la valeur de  $R$  sera variée en étapes de zéro à l'infini afin de capturer les points de la courbe  $I(V)$  du court-circuit au circuit ouvert, en mesurant la tension et le courant dans chaque étape. Cette méthode s'applique seulement aux modules de basse puissance puisque les résistances pour une puissance plus élevée sont difficiles à retrouver et à peine disponibles. Des résistances de charge ne sont pas recommandées pour la caractérisation du module photovoltaïque parce que lcs n'est jamais exactement atteint et les caractéristiques de polarisation et d'inversion ne peuvent pas être déterminées. Cependant, l'utilisation des résistances de charge pour évaluer la représentation d'un module solaire peut fournir une manière peu coûteuse pour se rapprocher de sa représentation [6].

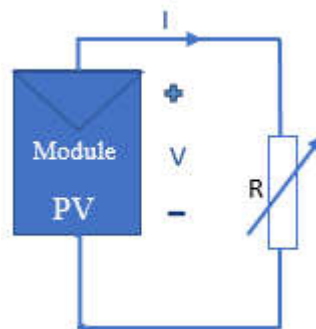


Figure II.4 Traceurs à base de Résistance variable.

La résistance de charge est augmentée manuellement par étapes. Dans chaque étape, la tension et le courant (réellement la tension à travers une résistance de shunt) sont capturés en utilisant une paire de multimètre numérique remis. Il est rapporté dans [2] que le changement manuel de la résistance de charge rend le processus très lent, ainsi le rayonnement solaire et les conditions thermiques pourraient être changés pendant la mesure. Le système présenté dans [7][8] utilisent un ensemble de résistances comme charge. Une rangée de relais, commandée par une carte d'ordinateur, il est utilisé pour sélectionner la combinaison des résistances pour réaliser une charge résistive spécifique.

Les résistances sont choisies pour obtenir une bonne diffusion des points autour de la courbe. Deux canaux d'aide de la carte d'ordinateur sont utilisés afin de mesurer chaque paire

(I ; V). Avec cette approche, l'opération manuelle au-dessus de la résistance est évitée et le temps d'acquisition est amélioré.

### II.2.5 Traceur à base des convertisseurs DC/DC

Les Convertisseurs continu-continu peuvent augmenter ou diminuer l'amplitude de la tension continue et / ou inverser sa polarité. Ceci est réalisé par la technique de modulation par largeur d'impulsions (PWM), habituellement par une fréquence constante.

Le rapport cyclique (D) est le rapport entre le temps de conduction (TON) et la période de commutation ( $T_s$ ). Les trois configurations de base de convertisseurs (Buck, Boost et Buck-Boost-Dérivé) sont similaires à un transformateur DC qui fonctionne à la fois en mode de conduction continue et discontinue (CCM et DCM).

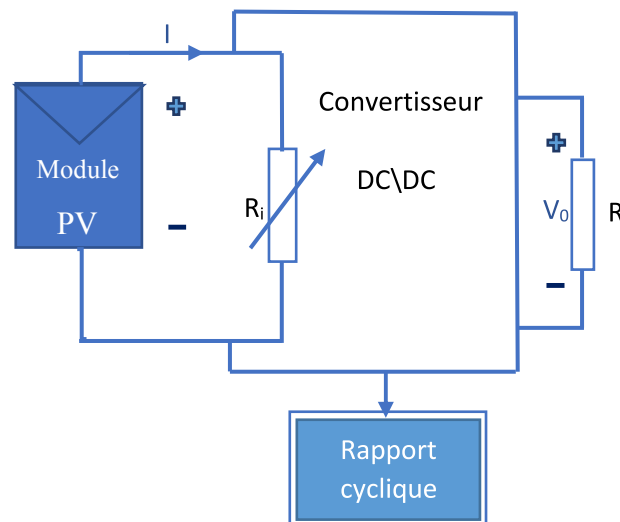


Figure II.5 Traceurs à base de convertisseurs DC/DC.

La relation de transformation dans un transformateur à courant continu peut être commandée électriquement en modifiant le rapport cyclique du convertisseur dans l'intervalle  $[0, 1]$ . La Figure II.5 montre la base des convertisseurs DC-DC et la représentation de la résistance d'entrée en fonction du rapport cyclique pour CCM.

Les relations entre la résistance d'entrée ( $R_i$ ) et la résistance de sortie émulée aux bornes du module PV, l'inductance équivalente ( $L_{eq}$ ), et la charge connectée au convertisseur ( $R$ ) peuvent être obtenues dans les deux modes à la fois CCM et DCM.

Les expressions suivantes ont été obtenues en supposant que les convertisseurs sont sans pertes et avec des petites amplitudes d'ondulation de commutation par rapport à leurs composantes continues respectives [8][9].

Les analyses précédentes des convertisseurs Buck, Boost et Buck-Boost dérivés sont résumées dans le tableau (2. 1). Le paramètre sans dimension  $K$  est une mesure de la tendance d'un convertisseur pour fonctionner dans le DCM. Les grandes valeurs de  $K$  mènent à CCM, tandis que les petits mènent à DCM. La valeur critique de  $K$  à la limite entre les modes ( $K_{crit.}$ ) est une fonction du rapport cyclique. Si  $K$  est supérieur à l'unité, alors le convertisseur fonctionne en CCM pour tous les cycles d'utilisation.

### II.5.6 Traceurs à base de charge capacitive

Cette méthode est basée sur la polarisation du module PV par un condensateur qui se charge durant le passage du point court-circuit au point de circuit ouvert. Un circuit schématique utilisant ce principe est représenté sur la Figure II.6 :

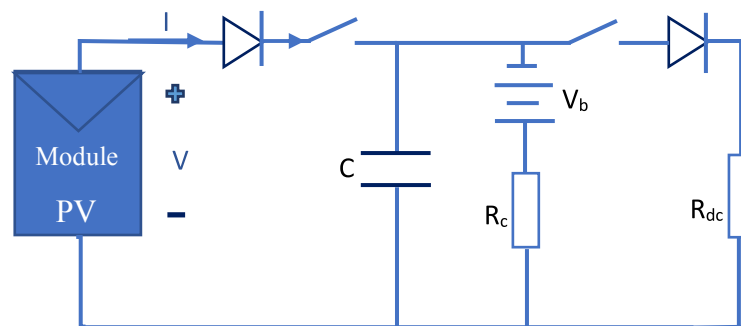


Figure II.6 Traceurs à base de charge capacitive.

Au début de la mesure, le condensateur est court-circuité, et lorsque le commutateur  $k_2$  est ouvert et  $k_1$  est fermé, le chargement des condensateurs commence. Comme la charge du condensateur augmente, le courant est en baisse et la tension augmente.

Lorsque la charge est terminée, le courant fourni par le module devient égal à zéro et la condition de circuit ouvert est réalisée. Au lieu de commencer en court-circuit, nous pourrions commencer par  $k_3$  fermé, de sorte que le condensateur serait initialement chargé à tension négative, et la courbe  $I(V)$  coupe l'axe du courant, afin d'obtenir le courant de court-circuit (ISC). Pour obtenir une courbe  $I(V)$  fiable avec la méthode de condensateur, les trois commutateurs ( $k_1$ ,  $k_2$  et  $k_3$ ) doivent être activés avec la séquence appropriée, et la décharge du condensateur avant est nécessaire pour démarrer une nouvelle mesure [10].

### **II.5.7 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'acquisition
(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].	Charge Electronique	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.5.8 Les Avantages et les inconvénients de différents Méthodes

Le tableau II.3 regroupe les principaux avantages et inconvénients des différentes méthodes que nous avons citées dans les paragraphes précédents.

**Tableaux II.3** Les Avantages et les inconvénients des différentes Méthodes.

Méthodes	Avantages	Inconvénients
Résistance variable	1) Très bon marché et facile à remplacer. 2) Méthode la plus simple.	• Fiabilité et la réponse est faible nécessité de programmer en cas d'utilisation d'une résistance variable programmable
Charge capacitive	1)- Excellentes utilisations de leurs caractéristiques pour conduisant une tension variable. 2)- En chargeant le condensateur à négatif le deuxième quadrant de tension peut être obtenue.	1)- Relativement peu fiable dans circuits - pour chaque nouveau mesuré le condensateur doit être déchargé. 2)- Difficile de contrôler les commutateurs pour fonctionner correctement séquence.
Amplificateur de Puissance Bipolaire	1)- Circuit simple 2)- Le courant d'obscurité peut également être mesuré en utilisant cette méthode.	1)- Les interrupteurs (BJT) devraient être exploités en trois modes. 2)- Ne peut être appliqué pour les grands systèmes d'alimentation.
Charge électronique	1)- Très faible. 2)- La fréquence de MOSFET est très élevée (très vite).	1)- Il a une haute impédance et faible Capacité. 2)- Les hautes tensions peuvent détruire le MOSFET.
Alimentation à quatre quadrants	1)- L'affichage direct de la sortie est possible dans cette méthode. 2)- Avec cette méthode deuxième et troisième Des courbes en quadrant peuvent également être obtenues.	1)- Le coût est élevé. 2)- difficile à construire en raison de plus nombre de commutateurs. Et ne peut pas être utilisé pour les grands systèmes PV.
Convertisseurs DC/DC	1)- Haute efficacité. 2)- Peut gérer un grand courant de Sortie.	1)- Conception compliquée Avec ondulations dues à l'inducteur. 2) facteur de coût.

### II.6 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.6.1 Le PV200 Testeur PV solaire avec traçage de courbe I-V

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.



Figure II.7 PV200 Testeur PV solaire.

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.

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.6.2 L'analyseur de module solaire (testeur de courbe photovoltaïque I-V)

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.8 L'analyseur de module solaire MECO

#### a- Caractéristiques principales

- Test de courbe I-V pour panneau solaire / module / cellule
- Max. Panneau solaire / Module / Puissance de la cellule (Pmax) search by Balayage automatique: 60V, 12A (capacité 500W).
- meilleure résolution: 1mV, 1mA.
- Test I-V manuel à point unique.

- Max. Tension ( $V_{maxp}$ ) à  $P_{max}$ .
- Max. Courant ( $I_{maxp}$ ) à  $P_{max}$ .
- Tension en circuit ouvert ( $V_{open}$ ).
- Courant sur le circuit court ( $I_{short}$ ).
- Courbe I-V avec curseur pour afficher chaque point de données.
- Efficacité (%) Calcul du panneau solaire.
- Réglage de la zone du panneau solaire:  $0,001 \text{ m}^2 \sim 9999 \text{ m}^2$ .
- Réglage standard de la source lumineuse:  $10 \text{ W} / \text{m}^2 \sim 1000 \text{ W} / \text{m}^2$ .
- 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:  $0 \sim 99 \text{ min}$ .
- grand écran LCD avec Backlight.

### **b- 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.6.3 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.8 L'I-V500w Testeur PV solaire

### Caractéristiques

- 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 AutoStart.
- APP HTANALYSIS.

### II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons principalement présenté les différentes méthodes de caractérisation de panneau photovoltaïque. Chacune de ces méthodes présente des avantages et des inconvénients liés à leur implémentation matérielle, les outils exposés dans la littérature différents les uns des autres par leur vitesse de caractérisation, leur précision et leur méthode d'affichage.

Nous avons aussi présenté quelques exemples d'appareils commerciaux utilisés dans le test et le diagnostic des panneaux de courbe panneaux photovoltaïques.

### III.1 Introduction

Pour la conception du testeur de panneau photovoltaïque, nous avons choisi d'utiliser, un convertisseur de puissance continu-continu, ceci permet d'extraire la caractéristique courant-tension d'un panneau photovoltaïque de manière efficace et à moindre coût. Ce type de convertisseur permet de traiter une large gamme de puissance qui s'étend de quelques Watts à des centaines de kilowatts.

### III.2 Les convertisseurs de puissance continu-continu

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques continu-continu permettant de générer une source de tension continue variable à partir d'une source de tension continue fixe. Ils se composent de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance dans le cas idéal, c'est pour cette raison que les hacheurs ont de bons rendements.

Généralement le commutateur est un transistor MOSFET qui travaille en mode bloqué saturé. Si le commutateur est bloqué, son courant est nul, il ne dissipe donc aucune puissance, s'il est saturé, la chute de tension à ses bornes sera presque nulle et par conséquent la puissance perdue sera très petite.

Le commutateur du convertisseur est commandé par un signal carré modulé en largeur d'impulsion par un rapport cyclique  $\alpha$  variable. De la figure (III.1) on ferme le commutateur pendant un temps de fermeture égal à  $\alpha T$ , ensuite on l'ouvre durant un temps d'ouverture égal à  $(1-\alpha)T$ . Où  $\alpha$  est le rapport cyclique du commutateur ( $\alpha \in [0,1]$ ).

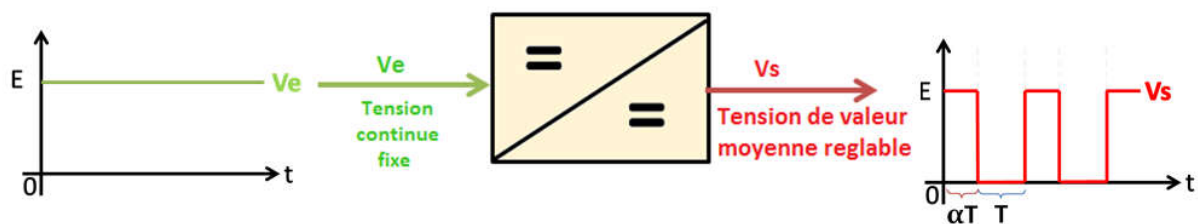


Figure III.1 Tensions  $V_e$  et  $V_s$  dans un convertisseur DC/DC

### III.3 Classification des convertisseurs DC-DC (ou hacheurs)

Selon le parcours de l'énergie électrique entre la source et la charge, on distingue deux catégories de hacheurs : réversibles et non réversibles (Figure. III2) :

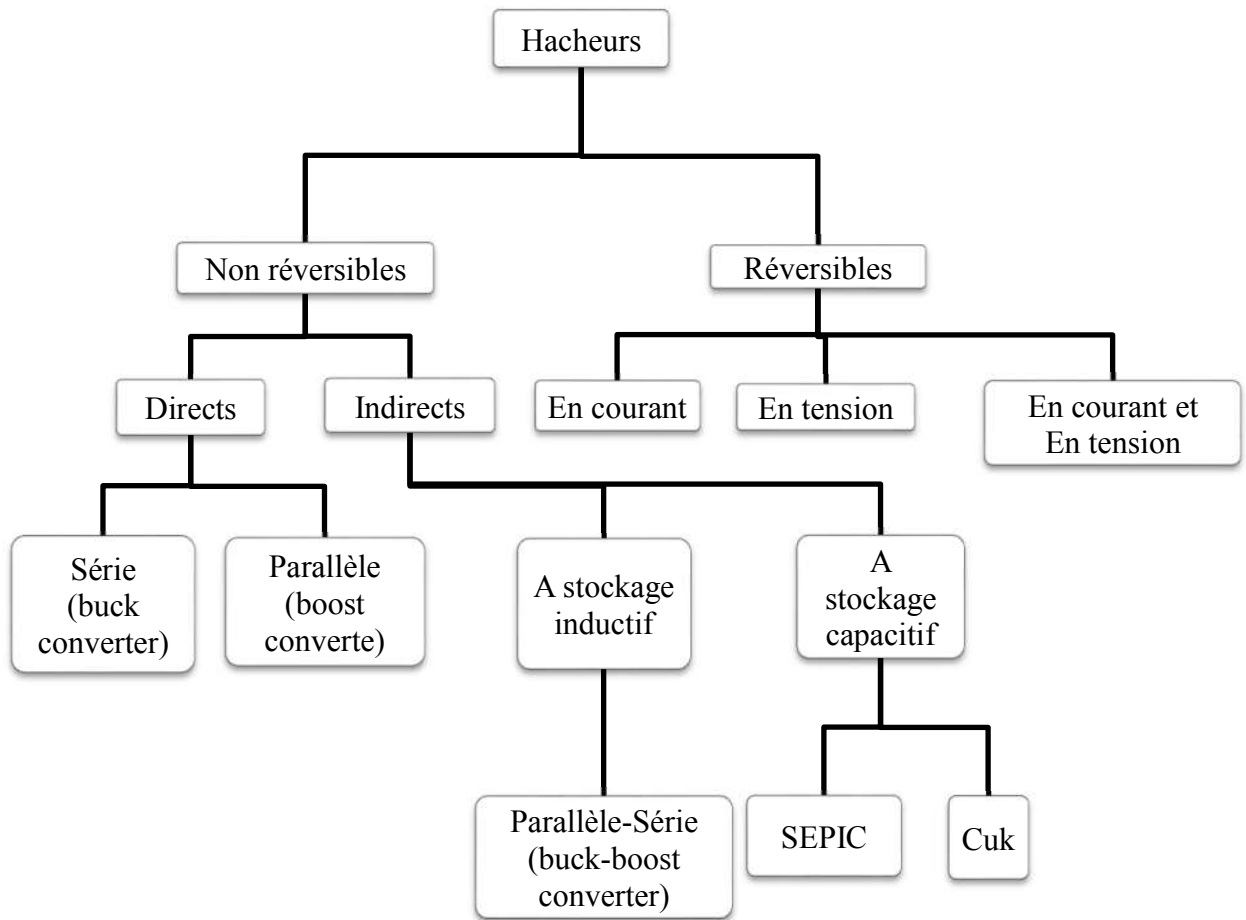


Figure III.2 Différents types de convertisseurs DC-DC

#### III.3.1 Convertisseurs DC-DC réversibles

Lorsque l'énergie, peut transit de manière bidirectionnelle, c'est à dire aussi bien dans un sens que dans l'autre. Les notions d'entrée et de sortie ne sont alors plus évidentes (Figure III.3) :



Figure III.3 Synoptique d'un convertisseur DC-DC réversible

Dans cette catégorie, on distingue trois types :

- a) Hacheur réversible en tension.
- b) Hacheur réversible en courant.
- c) Hacheur réversible en courant et en tension.

### III.3.2 Convertisseurs DC-DC non réversibles

Ce sont des structures de hacheurs qui n'assurent pas la réversibilité, ni en tension, ni en courant. L'énergie ne peut donc aller que de la source vers la charge (Figure III.4). Dans cette catégorie, on distingue deux types :



Figure III.4 Synoptique d'un convertisseur DC-DC non réversible.

#### III.3.2.1 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 III.5 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.

La figure (III.5) explique le fonctionnement du convertisseur Buck durant une période de Commutation  $T_d$ . Pendant le temps de fermeture ( $t \in [0, \alpha \cdot T_d]$ ), la diode se bloque et un courant circule dans la charge à travers l'inductance, cette dernière se charge alors d'énergie. Dès que le commutateur s'ouvre ( $t \in [\alpha \cdot T_d, T_d]$ ), la source et la charge ne sont plus en contact, la diode se sature et l'inductance libère une énergie à la charge avec une diminution du courant  $i_k$ .

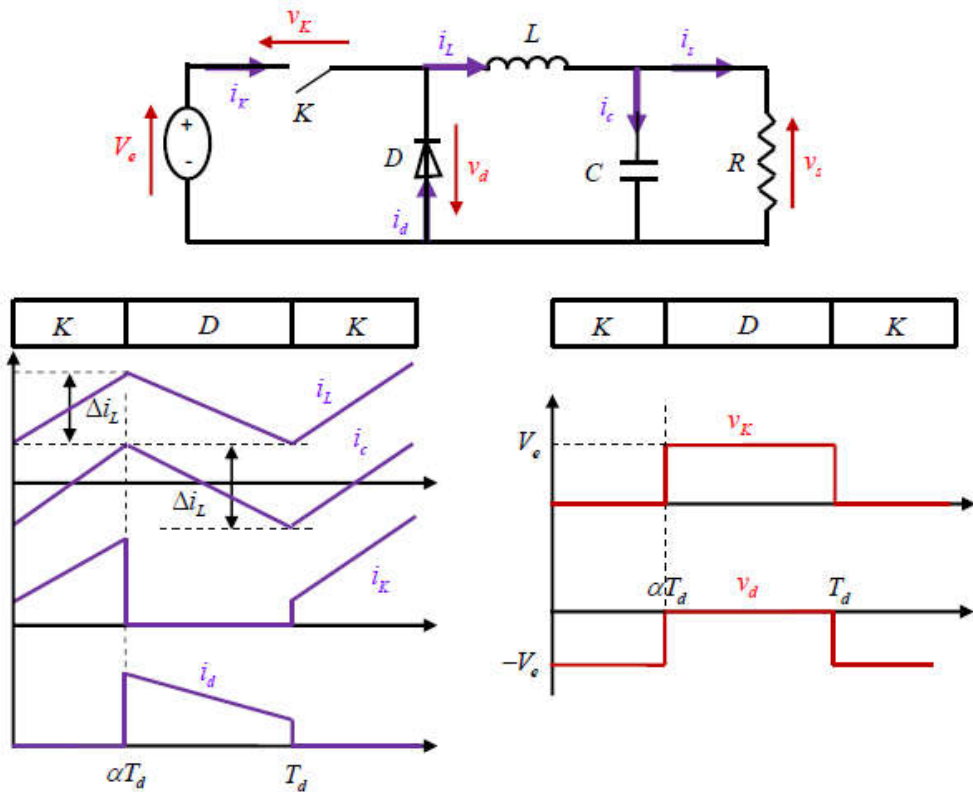


Figure III.5 Formes d’ondes des courants et tensions du convertisseur Buck.

**III.3.2.2 Hacheur survolteur ou parallèle (Boost convertter)**

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 III.6 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).

La figure (III.6) explique le fonctionnement du convertisseur Boost durant une période de commutation  $T_d$ . Pendant le temps de fermeture ( $t \in [0, \alpha \cdot T_d]$ ), le courant dans l’inductance croît progressivement, au fur et à mesure elle emmagasine de l’énergie. Dès que le commutateur s’ouvre ( $t \in [\alpha \cdot T_d, T_d]$ ), l’inductance  $L$  s’oppose à la diminution du courant  $i_d$ , ainsi elle génère une tension qui s’ajoute à la tension de source, qui s’applique sur la charge  $R$  à travers la diode  $D$ .

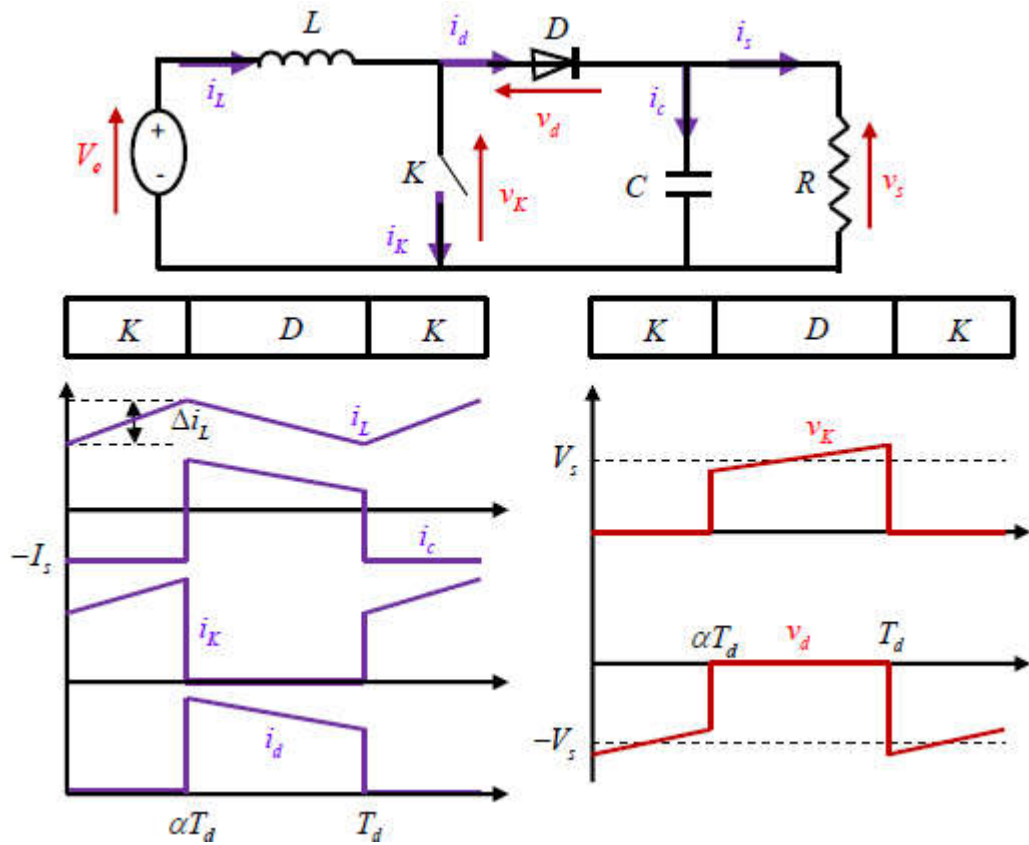


Figure III.6 Formes d’ondes des courants et tensions du convertisseur Boost.

**III.3.2.3 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 III.7 montre la structure et les formes d’ondes du courant et de la tension de ce convertisseur.

La figure (III.7) explique le fonctionnement du convertisseur Buck-Boost durant une période de commutation  $T_d$ . Pendant le temps de fermeture ( $t \in [0, \alpha.T_d]$ ), la tension de la source est appliquée à l’inductance qui se charge d’énergie. Durant la période d’ouverture ( $t \in [\alpha.T_d, T_d]$ ), la tension de l’inductance se trouve appliquée à la charge R et son courant circule dans le sens inverse des aiguilles d’une montre à travers la diode D. Ainsi, la tension de sortie  $V_s$  du convertisseur sera négative.

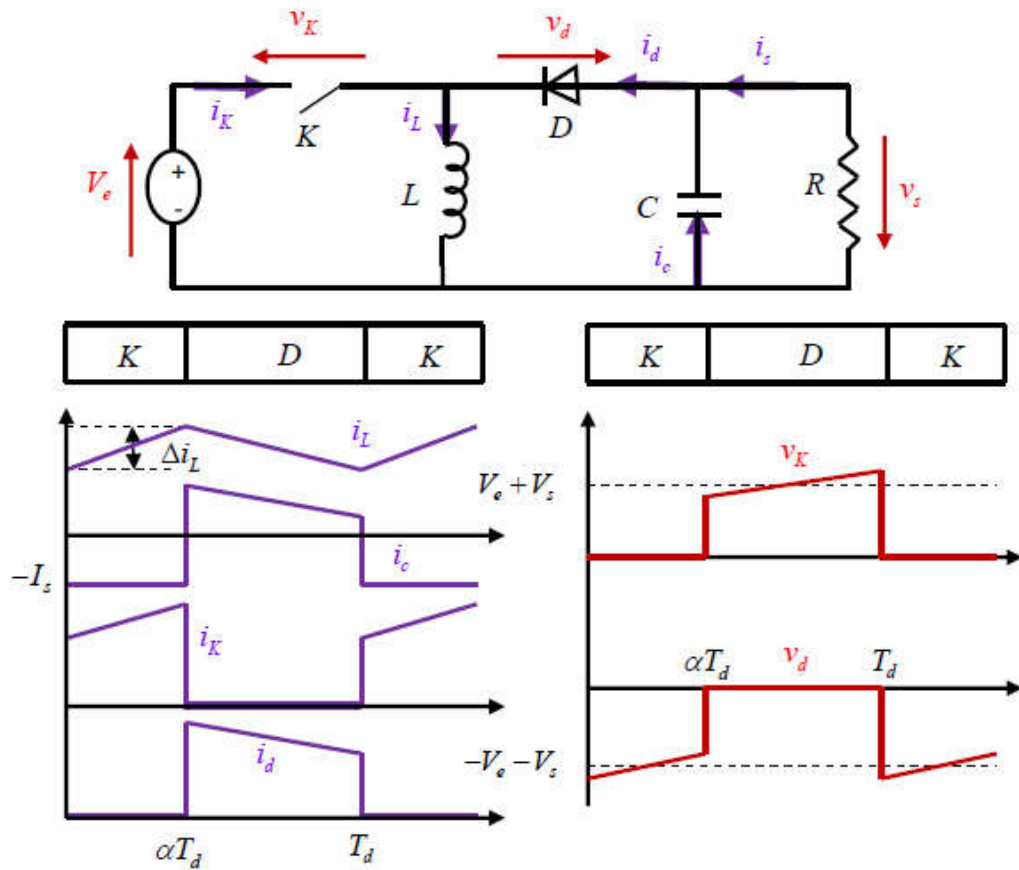


Figure III.7 Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Buck-Boost.

### III.3.2.4 Hacheur à stockage capacitif

#### a) Convertisseur Uck

Ce type de convertisseur est un montage abaisseur-élevateur et inverseur de tension. Il est considéré comme une liaison indirecte entre deux sources de courant continu, par l'intermédiaire d'une source de tension continue (condensateur) qui doit accumuler puis restituer au récepteur l'énergie délivrée par le générateur, La figure III.8 illustre le circuit électrique du convertisseur Cük et ses formes d'onde de courant et de tension.

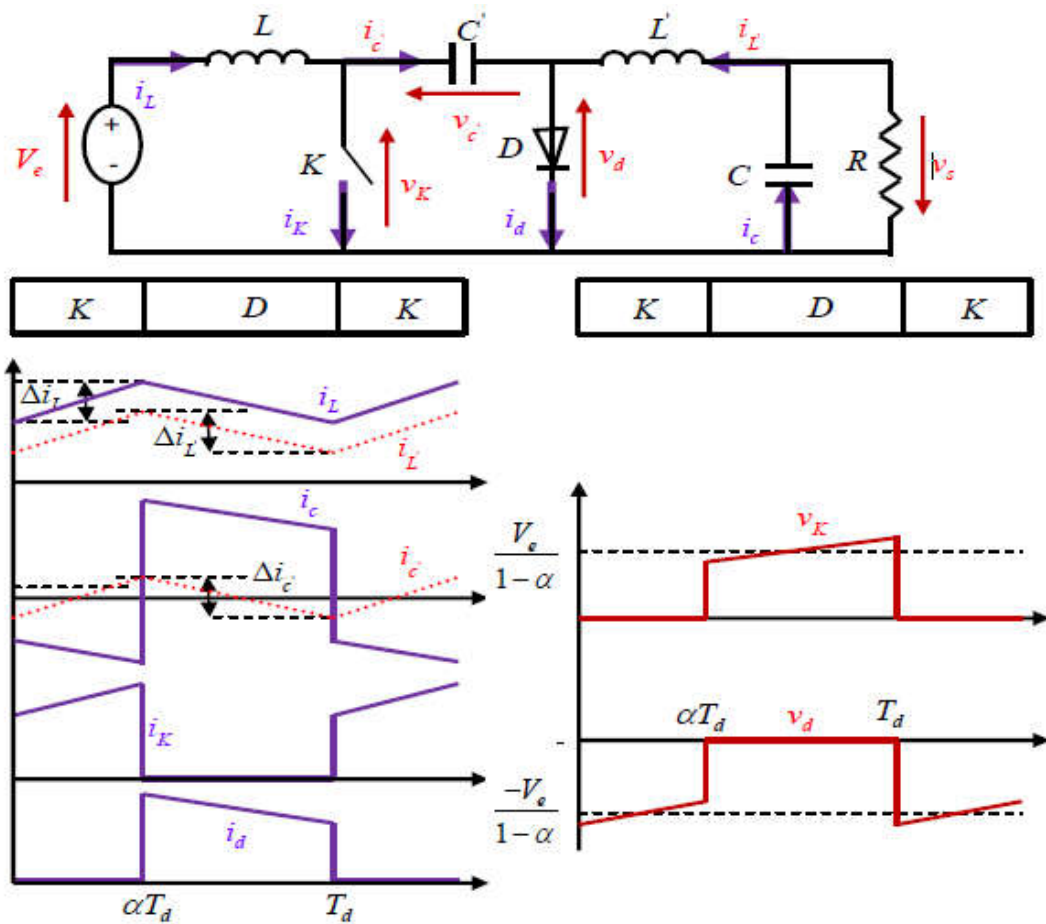


Figure III.8 Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Cük.

**b) Convertisseur SEPIC (Single Ended Primary Inductor Converter)**

La structure du convertisseur SEPIC se déduit de celle du convertisseur Cük en permutant la diode et l'inductance de sortie, La figure III.9 illustre le circuit électrique du convertisseur Cuk et ses formes d'ondes de courant et de tension. Ce type de convertisseur présente des caractéristiques similaires à celles du convertisseur SEPIC, sauf qu'il n'est plus inverseur de tension.

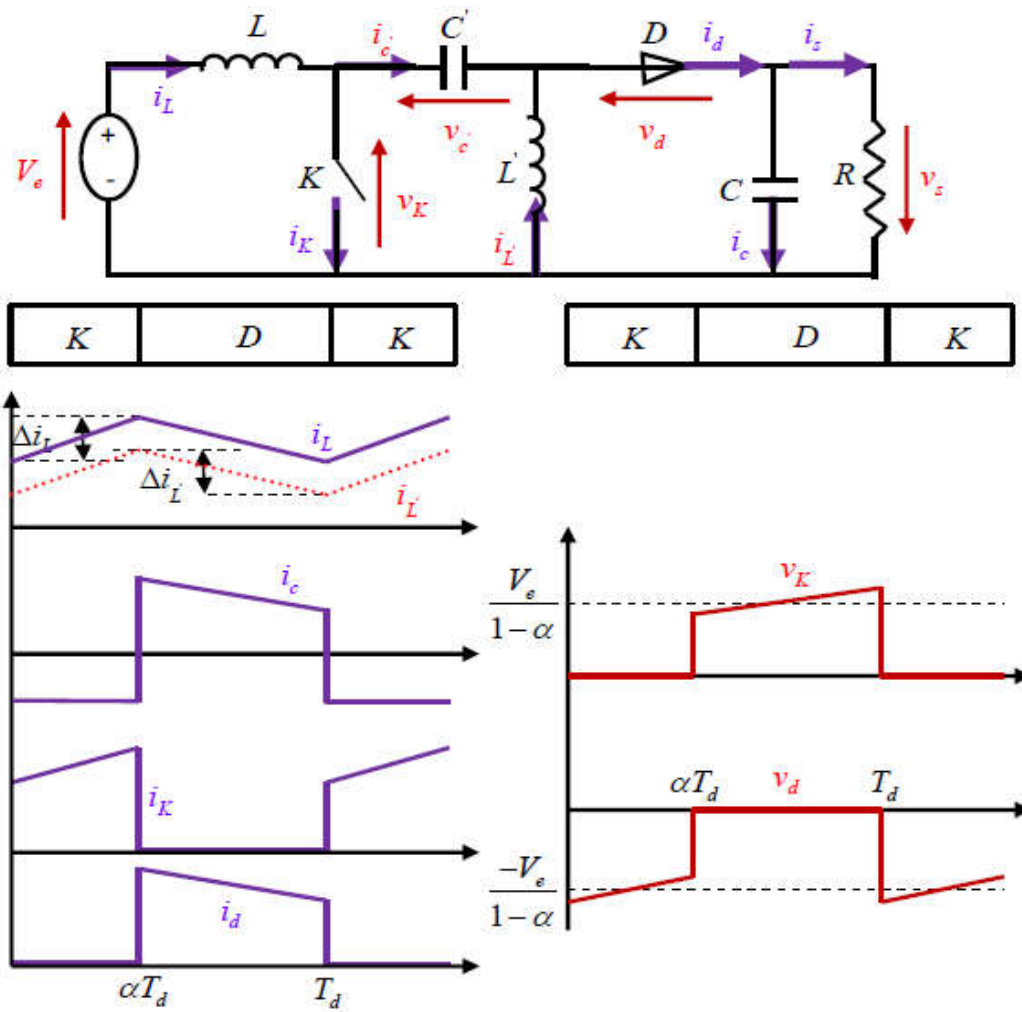


Figure III.9 Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur SEPIC.

### III.4 Récapitulatif d'analyse et choix du convertisseur

Une comparaison de ces convertisseurs est donnée par le Tableau II.1 qui récapitule l'analyse faite auparavant sur les différents convertisseurs,

Tableau III.1: Récapitulatif des caractéristiques des convertisseurs continu-continu.

Convertisseurs	Gain en tension	Contraintes en tension	Contraintes en courant
<b>Buck</b>	$\alpha$	$V_e$	$I_L + \frac{\Delta i_L}{2}$
<b>Boost</b>	$\frac{1}{1-\alpha}$	$\frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_S}{2}$	$\frac{I_S}{1-\alpha} + \frac{\Delta i_L}{2}$
<b>Buck- Boost</b>	$\frac{-\alpha}{1-\alpha}$	$\frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_S}{2}$	$\frac{I_S}{1-\alpha} + \frac{\Delta i}{2}$
<b>Cuk</b>	$\frac{\alpha}{1-\alpha}$	$\frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_{C'}}{2}$	$I_L + I_{L'} + \frac{\Delta i_L + \Delta i_{L'}}{2}$
<b>SEPIC</b>	$\frac{\alpha}{1-\alpha}$	$\frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_{C'} + \Delta V_S}{2}$	$I_L + I_{L'} + \frac{\Delta i_L + \Delta i_{L'}}{2}$

D'après la comparaison entre les convertisseurs on a choisi le convertisseur SEPIC parce qu'est un convertisseur élévateur et abaisseur, De plus, ce convertisseur a d'autres particularités, par rapport aux autres convertisseurs.

### III.5 Avantages du convertisseur SEPIC

- Il peut fonctionner comme élévateur ou abaisseur de tension.
- Il contient peu de composants.
- La commande du transistor se réfère à la masse.
- L'ondulation du courant d'entrée est limitée.
- Il n'y a pas de liaison entre l'entrée et la sortie en continu, grâce à la transmission d'énergie en série à travers un condensateur.
- Un court-circuit de la charge n'est donc pas répercuté sur l'entrée [1].

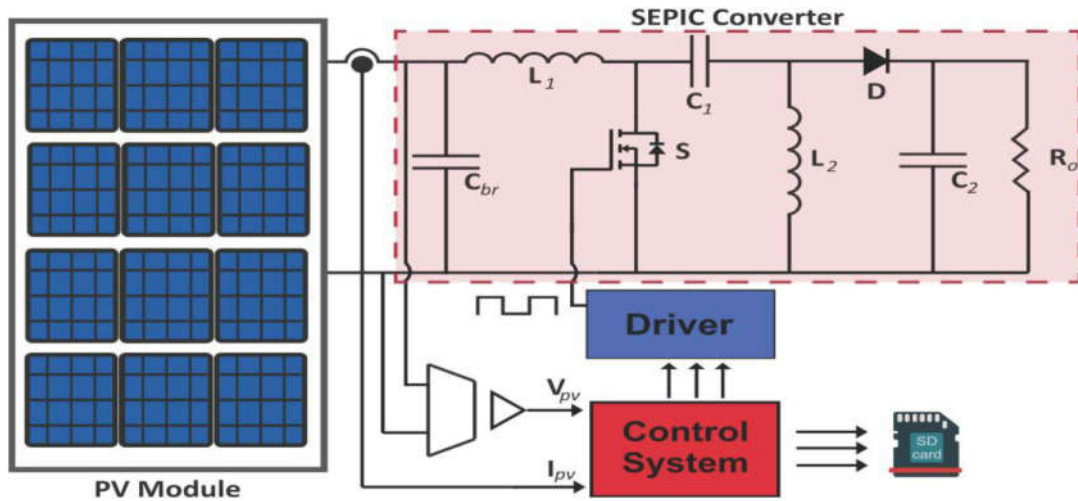


Figure III.10 Schéma simplifié du traceur PV proposé.

### III.6 Principe de fonctionnement d'un convertisseur SEPIC

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

#### A. De 0 à $\alpha T$ : Phase d'accumulation d'énergie

On ferme l'interrupteur K.

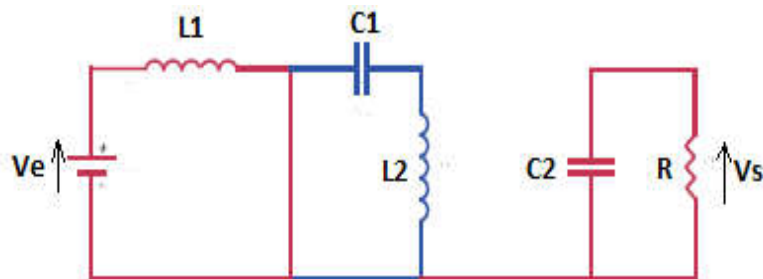


Figure III.11 SEPIC avec interrupteur fermé.

On applique aux bornes de l'inductance  $L_1$  la tension d'entrée  $V_e$ , le courant traversant  $L_1$  va augmenter linéairement, l'énergie est stockée dans  $L_1$ . L'énergie contenue dans le condensateur  $C_1$  passe dans l'inductance  $L_2$ , et celle du condensateur  $C_2$  vers la charge. La tension est maintenue constante par le condensateur  $C_2$  (Figure III.11).

### B. De $\alpha T$ à $T$ : Phase de roue libre

On ouvre l'interrupteur K, ainsi la diode D se met à conduire.

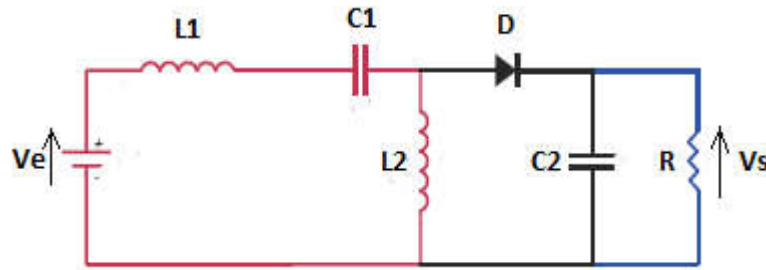


Figure III.12 SEPIC interrupteur ouvert.

L'énergie emmagasinée dans l'inductance  $L1$  est restituée dans le condensateur  $C1$ . L'énergie dans  $L2$  est transférée vers  $C2$  (Figure III.12).

## III.7 Dimensionnement du convertisseur SEPIC

### III.7.1 Rapport cyclique

Le rapport cyclique est donné par :

$$\alpha = \frac{V_e + V_d}{V_e + V_s + V_d} \quad (\text{III.1}).$$

Avec  $V_e$  la tension d'entrée,  $V_s$  la tension de sortie et  $V_D$  la tension de seuil de la diode. Avec un rapport cyclique proche de 50%, la tension d'entrée est égale à la tension de sortie, le gain est unitaire.

### III.7.2 Inductances

Les valeurs d'inductances sont déterminées principalement par l'ondulation de courant acceptée. Généralement, on autorise une ondulation de 40% le courant d'entrée maximal pour la tension d'entrée minimale. L'ondulation de courant est définie par l'équation suivante :

$$\Delta I_L = I_{IN} \times 40\% = I_{OUT} \times \frac{V_{out}}{V_{in}} \times 40\% \quad (\text{III.2}).$$

Soit les valeurs d'inductances calculées par :

$$L1 = L2 = L = \frac{V_{in}}{\Delta I_L \times f} \times \alpha_{max} \quad (\text{III.3}).$$

Avec  $f$  la fréquence de découpage.

Pour s'assurer que le courant dans l'inductance ne sature pas, la courante crête est donné par :

$$IL1 = IOUT \times \frac{V_{out} + V_d}{V_{in}} \times \left(1 + \frac{40\%}{2}\right) \quad (III.4).$$

$$IL2 = IOUT \times \left(1 + \frac{40\%}{2}\right) \quad (III.5).$$

Si les inductances L1 et L2 sont bobinées sur le même circuit magnétique, les valeurs d'inductances sont remplacées par 2L à cause de la mutuelle inductance. Les valeurs d'inductances sont alors :

$$L1' = L2' = \frac{L}{2} = \frac{V_{in}}{\Delta IL \times f} \times \alpha_{max} \quad (III.6).$$

### III.7.3 Condensateur de couplage

Le condensateur de couplage doit être capable de laisser passer le courant efficace donné par :

$$IC1 = IOUT \times \sqrt{\frac{V_{out} + V_d}{V_{in}}} \quad (III.7).$$

Le condensateur est dimensionné à partir de l'ondulation de tension crête à crête voulue définie par la formule suivante :

$$\Delta VC1 = \frac{I_{out} \times \alpha_{max}}{C1 \times f} \quad (III.8).$$

### III.7.4 Condensateur de filtrage

Le condensateur C2 à la sortie du convertisseur SEPIC permet de filtrer la tension et de maintenir celle-ci constante. La formule permettant de dimensionner le condensateur est donnée par :

$$C2 = \frac{I_{out} \times \alpha_{max}}{V_{ripple} \times 0.5 \times f} \quad (III.9).$$

Avec  $I_{out}$  le courant dans la charge,  $V_{ripple}$  l'ondulation de tension.

### III.7.5 Le transistor de puissance

Le transistor doit être capable de supporter une tension  $V_K = V_{IN} + V_{OUT}$ , et être traverser par un courant crête égal à  $I_{K(peak)} = I_{L1(peak)} + I_{L2(peak)}$

Le courant efficace est donné par :

$$IK(rms) = IOUT \sqrt{\frac{(V_{OUT} + V_{IN(min)} + V_D) \times (V_{OUT} + V_D)}{V_{IN}^2}} \quad (III.10).$$

Il faudra veiller à ce que la puissance dissipable par le transistor soit inférieure aux pertes par conduction et par commutation.

### III.7.6 La diode de puissance

La diode possède les mêmes contraintes que le transistor, elle doit supporter un courant  $I_{D(\text{peak})} = I_{K(\text{peak})}$ . Elle doit résister à une tension inverse de  $V_D = V_{IN(\text{max})} + V_{OUT(\text{max})}$ .

Le courant moyen dans la diode est égal au courant de sortie  $I_{OUT}$ .

Il faudra veiller à ce que la puissance dissipable par la diode soit inférieure aux pertes par conduction et par commutations (voir Radiateur). Il est recommandé de choisir des diodes Schottky pour limiter ses pertes.

### III.7.7 Radiateur

Un composant électronique traversé par un courant électrique produit de la chaleur par pertes par effet joule. Lorsque ce courant est élevé, cette chaleur est perceptible. Ces pertes sont de deux types :

- ✓ Les pertes par conduction
- ✓ Et les pertes par commutation

Tableau III.2 : Récapitulatif des pertes par conduction et par commutation.

	<b>Transistor MOSFET</b>	<b>Diode</b>
<b>Pertes par conduction</b>	$R_{ds_{on}} \times I_{Def}^2$	$V_F \cdot \langle I_F \rangle + R_0 \cdot I_F^2$
<b>Pertes par commutations</b>	$\frac{1}{2} \times V_{DS} \times I_D \times (t_r + t_f) \times f$	$Q_{rr} \times V_r \times f$

Il arrive que les pertes par commutation soient supérieures aux pertes par conduction. En particulier lorsque la fréquence est élevée. Les pertes par conduction tendent à diminuer compte tenu de l'évolution des semi-conducteurs et de la diminution de la valeur de la résistance interne  $R_{ds_{on}}$  dans le cas de MOSFET. Ces pertes peuvent être supérieures à la puissance maximale dissipée par le semi-conducteur. Cette puissance dépend de la température ambiante, conventionnellement 25°C, de la température maximale de la jonction ( $T_{(v-j)\text{max}}$ ) et de la résistance thermique jonction-boîtier ( $R_{th(j-c)}$ ), elle est définie par la relation suivante :

$$P_D = \frac{T_{(v-j)\text{max}} - T_{amb}}{R_{th(j-amb)}} \quad (\text{III.11}).$$

A partir de cette formule, on en déduit la valeur de la résistance thermique du dissipateur :

$$R_{th(j-amb)} = \frac{T_{(v-j)\text{max}} - T_{amb}}{P_D} - (R_{th(j-c)} + R_{th(c-r)}) \quad (\text{III.12}).$$

La valeur calculée  $R_{th(r-amb)}$  permet de choisir le dissipateur thermique adéquate.

### Calcul numérique

D'après notre recherche on a choisi de mettre le modèle équivalent des équations du SEPIC sur Matlab/Simulink comme suit :

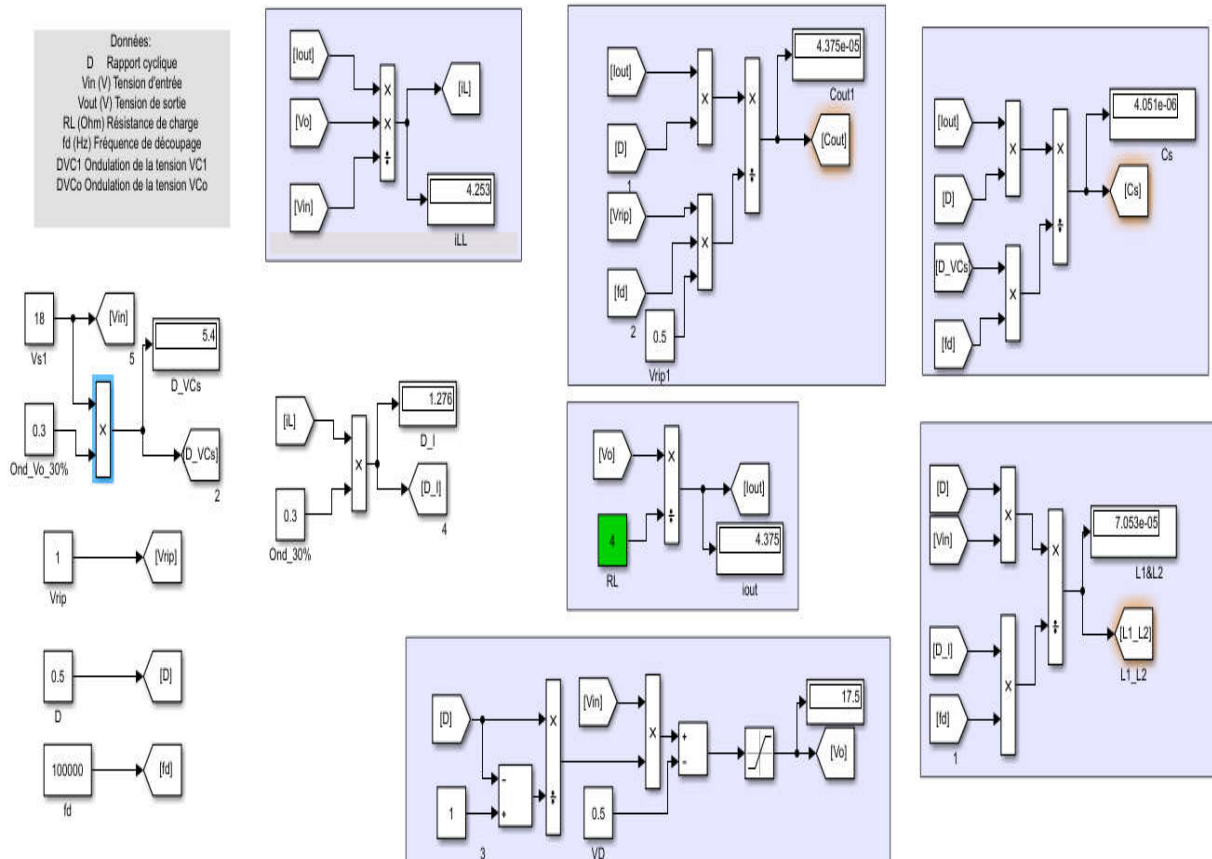


Figure III.14 Schéma du modèle SIMULINK pour le dimensionnement du convertisseur SEPIC.

Les équations précédentes ont été utilisées pour spécifier les paramètres du convertisseur, Les valeurs critiques étaient sélectionnées pour des cycles de service de 5%, 50% et 95%. Pour assurer le fonctionnement du convertisseur SEPIC sur toute la plage de fonctionnement. Et obtention des valeurs de capacité et d'inductance.

Le but de la détermination des ondulations de courants et de tensions permet de dimensionner les inductances des bobines (L1 et L2) et les capacités des condensateurs (Cs et Cout), Où cela les ondulations de courants ont une relation avec les inductances des bobines, si les valeurs L1 et L2 sont faibles, les ondulations des courants  $i_1$  et  $i_2$  sont élevées ce qui augmente la valeur maximum du courant dans les interrupteurs.

Tableau III.3 : les valeurs des inductances et des capacités et du rapport cyclique  $\alpha$ .

<b>Le rapport cyclique (<math>\alpha</math>)</b>	<b>Inductances L1&amp;L2 (H)</b>	<b>Condensateur de couplage <math>C_s</math> (F)</b>	<b>Condensateur de filtrage <math>C_{out}</math> (F)</b>
0.05	0.01079	1.036e-08	1.118e-07
0.5	7.053e-05	4.051e-06	4.375e-05
0.95	3.519e-07	0.0001502	0.001622

À travers les résultats du tableau, nous remarquons que les condensateurs prennent des grandes valeurs lorsque la valeur du cycle de travail est 95% et lorsque la valeur du cycle de travail est 5% les inductances prennent des grandes valeurs, donc nous constatons que les valeurs des capacités et des inductances appropriées dans notre travail lorsque la valeur du cycle de travail est 50%.

### III.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté d'une manière générale les différents types de convertisseurs DC-DC, en particulier les convertisseurs non réversibles et leurs avantages nous avons utilisé le type SEPIC et pour le suivi de  $I(V)$  et  $P(V)$  les courbes du module PV sont effectuées via la commande système responsable de l'augmentation du cycle de service du convertisseur, de 1% à 99%. Le convertisseur SEPIC simule une résistance variable modifiée par variation du rapport cyclique, modifiant ainsi le mode de fonctionnement point du module PV le long de la courbe  $I(V)$ .

## IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons faire la description du système de test que nous allons réaliser. Le système est composé d'une carte électronique, d'un convertisseur de puissance SEPIC et d'un programme d'application. Ainsi, dans ce qui suit nous aborderons la partie pratique de notre projet, qui repose notamment sur la conception d'un système de mesure de tension et de courant pour tracer la courbe  $I(V)$ , aussi il est nécessaire de mesurer à chaque test la température du module PV et l'intensité de l'éclairement.

## IV.2 Structure détaillée 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.

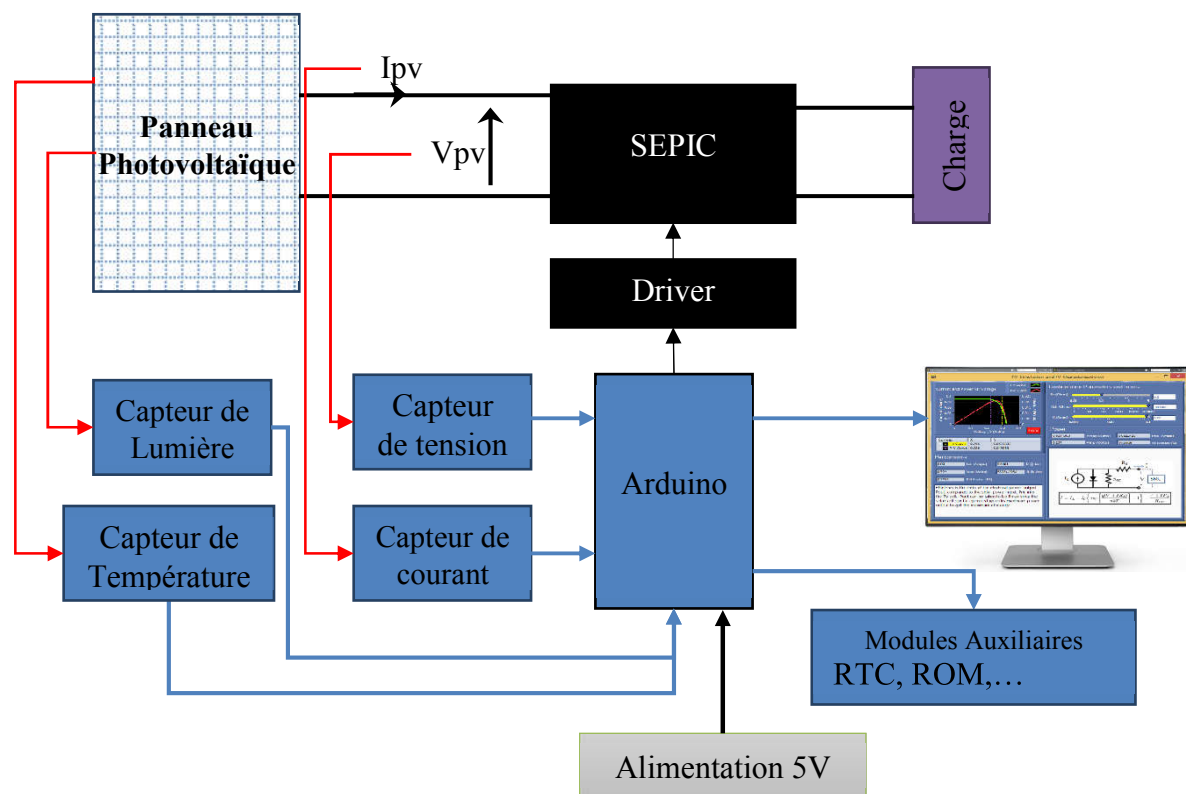


Figure IV.1 Schéma synoptique du système

La figure IV.I montre le schéma synoptique du système global de test, il est composé de trois étages : l'étage de mesure (courant, tension, température et éclairement), l'étage d'acquisition et de traitement des données, et l'étage de puissance. Comme le montre cette figure, nous pouvons aussi rajouter des moyens de communication pour la récupération et l'affichage des courbes mesurées. D'autres éléments électroniques peuvent être inclus dans le système global tels

que la communication sans fil (Wifi, Bluetooth, RF...), une horloge temps réel, une mémoire auxiliaire...etc.

### **IV.2.2 Fonctions exécutées par le système**

Pour que le système de mesure soit parfaitement adapté à nos exigences, nous allons spécifier dans ce qui suit l'ensemble des fonctions obligatoires que ce dernier devrait exécutés.

➤ **La mesure de la caractéristique I(V)**

- Commande du SEPIC par génération d'un signal PWM avec rapport cyclique (D) qui varie de 5% à 95% pendant un temps minimum de test.
- A chaque nouvelle valeur du rapport cyclique (D), on mesure plusieurs fois :
  - Le courant ( $I_{pv}$ ) en utilisant le module ACS712
  - La tension ( $V_{pv}$ ) en utilisant un module de diviseur de tension

➤ **La mesure de la température du panneau photovoltaïque :**

- La mesure de température du panneau PV doit s'effectuer à travers un capteur bien adapté à la mesure outdoor, plusieurs capteurs peuvent être utilisé à cet effet sui sont analogique pour les uns et numérique pour les autres. Les thermocouples, les capteur semiconducteur etc. mais un étage d'adaptation est nécessaire pour récupérer les mesures en toutes sécurité.

➤ **La mesure de l'intensité de la lumière.**

- Même constat que pour la température, l'éclairement est mesuré par différent capteur (BH1750, OPT101, LDR ...etc.), mais ces capteurs ne mesurent pas directement l'intensité de l'éclairement en  $W/m^2$  (ce qui nous intéresse le plus), mais mesure l'intensité de la lumière en Lux, qui devrai être convertir en  $W/m^2$  à travers des procédures d'étalonnage et de calibration.

➤ **La communication avec un PC**

- Un élément essentiel du système et la communication avec un PC, on peut utiliser l'interface USB, la communication Radio fréquence (nRF, Wifi, Bluetooth...), Ceci permet la récupération des données, leur traitement, leur affichage, la commande du système...etc.

➤ **D'autres fonctionnalités auxiliaires peuvent être ajoutés comme :**

- La sauvegarde des données mesure sur une carte mémoire.
- L'affichage des données mesurées ou d'information qui concerne le système.
- La mesure du temps (par un RTC – Real Time Clock) **(peut être obligatoire)**.
- Des boutons pour la commande du système **(peut être obligatoire)**.

Tableau IV.1: Description générale des composant électronique

Désignation	Fonction	Description photographique
Arduino nano	Microcontrôleur	
IR2104	Driver pour MOSFET	
IRFZ44N	MOSFET (NMOS)	
MBR1060CT	Diode Schottky	
Resistance 4Ω (100Watt)	Resistance bobinée boitier aluminium	
Standard Voltage Sensor Module	Module de mesure de tension (0V – 25 V) (diviseur de tension)	
ACS712	Module pour la mesure du courant par effet hall	
MAX6675 (ou DS18B20)	Module à thermocouple pour la mesure de température	
BH1750 ou OPT101, ou LDR	Mesure de l'intensité de la lumière	
LM2596s	Hacheur dévolteur 3A	

### IV.2.3 Composants pour la réalisation du dispositif de caractérisation

Lors de la conception du système nous avons dû faire le choix des composants au préalable de la conception, et ceci est dû à la non disponibilité de la plupart d'entre eux. De ce fait, nous avons listé ces différents composants que nous avons choisis dans le tableau IV.1, une description plus détaillée est donnée plus loin dans ce chapitre.

### IV.3 Description du système

Les éléments essentiels de notre travail, qui consiste en partie à l'acquisition de données qui mesurent la tension et le courant, l'éclairage et la température en utilisant plusieurs capteurs de différentes technologies. Aussi, plusieurs autres composants nécessaires à la mise en œuvre du système sont détaillés dans ce qui suit.

#### IV.3.1 Mesure du courant et de la tension

Le courant et la tension mesurés sont les données essentielles pour la caractérisation. Ils sont utilisés pour 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.

##### IV.3.1.1 Capteur de courant

Pour la mesure du courant, nous avons utilisé le capteur de courant à effet Hall de type ACS712 qui nous fournit une tension exploitable. Cette tension est envoyée aux microcontrôleurs pour déduire le courant mesuré.

Les capteurs de courant ACS712 ont différentes gammes de mesure de  $\pm 5A$ ,  $\pm 20$  et  $\pm 30$ . La seule différence entre ces gammes de mesure est dans leur sensibilité [10]. Dans notre projet nous avons utilisé le capteur de courant ACS712ELC-20A Figure IV.2, ce capteur permet de mesurer un courant allant de  $-20A$  à  $+20A$  avec une sensibilité de  $180mV/A$ .

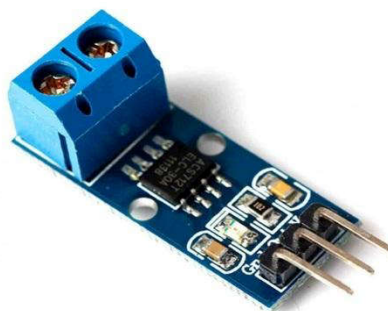


Figure IV.2 Capteur de Courant ACS712 30A.

➤ **Caractéristiques :**

- ACS712ELC--20B (version pour 20A),
- Faible niveau de bruit analogique chemin du signal,
- Bande passante est réglé via la broche FILTRE,
- 5 $\mu$ s temps de montée de sortie en réponse à l'entrée courant,
- Bande passante de 80 kHz,
- 1,5% d'erreur de sortie à 25 degrés °C,
- 1,2mOhm résistance du conducteur interne,
- 2.1 kVrms tension d'isolation minimum
- 5,0 VDC, tension d'alimentation
- La tension de sortie proportionnelle aux courants AC ou DC

### IV.3.1.2 Mesure de la tension

Nous allons utiliser pour la mesure de tension un module préfabriqué qui est composé d'un simple diviseur de tension. Le diviseur de tension est un montage électronique qui permet de diviser une tension d'entrée. Un circuit constitué de deux résistances en série. Il est couramment utilisé pour créer une tension de référence ou comme un atténuateur de signal à basse fréquence.

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 inférieur 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.3.

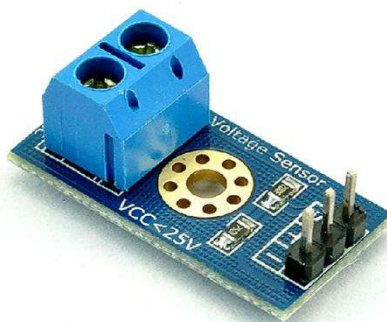


Figure IV.3 Capteur de tension.

## **IV.3.2 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 semiconducteur sont le plus souvent utilisés. Nous avons choisi d'utiliser un capteur à thermocouple de type K avec un circuit électronique de compensation MAX6675.

### **IV.3.2.2 Sonde à thermocouple**

Le thermocouple est utilisé pour la mesure de température. Celui-ci est constitué de deux fils de métaux différents, soudés à l'une de leurs extrémités. Cette jonction porte le nom usuel de « soudure chaude » et sera installé dans le milieu dont la température est à mesurer.

Les thermocouples sont bon marché et permettent la mesure dans une grande gamme de températures. Leur principal défaut est leur précision : il est assez complexe d'obtenir des mesures avec une erreur inférieure à 0,1 °C - 0,2 °C. La mesure de température par des thermocouples est basée sur l'effet Seebeck.

Un des thermocouples le plus utilisé est le Chromel-Alumel ou Thermocouple de Type K. Il possède une plage de mesure étendue (-100 à + 1370 °C), une force électromotrice importante (41310 µV à 1000 °C avec soudure froide à 0°C) et une courbe que l'on sait très bien linéariser pour obtenir sur toute l'étendue de mesure des précisions meilleures que 0,2%.

### **IV.3.2.1 Capteur de température**

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.

Le MAX6675 et le thermocouple de type K sont largement utilisée en laboratoire, dans l'industrie, et pour tout sorte de montage électronique. 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.2 : caractéristique d'un capteur

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

La figure IV.4 illustre le module MAX6675 avec une sonde thermocouple de type K.

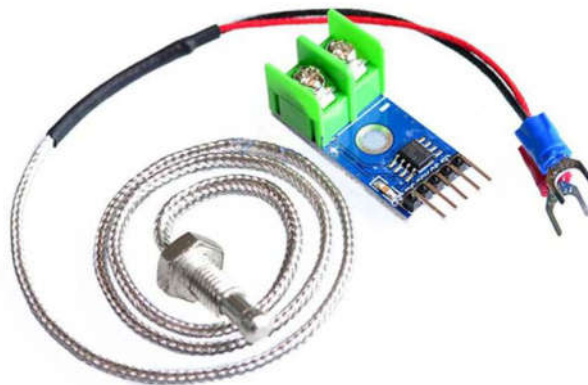


Figure IV.4 Carte d'un capteur de température MAX6675.

### IV.3.3 Meure de l'éclairement

La mesure de l'éclairement (rayonnement) solaire est très importante lors du test ou de la caractérisation d'un module photovoltaïque. Il existe plusieurs méthodes et plusieurs instruments de mesure du rayonnement solaire, la plupart des instruments professionnels sont très coûteux et ne sont pas adaptés à notre projet.

Pour la conception de notre projet nous pouvons utiliser des capteurs qui transforment la quantité de lumière reçue en un signal électrique, ainsi nous avons le choix entre des photorésistance et des photodiodes.

#### IV.3.3.1 Capture de lumière photorésistance (LDR)

La photorésistance (également appelée résistance photo-dépendante ou cellule photoconductrice) est un composant électronique dont la résistivité varie en fonction de la quantité de lumière incidente : plus elle est éclairée, plus sa résistivité baisse.

Les photorésistances sont des composants électroniques dont la résistivité varie en fonction de l'augmentation ou de la diminution de la lumière qui les atteint. Cette résistivité peut être supérieure à  $1\text{M}\Omega$  dans l'obscurité et inférieure à  $1\text{k}\Omega$  en pleine lumière, et à  $400\Omega$  en plein soleil. Elles sont en général constituées d'un serpentin de composé conducteur, qui se comporte comme un semiconducteur, déposé sur une plaque de céramique Figure IV.5.



Figure IV.5 : Photorésistances

Leur domaine spectral est quasi identique à celui de l'œil humain et les différences entre les différents composés sont plutôt du domaine des temps de réponses, notamment dans l'obscurité.

### IV.3.3.1 Capture de lumière photodiode

Une photodiode est un composant semi-conducteur ayant la capacité de détecter un rayonnement du domaine optique et de le transformer en signal électrique. A l'inverse d'une LED (diode électro lumineuse), qui produit de la lumière, la photodiode utilise de la lumière pour réaliser une fonction spécifique.

A la base, une photodiode fonctionne comme une photorésistance et donc dans l'obscurité totale, la résistance est très élevée et ne conduit que très peu de courant. Mais lorsque la jonction PN est exposée à la lumière, la résistance interne décroît et le courant augmente. Les photodiodes peuvent être utilisées sous deux modes :

- Le mode photovoltaïque où, en l'absence de polarisation, elles génèrent une tension ;
- Le mode photoampérique où, utilisées en polarisation inverse à l'intérieur d'un circuit électrique, elles génèrent un courant directement proportionnel à l'intensité lumineuse.

### Capteur de lumière OPT101

OPT101 est une photodiode monolithique avec amplificateur de transimpédance 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.

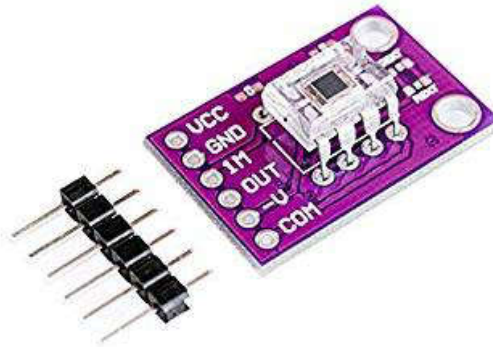


Figure IV.6 capteur de lumière OPT101.

A la base c'est capteur sont des capteurs de lumière, pour pouvoir exploiter les données mesurés il faudrait plusieurs étapes de conversion et de mis en forme, et au final nous devons faire plusieurs test réel pour le test et l'étalonnage de ces capteur à travers l'utilisation d'instrument de référence.

### IV.3.4 Driver IRF2104 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.

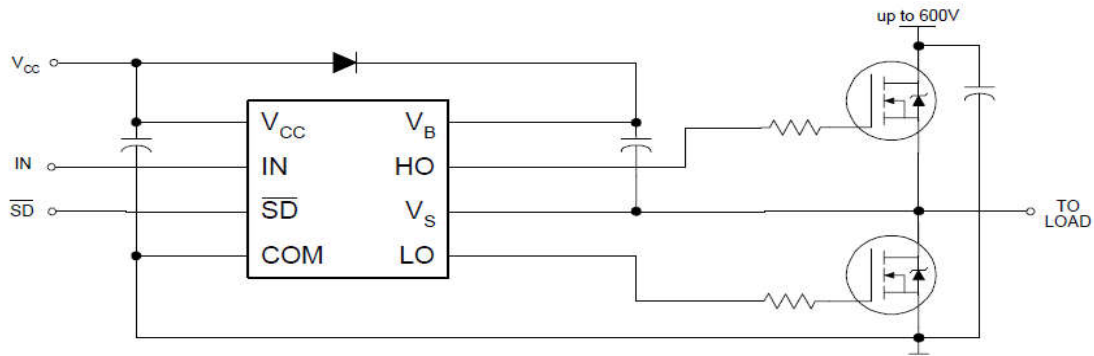


Figure IV.7 Schéma de connexion d'un driver IR2104

### ➤ Spécification

- Nombre de circuits d'attaque 2
- Type de grille IGBT, MOSFET à canal N
- Alimentation en tension 10 V ~ 20 V
- Tension logique – VIL, VIH 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 (amorce) 600V
- Temps de montée / descente (typ.) 100 ns, 50 ns

## IV.4 Traitement de données

Cet étage est constitué d'une carte d'entrée/sorties de type Arduino Nano 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.4.1 Présentation de l'Arduino Nano

L'Arduino Nano est une carte de dimensions 45mm x 18mm. Très légère, elle ne pèse que 5g, ce qui lui permet de s'adapter aux petits systèmes électroniques embarqués et aux petits robots. C'est la carte la moins chère du marché.

Cependant, ce serait une erreur d'établir une corrélation entre son prix et sa performance. Certes, elle coûte moins cher, mais elle rend un service de qualité et affiche des performances aussi remarquables que celles d'une UNO.

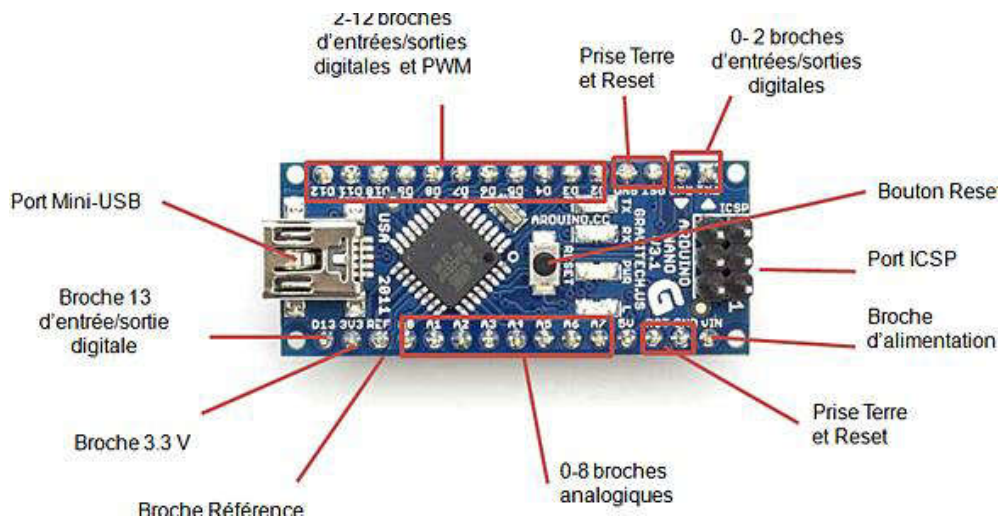


Figure IV.8 Carte microcontrôleur Arduino Nano

Elle est dotée de 14 pins digitaux à travers lesquels elle fournit 40mA maximum. En outre, elle intègre 2 pins analogiques de plus que la UNO. Cela fait donc 8 pins analogiques pour la Nano. En ce qui concerne la capacité, elle est dotée d'une mémoire Flash de 32Kb et 2Kb de mémoire dynamique.

La particularité de la carte est qu'elle est très minimaliste et se présente avec un empattement vraiment réduit. On note l'absence du connecteur DC de 2.5 mm chez l'Arduino Nano.

Elle est adaptée à des projets où l'on est amené à intervenir sur un espace très restreint. Elle est aussi sollicitée pour réaliser des systèmes légers ou souples. La Nano peut être reliée à un PC grâce à un câble micro-USB. À noter que la Nano est livrée sans le câble, mais il est possible de l'obtenir dans le commerce.

Il existe une similitude entre la carte Arduino Nano et la carte Arduino UNO, en ce sens que les deux sont basées sur un ATmega328 couplé à un quartz de 16 MHz. On peut donc affirmer que la Nano est tout simplement le format réduit de l'Arduino UNO, qui correspond au format standard DIL30.

Ainsi, lors des travaux, il devient facile d'insérer l'Arduino Nano sur une breadboard. Il est également possible de la souder sur des cartes électroniques. De ce fait, elle permet de travailler sans difficulté majeure, car elle devient facile à utiliser.

#### IV.4.2 Caractéristiques techniques générales de l'Arduino Nano

- Microprocesseur : ATmega328
- Mémoire flash : 32 ko

- Mémoire SRAM : 2 ko
- Mémoire EEPROM : 1 ko
- 20 broches d'entrées et sorties, dont 6 broches PWM et 6 broches d'entrées analogiques 10 bits
- 2 broches uniquement d'entrée analogique 10 bits
- Courant par entrées-sorties : 40 mA
- Fréquence d'horloge : 16 MHz
- Bus série, I2C et SPI
- Gestion des interruptions
- Prise USB : mini-USB B
- Boîtier DIL30
- Dimensions : 45 x 18 x 18 mm

## **IV.5 Partie simulation**

Afin de valider la structure du système, ainsi que la topologie choisie et le dimensionnement entrepris, nous avons réalisé plusieurs simulations en utilisant le logiciel de simulation Matlab/Simulink, et ensuite pour valider le programme sur la carte Arduino, nous allons utiliser le simulateur Proteus ISIS.

### **IV.5.1 Simulation Matlab/Simulink**

Pour l'analyse du fonctionnement du panneau photovoltaïque choisi, basé sur le modèle précédemment nous avons procédé à une série de simulations, ainsi les résultats obtenus sont présentés sur les figures. La simulation de notre montage globale a été fait à l'aide du logiciel PROTEUS\_ISIS et MATLAB/Simulink qui permet de tester et récupérer en temps réel les résultats de la simulation.

### IV.5.1.1 Vérification du modèle du module photovoltaïque

Nous avons pris un module photovoltaïque composé de 36 cellules connectées en série et est considéré dans les conditions standards.  $T=25^{\circ}\text{C}$ ,  $G=1000\text{W}/\text{m}^2$ , pour Simulation et affichage :

- De la caractéristique I-V.
- De la caractéristique P-V.

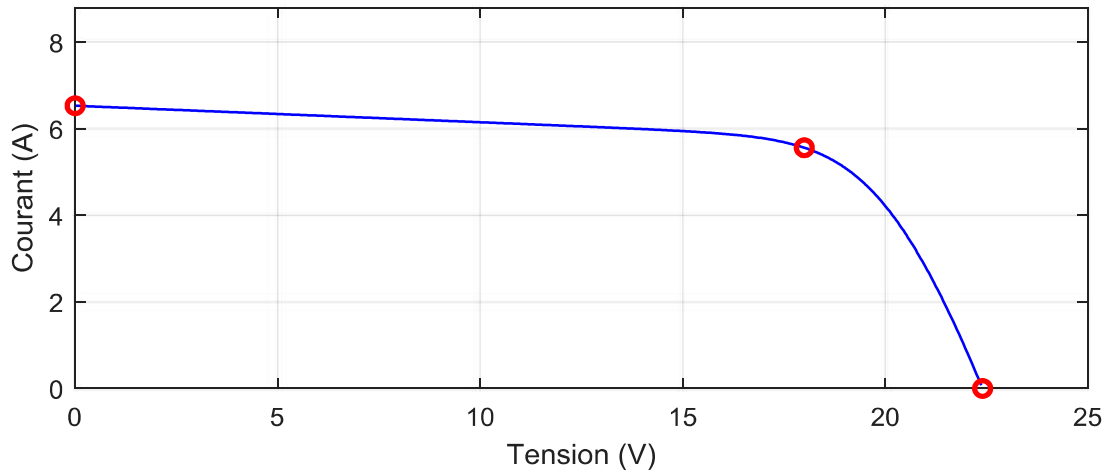


Figure IV.9 Présente la caractéristique Courant-Tension du panneau PV pour l'éclairement  $G = 1000\text{W}/\text{m}^2$  et de température  $T_c = 25^{\circ}\text{C}$

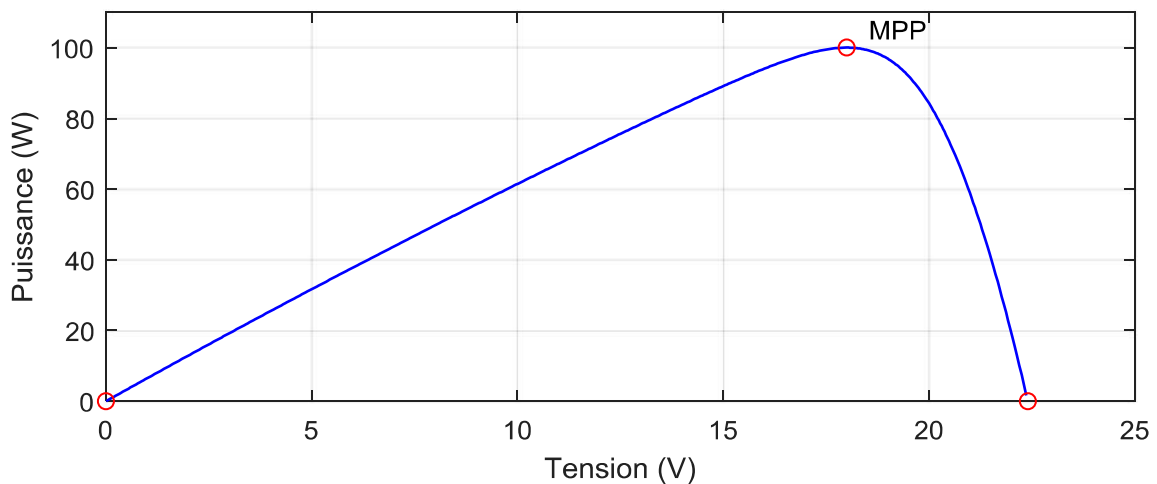


Figure IV.10 Présente la caractéristique Puissance-Tension du panneau PV pour l'éclairement  $G = 1000\text{W}/\text{m}^2$  et de température  $T_c = 25^{\circ}\text{C}$

La figure IV.9 présente l'évolution du courant générée du module en fonction de la tension à température et éclairement fixe. On note que le courant reste peu variable jusqu'à  $V=22\text{V}$  puis il diminue rapidement jusqu'à son annulation.

La figure IV.10 présente l'évolution de la puissance générée du module en fonction de la tension à température et éclairement fixe. On remarque que la puissance augmente linéairement jusqu'à la valeur maximal (110W) puis diminue rapidement.

### IV.5.1.2 Vérification du dimensionnement du SEPIC

Pour simuler le fonctionnement du 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.11) avec afficher les résultats des courant et tension d'un composant SEPIC

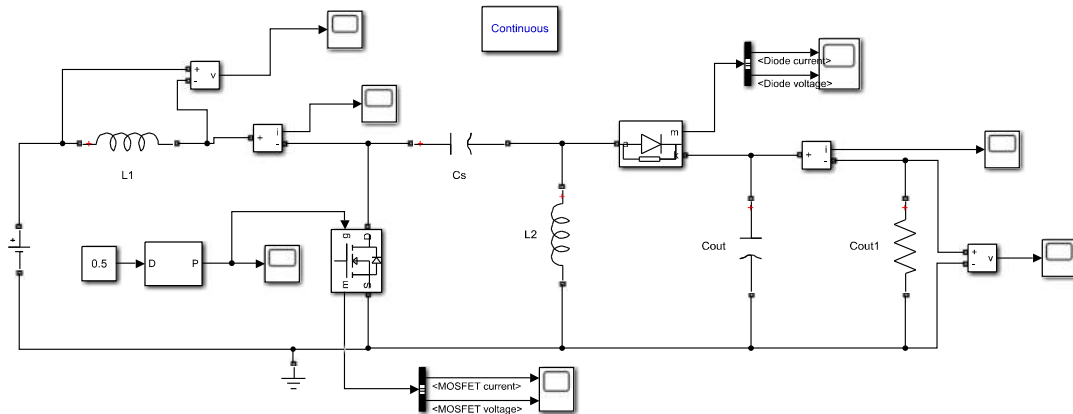


Figure IV.11 Schéma du hacheur SEPIC réalisé dans Simulink.

Les résultats montrés ci-après valide les limite des courants dans les composants du SEPIC et de ce fait valide les valeurs calculées de ces derniers.

- **Courant aux bornes de bobine L1.**

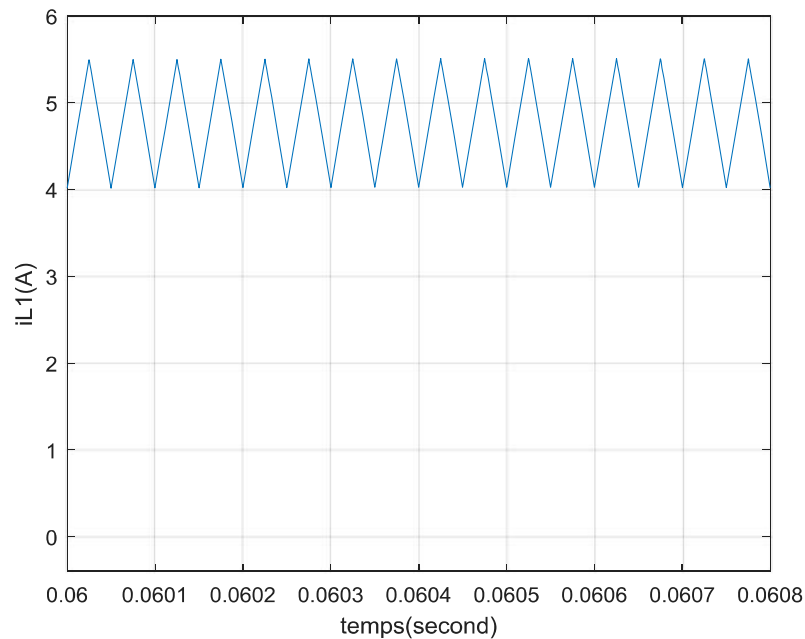


Figure IV.12 Courbe de courant dans la bobine L1.

- Courant aux bornes de bobine L2

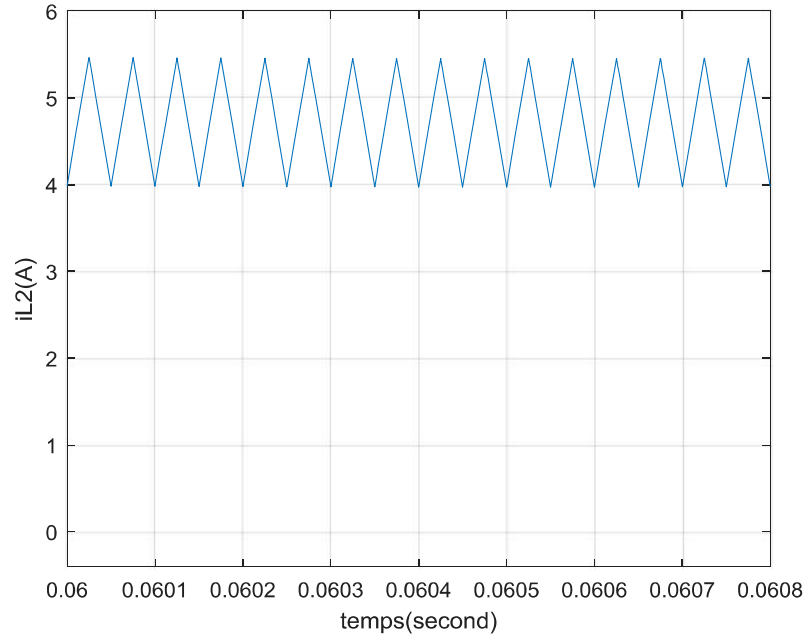


Figure IV.13 Courbe de courant dans la bobine L2.

- Courant traversant le transistor

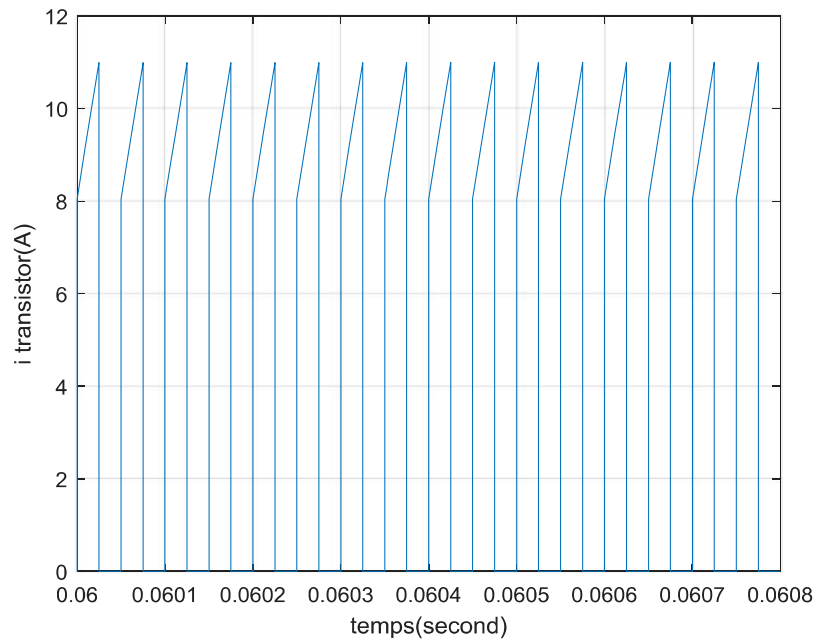


Figure IV.14 Courbe du courant traversant le transistor MOSFET.

- Courant aux bornes de bobine L2

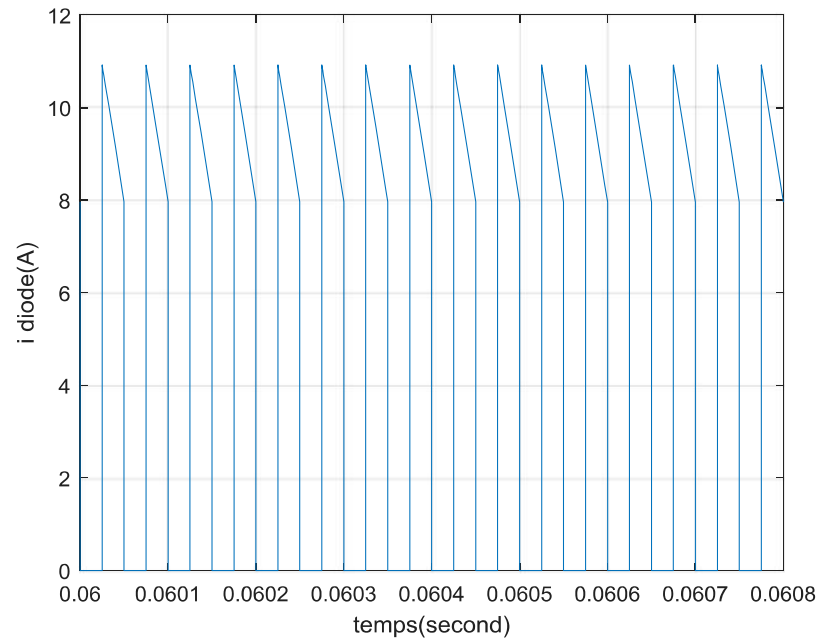


Figure IV.15 Courbe du courant traversant la diode.

- Le courant dans la charge.

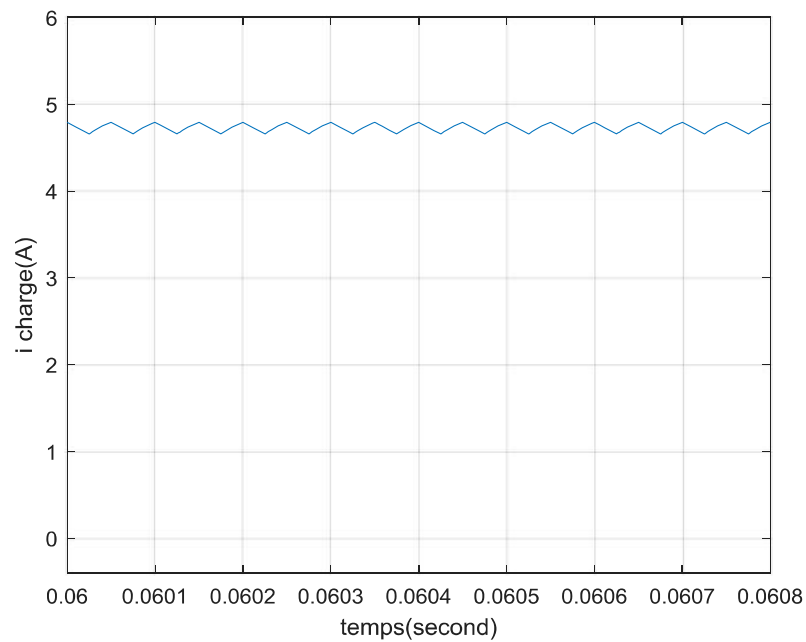


Figure IV.16 Courbe du courant dans la charge

### IV.5.1.3 Simulation du traceur de courbe

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.

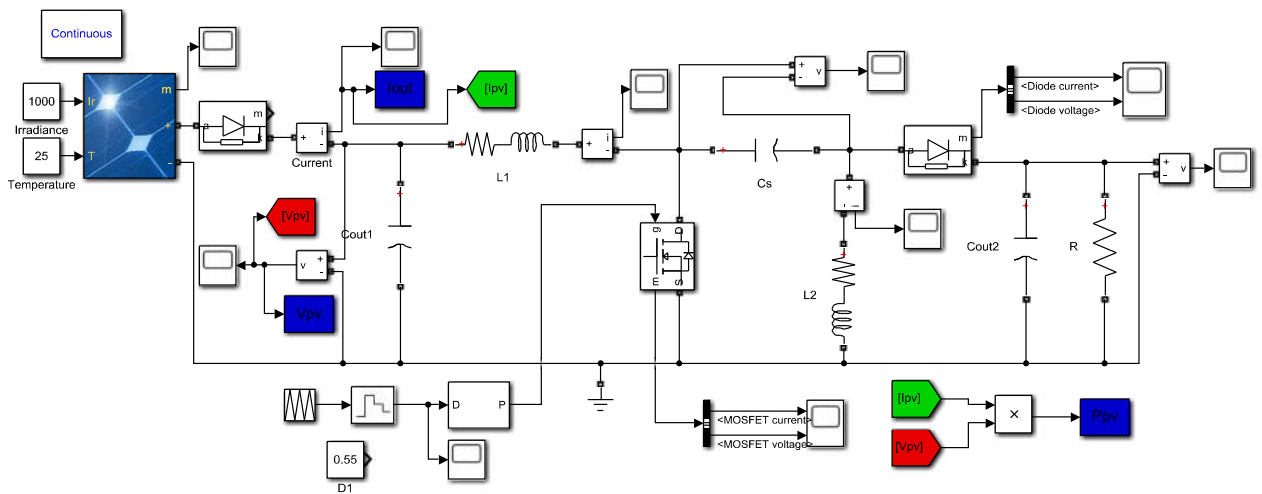


Figure IV.17 Schéma fonctionnel sous Simulink pour le traceur de courbe des modules photovoltaïques

Avant de présenter la simulation nous allons expliquer la méthode que nous avons utilisé pour la récupération des caractéristiques. Le principe de cette méthode est basé sur la génération du rapport cyclique qui commande le MOSFET du SEPIC, ceci permet de balayer la caractéristique du module PV en émulant une résistance effective en à la sortie du module.

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. La figure suivante montre quelques cas que nous avons tester pour choisir la meilleure configuration possible.

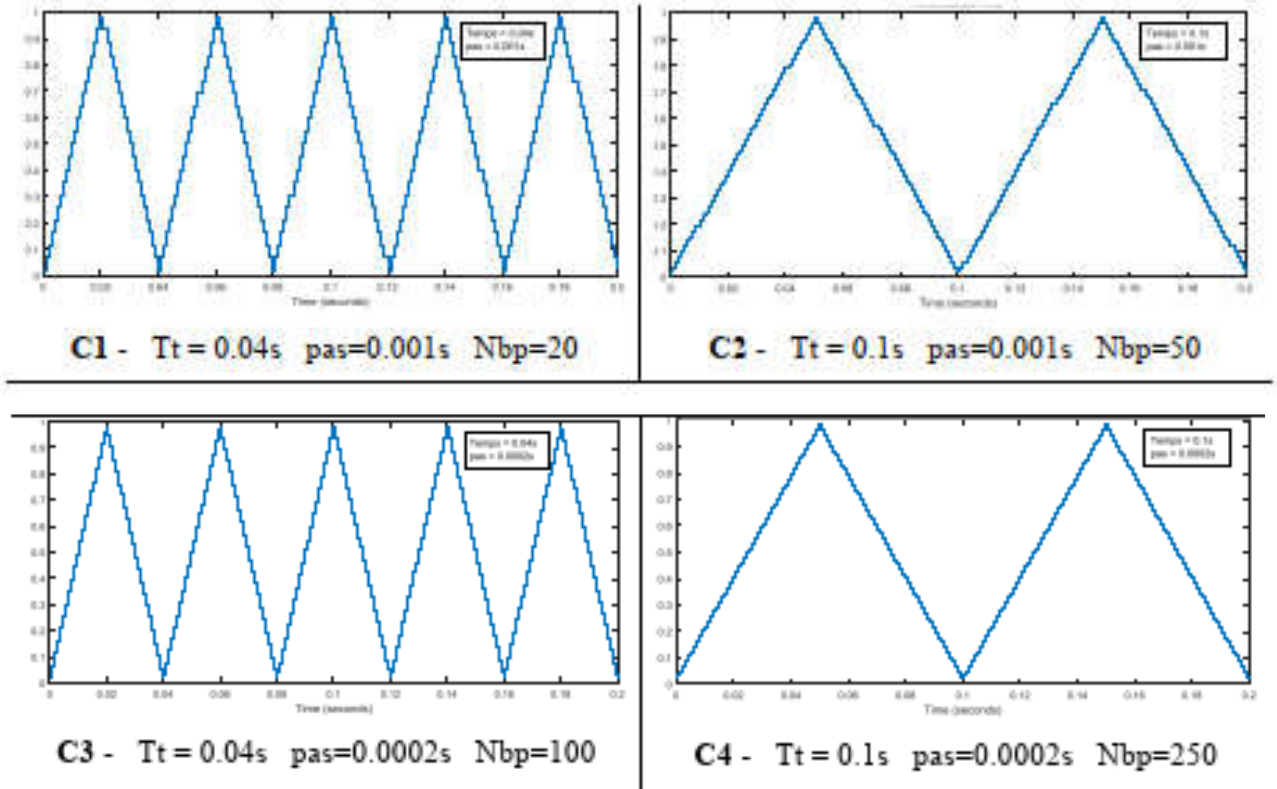


Figure IV.18 Quelque configuration pour le choix du rapport cyclique pour la commande du MOSFET

Pour les configurations C1 et C2 les résultats de simulation montre que le système ne récupéré correctement les courbes caractéristiques, où la vitesse de balayage est importante pour que le système se stabilise. Par contre, la configuration C2 et C4 permettent de manilleurs résultat, cependant la configuration C4 permet une meilleure stabilité, et permet de récupérer le maximum de point des courbes caractéristique du module photovoltaïque.

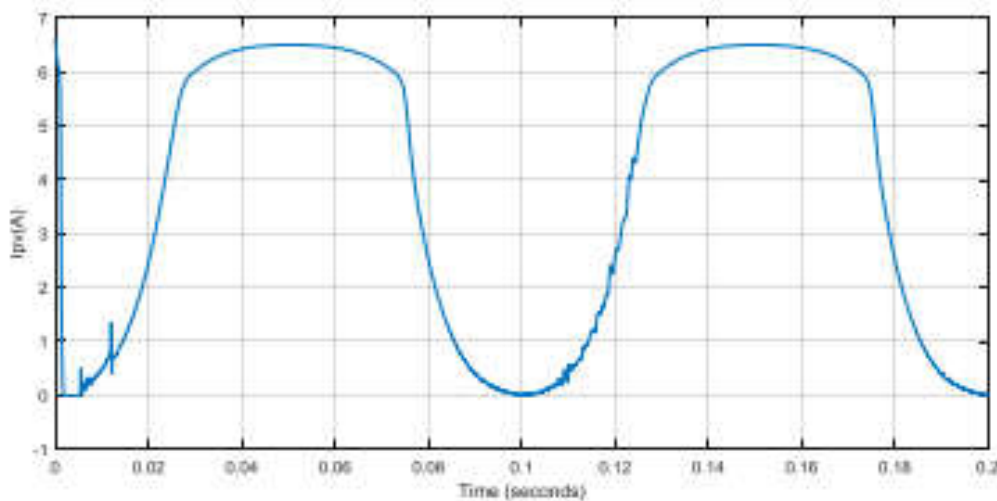


Figure IV.19 Courant géré du module photovoltaïque.

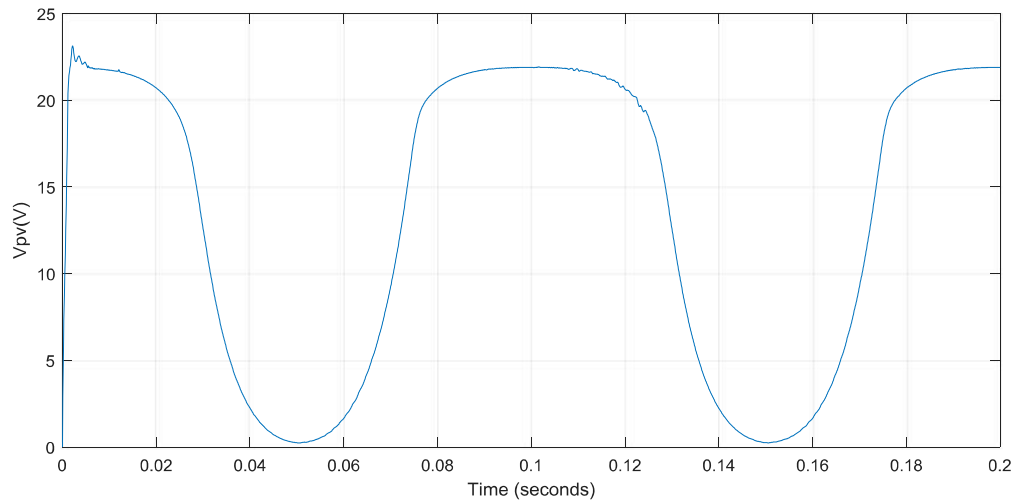


Figure IV.20 Tension gérée du module photovoltaïque.

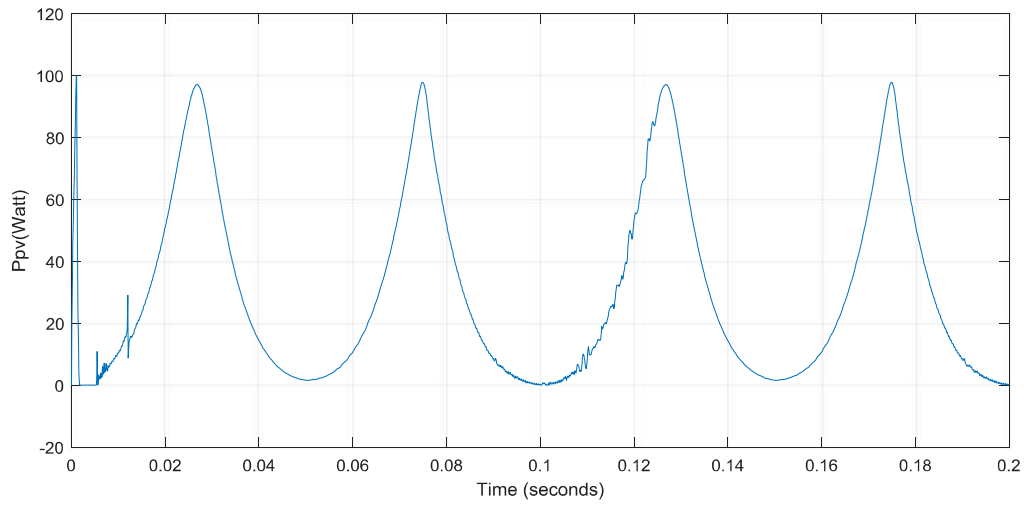


Figure IV.21 Puissance gérée du module photovoltaïque.

Après reconstitution des courbes caractéristiques I-V et P-V nous avons les figures suivantes :

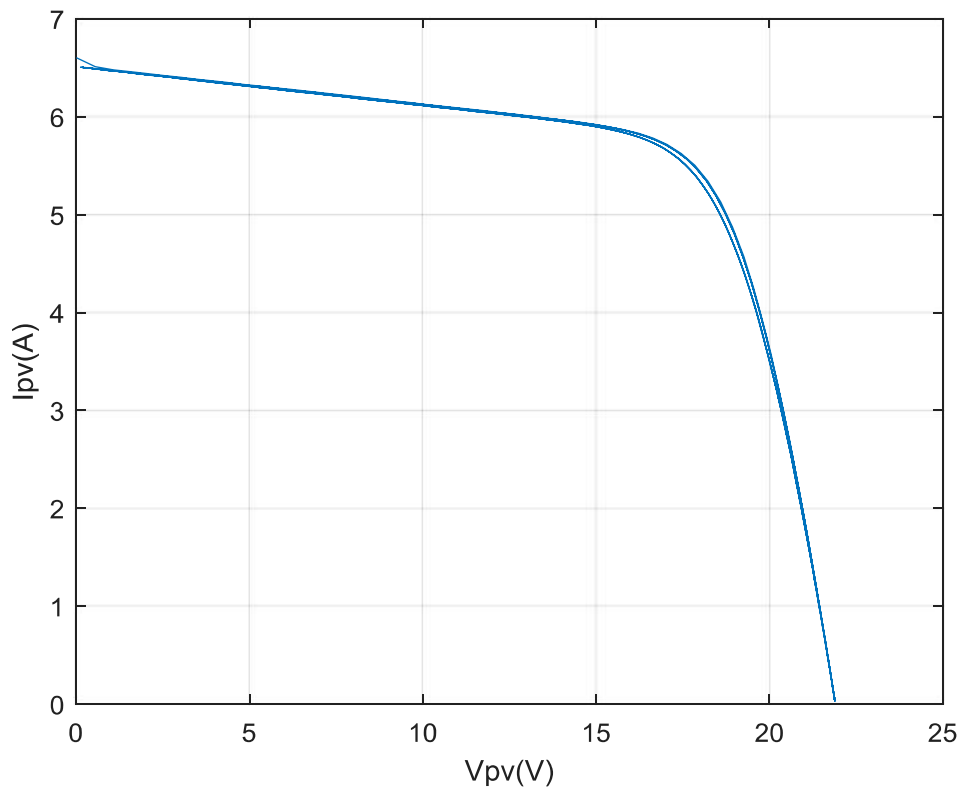


Figure IV.22 Caractéristique I-V reconstituée pour le module photovoltaïque.

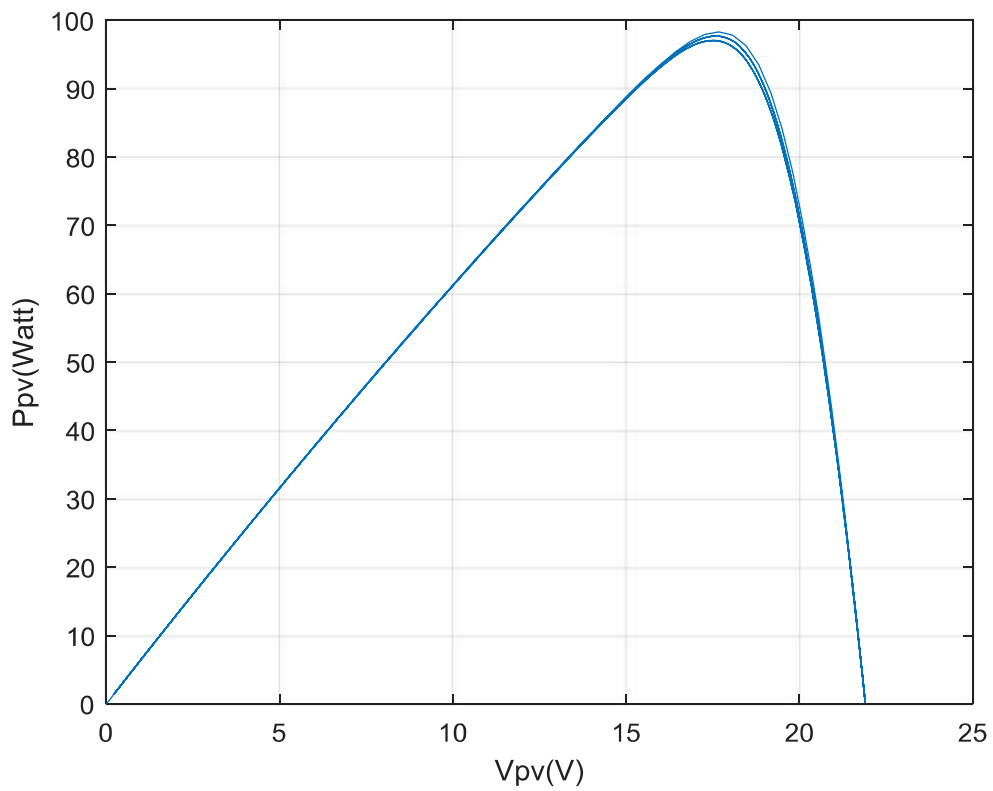


Figure IV.23 Caractéristique P-V reconstituée pour le module photovoltaïque.

Les figures IV.22 et IV.23 montrent bien que la méthode utilisée et que la topologie choisie ont permis de récupérer correctement les caractéristiques du module photovoltaïque.

### IV.5.2 Simulation Proteus ISIS

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

#### IV.5.2.1 Schéma du système électronique

L'architecture de base que nous avons utilisé pour la conception du testeur de module PV est représenté sur la figure IV.24, nous pouvons résumer 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.
- Partie contrôleur : Carte Arduino Nano.
- Partie Interface : Afficheur LCD + interface série RS232.

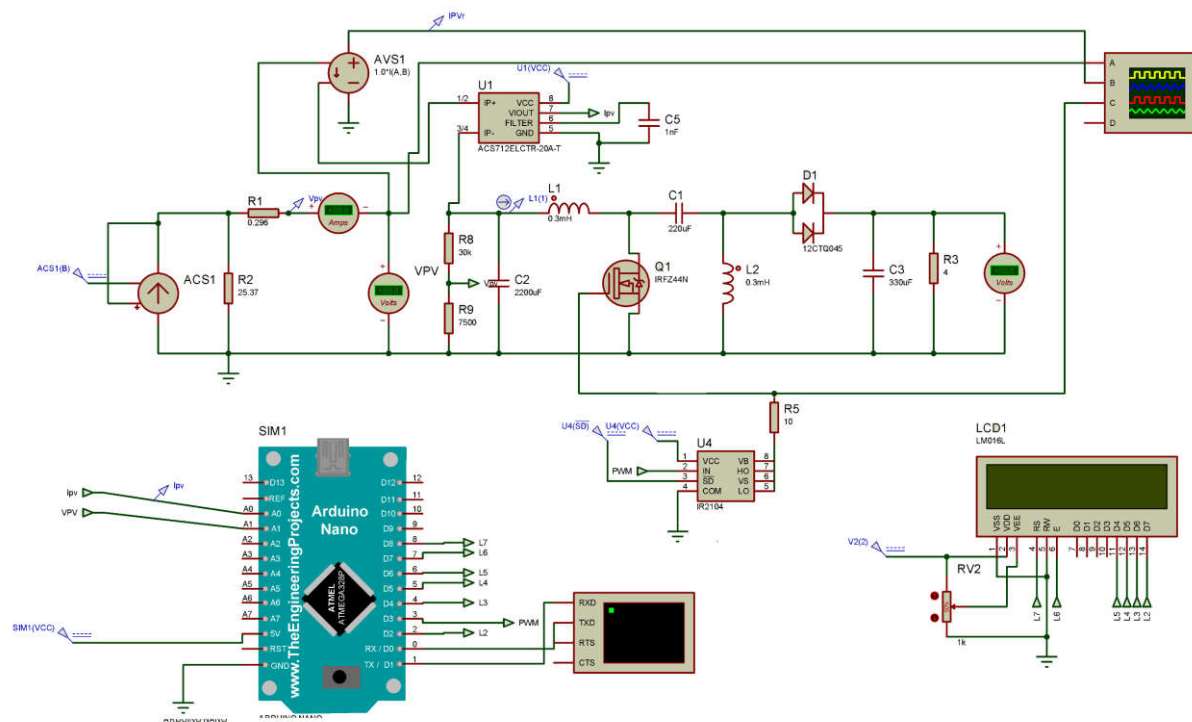


Figure IV.24 Schéma Proteus du testeur de module PV

### IV.5.2.2 Algorithme de commande

Concernant l'algorithme de commande, nous avons résumé son fonctionnement dans l'organigramme de la figure suivante, avant de passer par la programmation du microcontrôleur, nous devons réaliser un organigramme qui explique le déroulement des différentes séquences,

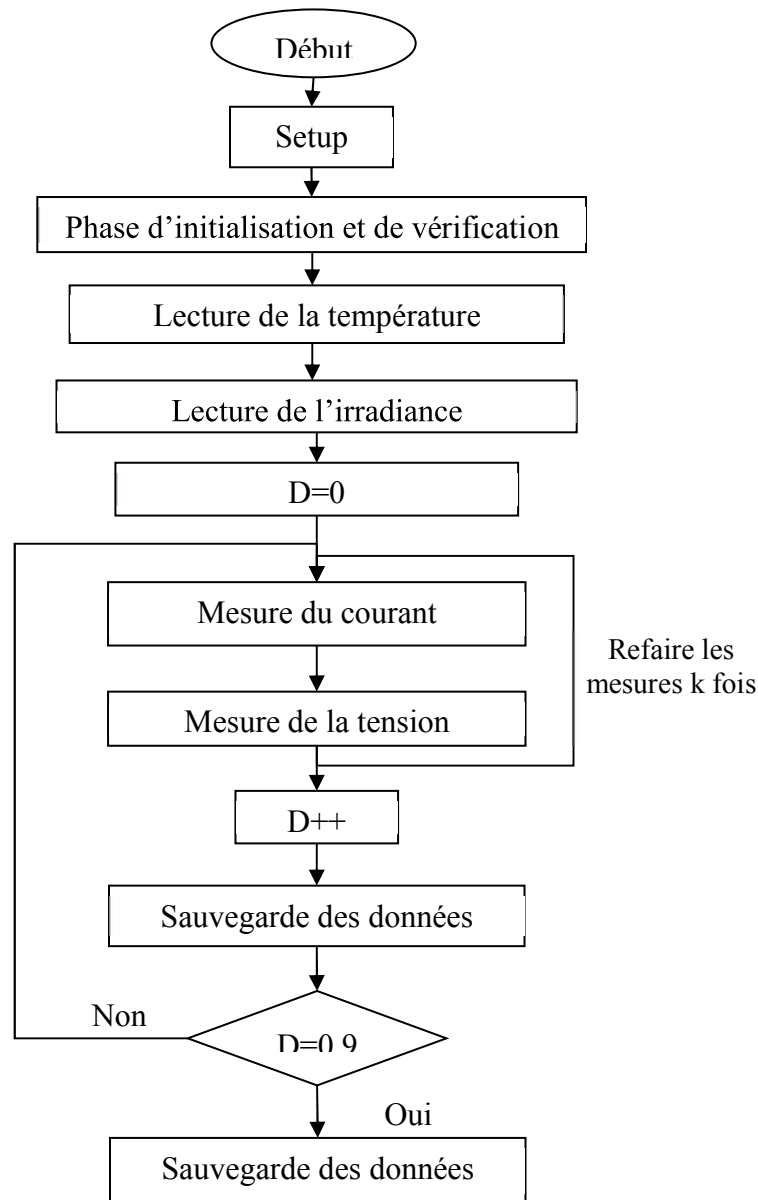


Figure IV.25 Organigramme du fonctionnement teste de caractéristiques panneaux photovoltaïques.

Cet organigramme permet de reproduire avec une carte Arduino 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.

### IV.5.2.3 Simulation

Pour effectuer les simulations nécessaires pour valider le fonctionnement du système, nous devons utiliser le schéma illustré dans la figure IV.26 et nous devons programmer la carte Arduino avec un programme C++ qui reprend les le fonctionnement et le comportement de l'organigramme déjà présenté.

Comme pour la simulation avec Matlab/Simulink, nous pouvons valider le fonctionnement du système à travers plusieurs test et comparaison. 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=5

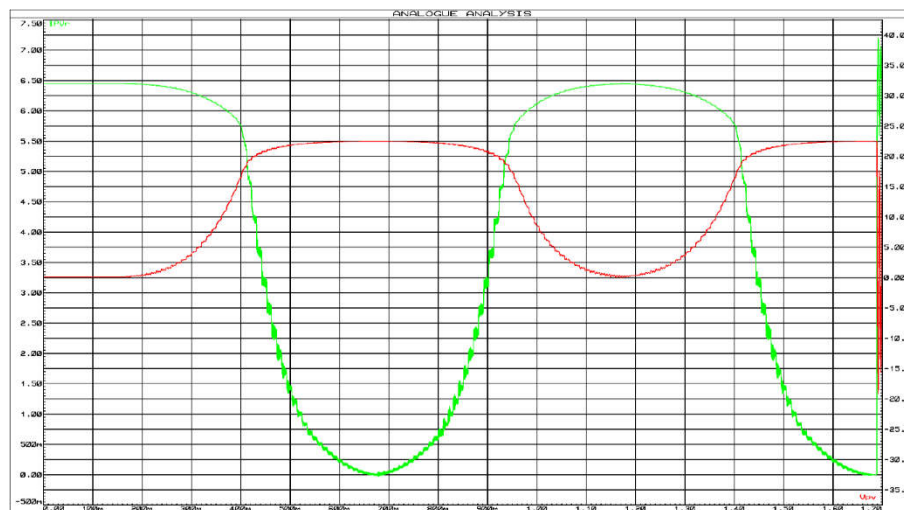


Figure IV.26 Allure du courant  $I_{pv}$  et tension  $V_{pv}$  pour Sim1

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

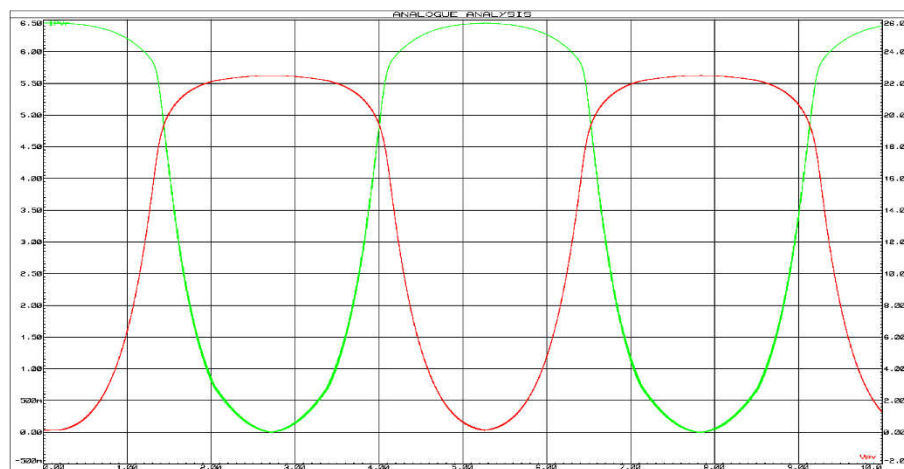


Figure IV.27 : Allure du courant  $I_{pv}$  et tension  $V_{pv}$  pour Sim2

❖ **Simulation 3:** • Fréquence PWM = 32khz • délai = 10ms • Pas=1

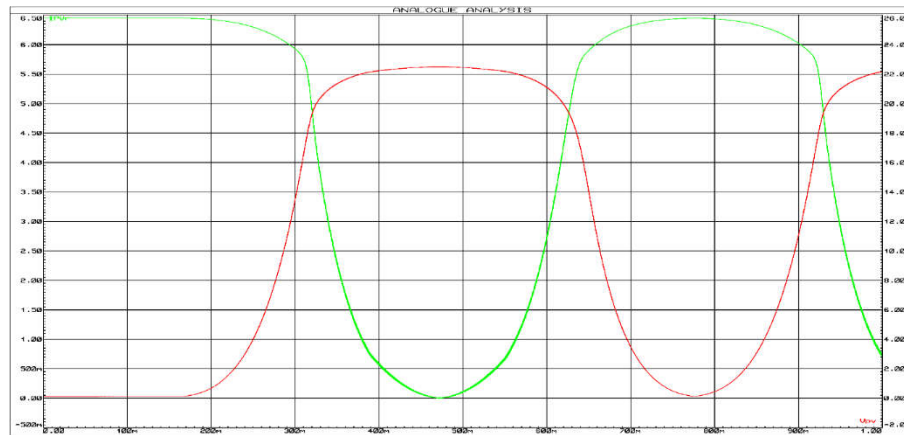


Figure IV.28 Allure du courant  $I_{pv}$  et tension  $V_{pv}$  pour Sim3

❖ **Simulation 4 :** • Fréquence PWM = 32khz • délai = 200 $\mu$ s • Pas=1

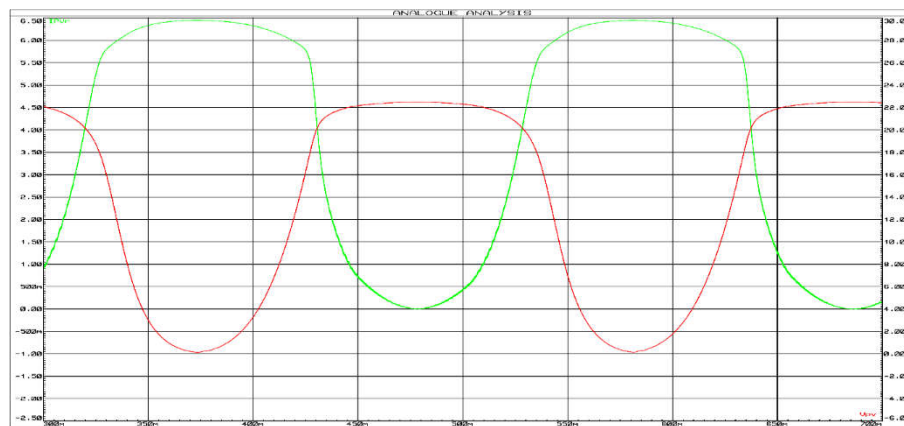


Figure IV.29 Allure du courant  $I_{pv}$  et tension  $V_{pv}$  pour Sim4

Dans les simulations des figures précédentes, nous avons choisi celle qui ont donné de meilleurs résultats, ceci dit à pour avoir de bonnes courbes qui reproduise 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 '1', mais pour avoir les résultats de caractérisation et de test le plus rapidement possible il faut faire des compromis entre vitesse et précision,

## **IV.6 Conclusion**

Nous avons présenté dans ce chapitre les éléments nécessaires à la conception et à la réalisation d'un système de test 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 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 traite de la modélisation et la conception d'un testeur de panneau photovoltaïque. Le testeur est basé sur l'utilisation du convertisseur de puissance DC-DC de type SEPIC. Le fonctionnement du testeur est géré par une carte microcontrôleur de type Arduino. Ceci nous permet de récupérer les mesures de courant et de tension afin de tracer la caractéristique courante-tension et puissance-tension du module PV.

La méthodologie de travail que nous avons suivi à commencer par la compréhension de l'élément central de notre projet qui est le panneau photovoltaïque. De ce fait, nous avons présenté le principe de fonctionnement d'un système photovoltaïque, ainsi que les différents types des cellules solaires avec la mise en œuvre des modules photovoltaïques par la jonction de plusieurs cellules en série et en parallèle.

Dans la deuxième partie de ce travail, nous avons essayé de faire une étude sur les différentes méthodes de caractérisation des panneaux photovoltaïque, où nous avons tout d'abord justifier la nécessité de tels instruments de mesure. Nous avons par la suite donner quelques exemples d'appareils commerciaux utilisés dans le test et la récupération des courbes I-V des panneaux PV.

Pour la réalisation de notre projet nous avons choisi d'utiliser une méthode basée sur les convertisseurs de puissance, nous avons estimé que les convertisseurs de type SEPIC sont le mieux adapté pour notre projet, nous avons ainsi présenté d'une manière générale le fonctionnement de ces derniers ainsi que le dimensionnement de ces composants.

Ce convertisseur présente l'avantage d'être un élévateur et abaisseur de tension ce qui permet à ce système de balayer toute la courbe caractéristique d'un panneau PV sous diverses conditions de travail. La simulation avec MATLAB/Simulink a permis de valider le dimensionnement que nous avons fait et de vérifier le bon fonctionnement de la méthode choisi.

Le dernier chapitre monte les différentes étapes de conception du prototype du système de test, nous avons choisi les composants qui permettent une conception rapide est sûre de la carte électronique ; nous avons ainsi présenté les différentes simulations sous Proteus, et les différents tests effectué. De cette manière, nous avons valider nos choix ainsi que l'algorithme de génération de commande que nous avons développé. Les performances que nous avons

enregistrées sont intéressantes du point de vue : vitesse d'exécution, exactitude et performances.

Malheureusement, nous n'avons pas réussi à faire marcher le prototype dans des conditions réelles est ce pour différentes raisons qu'on peut résumés comme suit :

- Composant non disponible, notamment les driver de MOSFET.
- Driver difficile à mettre en œuvre,
- Problème de réalisation des inductances,
- Test outdoor difficile avec des conditions de test aléatoire.

Nous espérons pouvoir finaliser en réglant les problèmes déjà cité et de pouvoir développer d'avantage les fonctionnalités visées par le projet.

