

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ MOHAMED BOUDIAF - M'SILA
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GENIE ÉLECTRIQUE



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Spécialité : Energies renouvelables

**Titre : Etude et conception d'un mini-caractérisateur
pour modules photovoltaïque**

Proposé et dirigé par :

M.Drif

Présenté par :

- **NEKBIL Houdhifa**
- **BENZERROUK Islam**

N° d'ordre : 052

2020

Dédicaces

* nous dédions début nos parents généreux qui ont été patients avec nous et ont contribué à nos éducation et ne m'ont pas épargné pendant toute cette période.

* nous remercions également tous les membres de la famille généreuse , nos grands-parents ,nos frères, nos sœurs et tous nos oncles.

* Nous n'oublions pas non plus de remercier tous nos chers amis, camarades de classe et collègues de travail.

Remerciements

Louange et gratitude à Dieu Tout-Puissant d'abord, qui nous a succédé et qui nous a écrit pour vivre cette journée et nous a donné force et patience pour accomplir ce travail.

Nous tenons également à exprimer nos remerciements à nos encadrateurs, Mr M.Drif et Mr A.AZI qu'ils acceptent notre supervision et nos conseils dans ce travail.

Nous remercions le président du jury, ainsi que les membres du jury, pour leur accord pour évaluer ce travail.

Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué ou aidé de près ou loin de notre formation, accompagnement et développement de cette modeste thèse.

Résumé

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie. Les énergies renouvelables sont des solutions prometteuses pour concurrencer les énergies collectives.

Parmi ces énergies renouvelables, on peut citer la production d'électricité d'origine solaire par l'effet photovoltaïque (cellules solaires ou photopiles). La conversion de la lumière en électricité (conversion photovoltaïque) se produit dans des matériaux semi-conducteurs. Le photovoltaïque peut jouer un rôle important dans la transition vers un système

Dans ce mémoire on va faire l'étude et la conception d'un mini-caractériser pour module photovoltaïque. La raison principale qui nous a poussés à faire ce travail est basé pour relever la courbe I-V est basé sur un balayage des points constituant la courbe et qui appartiennent à l'intervalle représenté entre le point de court-circuit ($V=0$, $I=I_{sc}$) et celui du circuit-ouvert ($V=V_{oc}$, $I=0$).

Mots clés : photovoltaïque ; La carte ARDUINO ; LabVIEW

ملخص

تعد الشمس مصدر طاقة غير محدود تقريباً ، ويمكن أن تغطي عدة آلاف من استهلاكنا العالمي للطاقة. الطاقات المتجددة حلول واعدة للتنافس مع الطاقات الجماعية

من بين هذه الطاقات المتجددة ، يمكننا الاستشهاد بإنتاج الكهرباء ذات الأصل الشمسي من خلال التأثير الكهروضوئي (الخلايا الشمسية أو الخلايا الشمسية). يحدث تحويل الضوء إلى كهرباء (التحويل الكهروضوئي) في المواد شبه الموصلة. يمكن أن تلعب الخلايا الكهروضوئية دوراً مهماً في الانتقال إلى النظام

في هذه الأطروحة سوف ندرس ونصمم أداة تحديد خصائص مصغرة للوحدة الكهروضوئية. يرجع السبب الرئيسي الذي دفعنا للقيام بهذا العمل إلى رفع المنحنى الرابع إلى مسح النقاط التي تشكل المنحنى والدائرة المفتوحة ($V = 0$, $I = I_{sc}$) والتي تنتمي إلى الفترة الزمنية الممتدة بين نقطة دائرة قصر V , $I = 0$).

Table des matières

Table des matières.....	vii
Liste des Figures.....	ix
Liste des Tableaux.....	Erreur ! Signet non défini.
Glossaire.....	xi
Nomenclature	xii
Introduction générale	1
Introduction générale	2
Chapitre I. Conversion photovoltaïque.....	5
Chapitre I. Conversion photovoltaïque.....	6
I.1 Introduction.....	6
I.2 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	6
I.3 Etat des lieux des technologies traditionnelles	7
I.3.1 Le solaire photovoltaïque non concentré	7
I.3.2 Le solaire photovoltaïque concentré	8
I.3.3 Les constituants organiques (polymères)	8
I.3.4 Les cellules hybrides : thermique et photovoltaïque	8
I.4 Avantages et inconvénients :	8
I.4.1 Avantages.....	8
I.4.2 Inconvénients	9
I.5 Modélisation et schéma électrique d'une cellule photovoltaïque	9
I.6 Paramètres essentiels caractérisant les cellules photovoltaïques	10
I.6.1 Courant de court-circuit	10
I.6.2 Tension de circuit ouvert.....	11
I.6.3 La puissance caractéristique d'une cellule PV	11
I.6.4 Facteur de forme	12
I.6.5 Rendement de conversion d'énergie	12
I.7 Le module photovoltaïque :	12
I.7.1 L'association en série	12
I.7.2 L'association en parallèle	13
I.8 L'association série et parallèle (Le GPV)	14
I.9 Effet de la température et éclairement sur la caractéristique I(V) d'une cellule PV. ..	15
I.9.1 Influence de l'éclairement.	16
I.9.2 Influence de la température.....	16
I.9.3 L'influence de la température et du rayonnement.....	17
I.10 Conclusion	18
Chapitre II. Techniques de caractérisation des dispositifs photovoltaïque	19
Chapitre II. Techniques de caractérisation des dispositifs photovoltaïque.....	20
II.1 Introduction.....	20

II.2	Différentes techniques	20
II.2.1	Résistance variable.....	20
II.2.2	Charge capacitive :.....	21
II.2.3	Charge électronique	22
II.2.4	Charge de quatre quadrants.....	23
II.2.5	Charges à base de convertisseurs DC/DC.....	24
II.2.6	Convertisseur DC-DC abaisseur (Buck)	24
II.2.7	Convertisseur DC-DC élévateur (boost)	26
II.2.8	Convertisseur DC-DC abaisseur-élévateur (buck-boost).....	28
II.3	Conclusion	30
Chapitre III.	Conception mini caractériser PV en utilisant une charge électronique	31
Chapitre III.	Conception mini caractériser PV en utilisant une charge électronique	32
III.1	Introduction.....	32
III.2	La partie Hardware :	32
III.2.1	Principe de la technique :.....	33
III.2.2	La carte ARDUINO :.....	34
III.2.3	La charge électronique :.....	37
III.3	La partie Software.....	39
III.3.1	La communication série	41
III.3.2	Le courant de court-circuit, la tension du circuit ouvert et le PPM	41
III.3.3	Le bouton de démarrage de la caractérisation et l'indicateur de l'opération	41
III.3.4	Le nom du dispositif connecté à l'interface	41
III.3.5	Affichage graphique de la caractéristique du GPV	41
III.3.6	Affichage numérique de la caractéristique du GPV.....	42
III.4	La liaison entre LABVIEW et ISIS-PROTEUS	42
III.5	Conclusion	42
Chapitre IV.	Titre du chapitre 4	43
Chapitre IV.	Test et validation	44
IV.1	Introduction.....	44
IV.2	Test et validation.....	44
IV.2.1	Test sous STC (1000 W/m ²) et 25°C	44
IV.2.2	Test sous (800 W/m ²) et 25°C.....	45
IV.2.3	Test sous (600 W/m ²) et 25°C.....	45
IV.2.4	Test sous (400 W/m ²) et 25°C.....	46
IV.2.5	Test sous (1000 W/m ²) et 20°C.....	46
IV.2.6	Test sous (1000 W/m ²) et 30°C.....	47
IV.2.7	Test sous (1000 W/m ²) et 40°C.....	47
IV.3	Conclusion	48
Conclusion générale.....		49
Conclusion générale.....		50
Références bibliographiques.....		51
Références bibliographiques.....		52
Publications et communications	Erreur ! Signet non défini.	
Publications et communications	Erreur ! Signet non défini.	

Liste des Figures

Figure I.1– Constitution d'une cellule photovoltaïque (Connaissance des Énergies, d'après CEA)	7
Figure I.2– Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque	10
Figure I.3– Puissance maximum d'une cellule PV	11
Figure I.4– Caractéristiques résultantes d'un groupement de (Ns) cellules en séries	13
Figure I.5– Caractéristiques d'un groupement de (Np) cellules en parallèles	14
Figure I.6– (a) architecture classique d'un GPV avec diodes de protections. (b) défaillance d'une des cellules du GPV.	15
Figure I.7– Caractéristique courant-tension d'une cellule PV à température constante en fonction de l'éclairement (Source Ecosystèmes).....	16
Figure I.8– Influence de l'irradiation- Puissance en fonction de la tension (Source Ecosystèmes).....	16
Figure I.9– Caractéristique courant-tension d'une cellule PV à éclairement constant en fonction de la température (Source Ecosystèmes).....	17
Figure I.10– Influence de la température - Puissance en fonction de la tension (Source Ecosystèmes).....	17
Figure II.1– Caractérisation à l'aide d'une charge résistive	21
Figure II.2– Caractérisation à l'aide d'une charge capacitive	21
Figure II.3– Caractérisation à l'aide d'une charge électronique.....	22
Figure II.4– Courbe I-V dans les quadrants I, II et IV.....	23
Figure II.5– Schéma fonctionnel d'une charge de quatre quadrants	23
Figure II.6– Schéma synoptique du caractériser à base d'un convertisseur DC-DC.....	24
Figure II.7– Convertisseur DC-DC Buck.	24
Figure II.8– Circuits équivalents du Buck, S fermé en (a), S ouvert en (b).	25
Figure II.9– Convertisseur DC-DC boost	27
Figure II.10– Circuits équivalents du boost, S fermé (a), S ouvert (b).....	27
Figure II.11– Convertisseur DC-DC buck-boost.	28
Figure II.12– Circuits équivalents du buck-boost, S fermé (a), S ouvert (b).....	29
Figure III.1– le schéma synoptique Isis Proteus simulation for mini-caracterisor	33
Figure III.2– Conversion du courant à mesurer en tension.....	34
Figure III.3– Soustracteur simple a base d'amplificateur opérationnel	35
Figure III.4– Montage diviseur de tension.....	36
Figure III.5– Commande de la charge électronique via le port PWM de la carte ARDUINO 36	
Figure III.6– Communication série pour transfert de données	37
Figure III.7– Conversion PWM vers Rampe de tension de 0-5V	38
Figure III.8– Montage de la charge électronique commandée.	39

Figure III.9– result for mini caractériser.....	39
Figure III.10– Organigramme de l'interface GUI sous LABVIEW.	40
Figure III.11– Interface utilisateur de pilotage du banc d'essai.	41
Figure III.12– Création de la paire COM port avec VSPD.....	42
Figure IV.1– Test sous STC (1000 W/m ²) et 25°C.....	44
Figure IV.2– Test sous (800 W/m ²) et 25°C.	45
Figure IV.3– Test sous (600 W/m ²) et 25°C.	45
Figure IV.4– Test sous (400 W/m ²) et 25°C.	46
Figure IV.5– Test sous (1000 W/m ²) et 20°C.	46
Figure IV.6– Test sous (1000 W/m ²) et 30°C.	47
Figure IV.7– Test sous (1000 W/m ²) et 40°C.	47

Glossaire

CCM	Continuos Conduction Mode
DC	Courant Continu (Direct Current)
DCM	Discontinuos Conduction Mode
FF	Facteur de forme
GPV	Générateur Photovoltaïque
STC	Standard Tests Conditions
PV	PhotoVoltaïque

Nomenclature

- V_T : représente le potentiel thermodynamique,
- I_{Sat} : le courant de saturation de la jonction,
- K : la constante de **Boltzmann**,
- T : la température de la cellule en Kelvin,
- e : la charge d'un électron,
- n : le facteur de non idéalité de la jonction,
- I_{Cell} : le courant fourni par la cellule,
- V_{Cell} : la tension aux bornes de la cellule,
- I_{CC} : le courant produit par la cellule lorsqu'elle est mise en court-circuit,
- R_{Shunt} : la résistance modélisant les courants de fuites de la jonction, et finalement,
- R_{Serie} : la résistance série caractérisant les diverses résistances de contacts et deconnexions.
- η : Une cellule photovoltaïque est caractérisée par un rendement de conversion,
- V_{CO} : une tension à circuit ouvert,
- I_{CC} : un courant de court-circuit
- FF** : un facteur de forme.
- I_{CC} : un courant de court-circuit
- I_{PH} : photon-courant généré par le rayonnement
- L_n et L_p : les longueurs de diffusion
- V_{CO} : tension de circuit ouvert
- P** : Puissance mesurée aux bornes de la cellule PV.
- V** : Tension mesurée aux bornes de la cellule PV.
- I** : Intensité mesurée aux bornes de la cellule PV.
- $V_{CO_{Ns}}$ La somme des tensions en circuit ouvert de N_s cellules en série.
- $I_{CC_{Ns}}$: Le courant de court-circuit de N_s cellules en série.
- $I_{CC_{Np}}$: La somme des courants de court-circuit de N_p cellules en parallèle.
- $V_{CO_{Np}}$: La tension du circuit ouvert de N_p cellules en parallèle.

Introduction générale

Introduction générale

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète. [1]

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. Les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ainsi que les pays en voie de développement ne cessent de se multiplier.

Les énergies renouvelables telles que l'énergie éolienne, l'énergie solaire, l'énergie biomasse et l'énergie hydroélectrique, sont des solutions prometteuses pour concurrencer les sources d'énergies de masse telle que l'énergie fossile et nucléaire.

On entend par énergie renouvelable, des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les Energies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée.

Le rayonnement solaire est reparti sur toute la surface de la terre, sa densité n'est pas grande et ne cause aucun conflit entre les pays contrairement au pétrole.

Parmi ces énergies renouvelables, on peut citer la production d'électricité d'origine solaire par l'effet photovoltaïque (cellules solaires ou photopiles). La conversion de la lumière en électricité (conversion photovoltaïque) se produit dans des matériaux semi-conducteurs. Le photovoltaïque peut jouer un rôle important dans la transition vers un système

Dans ces dernières années, la production d'électricité à partir de la conversion photovoltaïque augmente dans le monde d'une façon remarquable. Cependant, la part de cette conversion en électricité reste faible comparativement à celle des autres énergies renouvelables, telles que l'énergie éolienne ou biomasse. Le principal obstacle à la pénétration du marché par le photovoltaïque est le cout de cette technologie qui rend l'électricité produite trop chère pour de nombreuse application. En effet, la plupart des cellules solaires sont fabriquées à partir du silicium et malgré leur bon rendement, le cout des cellules reste élevé. L'industrie du photovoltaïque doit devenir plus concurrentielle et mettre au point des procédés de fabrication et des systèmes de conversion plus rentables. On a donc besoin de trouver d'autres matériaux possédant de bon rendement.

Dans ce mémoire on va faire l'étude et la conception d'un mini-caractérisateur pour module photovoltaïque . La raison principale qui nous a poussés à faire ce travail est basé

pour relever la courbe I-V est basé sur un balayage des points constituant la courbe et qui appartiennent à l'intervalle représenté entre le point de court-circuit ($V=0$, $I=I_{sc}$) et celui du circuit-ouvert ($V=V_{oc}$, $I=0$).

On a devisé notre travail en quatre chapitres comme se suit :

Dans le chapitre 01, on va essayer de mettre en évidence diverses technologies de conversion photovoltaïque, son principe de fonctionnement ainsi que les avantages et les inconvénients de ce phénomène .

Dans le chapitre 02, on va compiler pas mal d'articles relevant ce sujet ,et nous terminons ce chapitre par une discussion sur les différentes méthodes basées sur leur flexibilité, fidélité et frais .

Dans le chapitre 03 on va faire la conception par la simulation d'un mini-caractérisateur à l'aide du fameux logiciel de simulation ISIS-Proteus .

dans Le chapitre 04 on va vérifier les résultats de test par la simulation pour validation du banc d'essai .

Chapitre I. Conversion photovoltaïque

Chapitre I. Conversion photovoltaïque

I.1 Introduction

Le terme « photovoltaïque » peut désigner le phénomène physique (l'effet photovoltaïque découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839) ou la technologie associée. L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire au moyen d'une cellule photovoltaïque. Schématiquement, un photon de lumière incidente permet sous certaines circonstances de mettre en mouvement un électron, produisant ainsi un courant électrique. Les cellules photovoltaïques sont fabriquées avec des matériaux semi-conducteurs principalement produits à partir de silicium. Ces matériaux émettent des électrons lorsqu'ils sont soumis à l'action de la lumière. Ceux-ci sont éjectés du matériau et ils circulent dans un circuit fermé, produisant ainsi de l'électricité.

Nous essayons dans ce chapitre de mettre en évidence diverses technologies de conversion photovoltaïque, son principe de fonctionnement ainsi que les avantages et les inconvénients de ce phénomène.

I.2 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques exploitent l'effet photoélectrique pour produire du courant continu par absorption du rayonnement solaire. Cet effet permet aux cellules de convertir directement l'énergie lumineuse des photons en électricité par le biais d'un matériau semi-conducteur transportant les charges électriques.

Une cellule photovoltaïque est composée de deux types de matériaux semi-conducteurs, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit d'électrons. Ces deux parties sont respectivement dites « dopées » de type n et de type p. Le dopage des cristaux de silicium consiste à leur ajouter d'autres atomes pour améliorer la conductivité du matériau.

Un atome de silicium compte 4 électrons périphériques. L'une des couches de la cellule est dopée avec des atomes de phosphore qui, eux, comptent 5 électrons (soit 1 de plus que le silicium). On parle de dopage de type n comme négatif, car les électrons (de charge négative) sont excédentaires. L'autre couche est dopée avec des atomes de bore qui ont 3 électrons (1 de moins que le silicium). On parle de dopage de type p comme positif en raison du déficit d'électrons ainsi créé. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p.

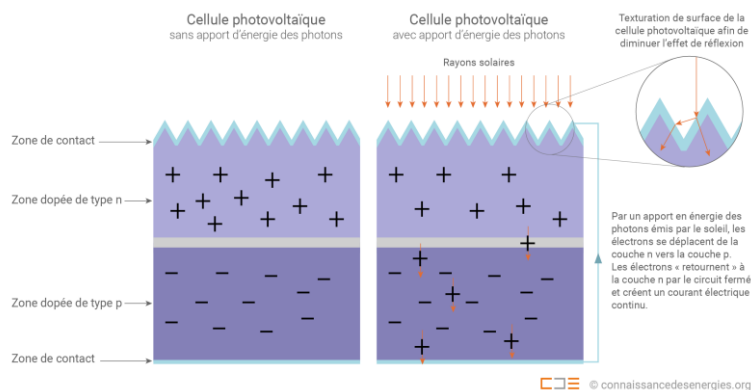


Figure I.1– Constitution d'une cellule photovoltaïque (Connaissance des Énergies, d'après CEA)

En traversant la cellule photovoltaïque, les photons arrachent des électrons aux atomes de silicium des deux couches n et p. Les électrons libérés se déplacent alors dans toutes les directions. Après avoir quitté la couche p, les électrons empruntent ensuite un circuit pour retourner à la couche n. Ce déplacement d'électrons n'est autre que de l'électricité.

I.3 Etat des lieux des technologies traditionnelles

I.3.1 Le solaire photovoltaïque non concentré

Les technologies à base de silicium constituent plus de 90% du marché photovoltaïque mondial [2].

➤ Les cellules monocristallines

C'est la filière historique du photovoltaïque. Les cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération. Elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en une seule pièce. Elles ont un bon rendement mais la méthode de production est laborieuse et coûteuse. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites « solaires ».

➤ Les cellules poly-cristallines

Les cellules poly-cristallines sont élaborées à partir d'un bloc de silicium composé de cristaux multiples. Elles ont un rendement plus faible que les cellules monocristallines mais leur coût de production est moindre. Des avancées technologiques permettent aujourd'hui de produire des cellules poly-cristallines à couches minces afin d'économiser le silicium. Ces cellules ont une épaisseur de l'ordre de quelques micromètres d'épaisseur.

Au cours des dix dernières années, le rendement moyen d'un panneau photovoltaïque à base de silicium est passé de 12% à 17% selon l'institut allemand Fraunhofer [3].

I.3.2 Le solaire photovoltaïque concentré

Les miroirs concentrent les rayons du soleil sur une petite cellule solaire photovoltaïque à haut rendement. Grâce à cette technologie de concentration, les matériaux semi-conducteurs peuvent être remplacés par des systèmes optiques moins coûteux. A puissance égale, ceci permet d'utiliser 1 000 fois moins de matériel photovoltaïque que dans les panneaux photovoltaïques à insolation directe.

Cette technologie devrait pénétrer le marché dans un avenir proche.

Le rendement théorique maximum de la conversion photon-électron est de l'ordre de 85% (le rendement de Carnot est 95 %) [4]. Le rendement expérimental maximal obtenu avec cette technologie est pour le moment de 46% [5].

I.3.3 Les constituants organiques (polymères)

L'utilisation de matériaux polymères vise à remplacer les matériaux minéraux par des semi-conducteurs organiques, autrement dit des plastiques, pour la fabrication de cellules photovoltaïques. Ceux-ci sont bon marché, ont des bonnes propriétés d'absorption et sont faciles à déposer. Leur coût de revient très faible se double de caractéristiques particulièrement attrayantes : plus légères et moins fragiles, leur nature flexible permet d'obtenir des matériaux souples en polymères organiques ou en silicone et même des encres photovoltaïques.

D'une durée de vie courte, elles n'offrent pour l'instant que des rendements dépassant légèrement 10% en laboratoire [6] mais pourraient servir de base au développement d'une filière industrielle.

I.3.4 Les cellules hybrides : thermique et photovoltaïque

Le rendement des cellules solaires photovoltaïques diminue lorsque les panneaux montent en température. Certains centres de recherche [7] ont eu l'idée de récupérer la chaleur captée et libérée par le photovoltaïque pour simultanément optimiser le rendement électrique et obtenir une source de chauffage. Ils développent ainsi des capteurs solaires hybrides mariant le photovoltaïque et le thermique.

I.4 Avantages et inconvénients :

I.4.1 Avantages

- L'énergie solaire est, à l'échelle humaine, inépuisable et disponible gratuitement en très grandes quantités. De plus, lors de la phase d'exploitation, la production d'électricité au moyen de panneaux photovoltaïques n'est pas polluante.

- Le silicium, matériau utilisé dans les panneaux solaires actuels les plus répandus, est très abondant et n'est pas toxique.
- Les panneaux solaires ont une durée de vie de 20 à plus de 30 ans et sont presque intégralement recyclables.
- La modularité des panneaux est très importante, c'est-à-dire qu'il est possible de concevoir des installations de tailles diverses dans des environnements très variés. Ceux-ci sont par conséquent adaptés à la production décentralisée d'électricité en sites isolés.
- Les panneaux photovoltaïques peuvent être utilisés à des fins domestiques de petite échelle (par exemple sur des toitures) ou à des fins de production énergétique industrielle à grande échelle.

I.4.2 Inconvénients

- La technologie photovoltaïque est encore coûteuse même si son coût de production (LCOE) a fortement baissé au cours des dernières années.
- Les panneaux photovoltaïques les plus répandus, faits de silicium cristallin, sont lourds, fragiles et difficiles à installer.
- Une centrale requiert de vastes espaces bien que la densité tende à être améliorée.
- L'impact environnemental et énergétique de la fabrication des panneaux de silicium n'est pas nul. Une cellule photovoltaïque doit fonctionner entre un an et demi et cinq ans pour compenser l'énergie utilisée pour la fabriquer [8].
- L'énergie électrique n'est pas « directement » stockable, c'est-à-dire sous sa forme primaire. Il est en revanche possible de la stocker « indirectement » dans des batteries sous forme chimique ou dans des accumulateurs cinétiques sous forme mécanique. Les technologies existantes sont encore coûteuses.

I.5 Modélisation et schéma électrique d'une cellule photovoltaïque

Lorsqu'une jonction PN réalisée à partir de matériaux sensibles à la lumière est éclairée, elle présente la particularité de pouvoir fonctionner en générateur d'énergie. Ce comportement en statique peut être décrit par l'équation électrique définissant le comportement d'une diode classique. Ainsi, le régime électrique statique d'une cellule photovoltaïque constituée d'une jonction PN en silicium peut être décrit via l'équation suivante :

$$I_{Cell} = I_{CC} - I_{Sat} \left[\exp \left(\frac{V_{Cell} + (I_{Cell} * R_{Serie})}{nV_T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{Cell} + (I_{Cell} * R_{Serie})}{R_{Shunt}} \dots \dots (1.1)$$

Où $V_T = K * T / e$ représente le potentiel thermodynamique, I_{Sat} le courant de saturation de la jonction, K la constante de **Boltzmann**, T la température de la cellule en Kelvin, e la charge d'un électron, n le facteur de non idéalité de la jonction, I_{Cell} le courant

fourni par la cellule, V_{cell} la tension aux bornes de la cellule, I_{CC} le courant produit par la cellule lorsqu'elle est mise en court-circuit, R_{shunt} la résistance modélisant les courants de fuites de la jonction, et finalement, R_{serie} la résistance série caractérisant les diverses résistances de contacts et de connexions.

La Figure 2 représente avec des composants électriques, le comportement électrique équivalent déduit de l'équation (1.1). [9]

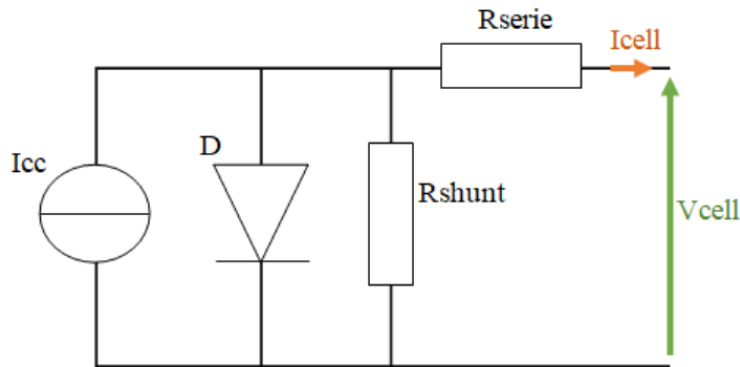


Figure I.2– Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque

I.6 Paramètres essentiels caractérisant les cellules photovoltaïques

Une cellule photovoltaïque est caractérisée par un rendement de conversion η , une tension à circuit ouvert V_{CO} , un courant de court-circuit I_{CC} et un facteur de forme FF .

La caractéristique courant-tension est utilisée pour déterminer ces paramètres, elle sert aussi à étudier le comportement de différentes cellules éclairées dans des conditions identiques.

I.6.1 Courant de court-circuit

Si les deux électrodes sont en court-circuit à travers un ampèremètre, les électrons drainés par un champ interne de la jonction vont donner naissance à un courant de court-circuit I_{CC} qui correspond au photo-courant I_{PH} généré par le rayonnement. Pour une distribution spectrale donnée, ce photo-courant est proportionnel à l'irradiation du rayonnement incident et à la surface active de captation. Il définit la quantité de paire électron-trou générée G qui traverse la jonction sans recombinaison entre les longueurs de diffusion L_n et L_p , donné par la relation:

$$I_{PH} = q * G * (L_n + L_p) \dots \dots (1.2)$$

I.6.2 Tension de circuit ouvert

Si la cellule est laissée en circuit ouvert, les porteurs générés par le rayonnement et séparés par le champ interne vont s'accumuler de part et d'autre de la jonction, induisant une auto polarisation de la jonction dans le sens passant. Cette auto polarisation induit un courant de diode dans le sens direct égal et opposé au photo-courant. La tension alors mesurée aux bornes des électrodes est appelée tension de circuit ouvert V_{CO} . C'est la tension qu'il faudrait appliquer à la diode dans le sens passant pour générer un courant égal au photo-courant, elle est donnée par la relation :

$$V_{CO} = \left(\frac{K * T}{q} \right) \ln \left[\left(\frac{I_{CC}}{I_0} \right) + 1 \right] \dots \dots (1.3)$$

I.6.3 La puissance caractéristique d'une cellule PV

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement fixes (éclairage, température, vitesse de circulation de l'air ambiant, etc..), la puissance électrique **P** que peut produire une cellule photovoltaïque (Figure 3) est égale au produit du courant continu fourni **I** par une tension continue donnée **V** :

$$P = V * I \dots \dots (1.4)$$

P : Puissance mesurée aux bornes de la cellule PV.

V : Tension mesurée aux bornes de la cellule PV.

I : Intensité mesurée aux bornes de la cellule PV.

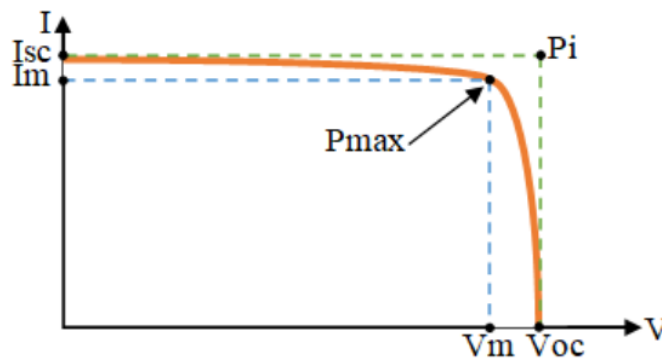


Figure I.3– Puissance maximum d'une cellule PV

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximum idéale P_i correspondrait donc à la tension de circuit ouvert V_{CO} multipliée par le courant de court-circuit I_{CC} (Figure 3) :

$$P_i = P_{\max \text{ Idéale}} = V_{CO} * I_{CC} \dots \dots (1.5)$$

En pratique, la courbe caractéristique d'une cellule PV est plus "arrondie", et la tension au point de puissance maximum $V_{P_{\max}}$ est inférieure à la tension de circuit ouvert V_{CO} , de

même que le courant fourni I_{Pmax} est inférieur, pour cette même tension, au courant de court-circuit I_{CC} .

$$P_{max} = V_m * I_m \dots \dots (1.6)$$

I.6.4 Facteur de forme

Le facteur de forme représente l'efficacité de la cellule ou encore, il peut nous renseigner sur le vieillissement de la cellule. C'est le rapport entre la puissance maximale débitée P_{max} et la puissance idéale P_I . Le facteur de forme FF correspond au rapport [10, 11]:

$$FF = \frac{P_{max}}{P_I} = \frac{V_m * I_m}{V_{CO} * I_{CC}} \dots \dots (1.7)$$

I.6.5 Rendement de conversion d'énergie

Le rendement de conversion d'énergie est le rapport de la puissance générée et de la puissance du rayonnement solaire incident P_0 qui est normalisée à 100 mW cm⁻² pour un spectre de AM1.5. On appelle rendement maximal, le rapport entre la puissance maximale et la puissance P_0 [12]:

$$\eta = \frac{V_m * I_m}{P_0} = FF * \frac{V_{CO} * I_{CC}}{P_0} \dots \dots (1.8)$$

I.7 Le module photovoltaïque :

Le module PV est composé de plusieurs cellules associées en série et/ou parallèle, disposées en rangées. Cet assemblage de cellules se fait de manière différente suivant les technologies.

I.7.1 L'association en série

Lorsque l'on associe N_s cellules PV en série, les tensions de ces cellules s'additionnent et le courant généré est le même dans toute la branche. La caractéristique I-V résultante de l'association de la Figure 4 est obtenue en multipliant point par point et pour un même courant, la tension individuelle V_i par N_s . On note aussi que l'impédance optimale de l'association sera N_s fois plus grande que celle de la cellule de base.

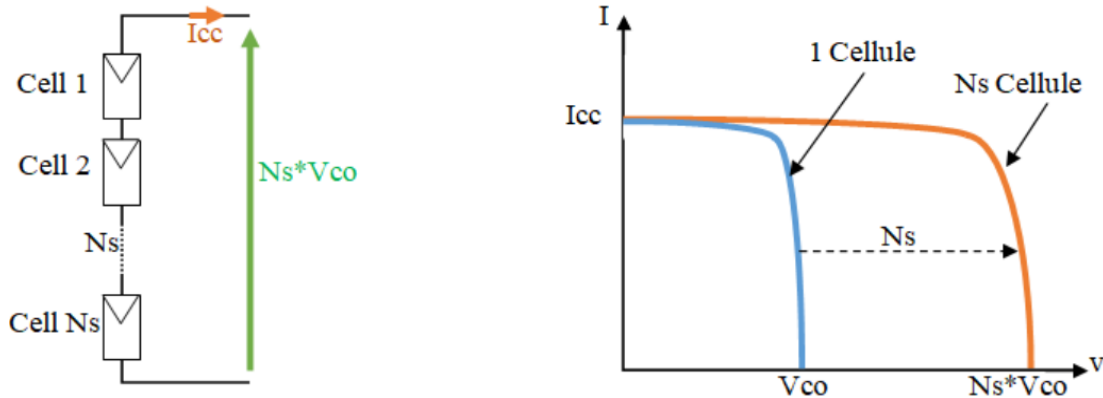


Figure I.4– Caractéristiques résultantes d'un groupement de (Ns) cellules en série

Le courant généré par Ns cellules PV en série étant le même dans toute la branche et limité par le courant de la cellule la plus faible, on prendra soin de ne connecter en série que des cellules ayant la même densité de courant. C'est pour cela qu'en production, toutes les cellules sont testées et triées en fonction de leur rendement.

Les résistances séries s'ajoutent. L'augmentation de la résistance série induit une perte de puissance, il faut donc faire attention à la résistance d'interconnexion des cellules, dans une association en série. Le facteur de forme d'un module ne peut en général pas être meilleur que celui de ses cellules constitutives. Comme pour le courant, il se rapproche de celui de la plus mauvaise cellule. Les résistances parallèles s'ajoutent également.

L'équation (1.9) résume les caractéristiques électriques d'une association série de Ns cellules.

$$\begin{cases} V_{CO_{Ns}} = N_s * V_{CO} \\ I_{CC_{Ns}} = I_{CC} \end{cases} \dots \dots (1.9)$$

$V_{CO_{Ns}}$: La somme des tensions en circuit ouvert de Ns cellules en série.

$I_{CC_{Ns}}$: Le courant de court-circuit de Ns cellules en série.

Ce système d'association est généralement le plus communément utilisé pour les modules photovoltaïques du commerce.

I.7.2 L'association en parallèle

Cette fois-ci, c'est la tension de chaque cellule qui doit être identique, les courants s'ajoutant. La nouvelle courbe de la Figure 5 est obtenue en additionnant point par point et pour chaque valeur de tension, le courant de la cellule de base par Np. L'impédance optimale de l'association sera Np fois plus faible que celle d'une cellule individuelle.

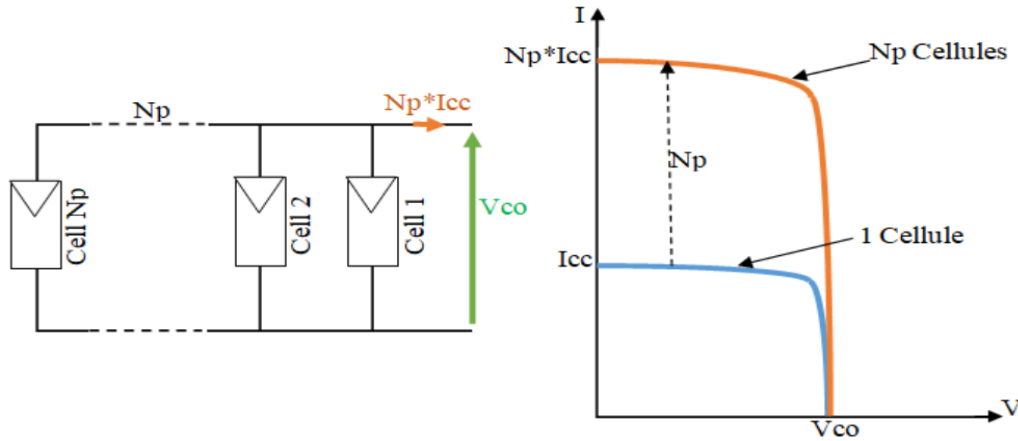


Figure I.5– Caractéristiques d'un groupement de (N_p) cellules en parallèles

L'équation (1.10) et la Figure 5 résument les caractéristiques électriques d'une association parallèle de (N_p) cellules.

$$\begin{cases} I_{CC_{Np}} = N_p * I_{CC} \\ V_{CO_{Np}} = V_{CO} \end{cases} \dots \dots (1.10)$$

$I_{CC_{Np}}$: La somme des courants de court-circuit de N_p cellules en parallèle.

$V_{CO_{Np}}$: La tension du circuit ouvert de N_p cellules en parallèle.

I.8 L'association série et parallèle (Le GPV)

La caractéristique (I, V) d'un générateur photovoltaïque peut être considérée comme le fruit d'une association d'un réseau de ($N_s * N_p$) cellules en série/parallèle.

La caractéristique globale peut en outre, varier en fonction de l'éclairement, température, du vieillissement des cellules et les effets d'ombrage ou d'inhomogénéité de l'éclairement. De plus, il suffit d'une occultation ou d'une dégradation d'une des cellules mises en série pour provoquer une forte diminution du courant produit par le module photovoltaïque. Lorsque le courant débité est supérieur au courant produit par la cellule faiblement éclairée, la tension de celle-ci devient négative et devient un élément récepteur. Celle-ci se trouve à dissiper une quantité trop importante de puissance électrique qui pourrait aboutir à sa destruction si le défaut persiste trop longtemps. C'est le phénomène du point chaud. Pour remédier à ce phénomène, on équipe donc les GPV par des diodes by-pass qui ont pour rôle de protéger les cellules qui deviennent passives.

Un tel regroupement des cellules (série et parallèle) avec diode de protection sont représentés par la Figure 6 qui suit.

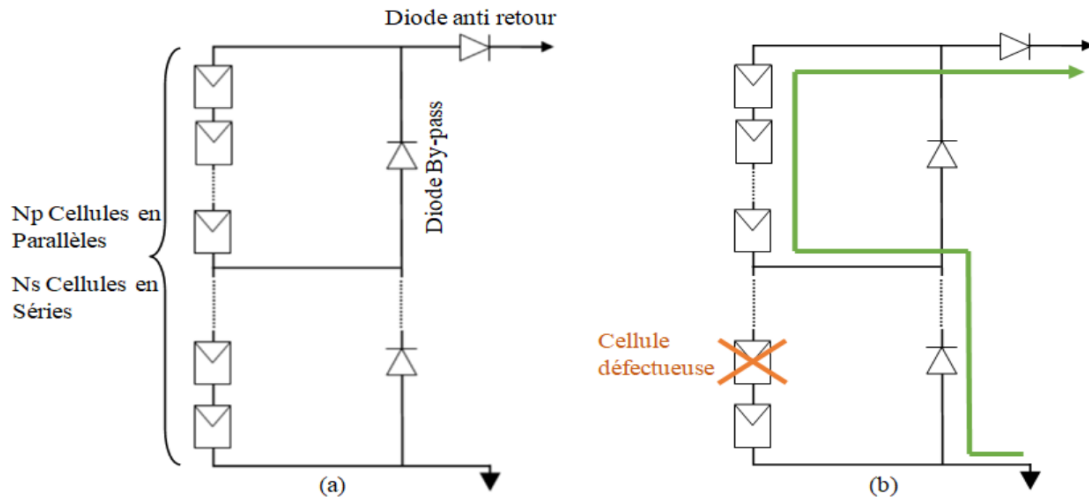


Figure I.6– (a) architecture classique d'un GPV avec diodes de protections. (b) défaillance d'une des cellules du GPV.

La diode by-pass lorsqu'elle se met à fonctionner, court-circuite alors une partie du GPV comme indiqué en figure (6-b), évitant ainsi la circulation du courant inverse au sein des cellules défectueuses. Par contre, cette solution efficace réduit d'autant la puissance délivrée ainsi que la tension aux bornes du GPV. La dégradation d'une seule cellule condamne donc le groupe de cellules associées à la cellule défectueuse, elle est protégée par la diode (by-pass) à ne pas produire de puissance. Ce phénomène de perte parallèle de puissance est à comparer à la perte totale d'un panneau entier en cas de problème sur une cellule avec un GPV fonctionnant sans protection [13].

On s'aperçoit donc que la maîtrise de cette énergie photovoltaïque n'est pas aussi simple qu'il n'y paraît. La production de courant dans un GPV du commerce est donc limitée par la cellule la plus faible de l'ensemble. Généralement, lors de l'assemblage des cellules, il est nécessaire de les trier en fonction de leurs caractéristiques électriques afin d'obtenir une association homogène et ainsi éviter de limiter la puissance fournie par le panneau à cause d'une dispersion des cellules. De plus, le vieillissement des cellules peut produire une dispersion des caractéristiques. Les conditions météorologiques auxquelles les modules sont soumis (ensoleillement inhomogène, température, salissures, neige, pluie, dépôt de feuilles mortes..) fait de l'énergie photovoltaïque une ressource difficilement maîtrisable.

I.9 Effet de la température et éclairage sur la caractéristique I(V) d'une cellule PV.

La conversion photovoltaïque est une application énergétique fortement dépendante de la température et du rayonnement solaire. Dans les applications terrestres, les cellules solaires sont généralement exposées aux températures de fonctionnement variant de 10 à 50 °C ainsi qu'un rayonnement variant de 500 à 1000 W/m².

I.9.1 Influence de l'éclairement.

L'énergie électrique produite par une cellule photovoltaïque dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. La Figure 7-8 représente la caractéristique courant-tension d'une cellule PV solaire en fonction de l'éclairement, à une température et une vitesse de circulation de l'air ambiant constantes. On remarque que la tension V_{max} correspondant à la puissance maximale ne varie que très peu en fonction de l'éclairement, contrairement au courant I_{max} qui augmente fortement avec l'éclairement.

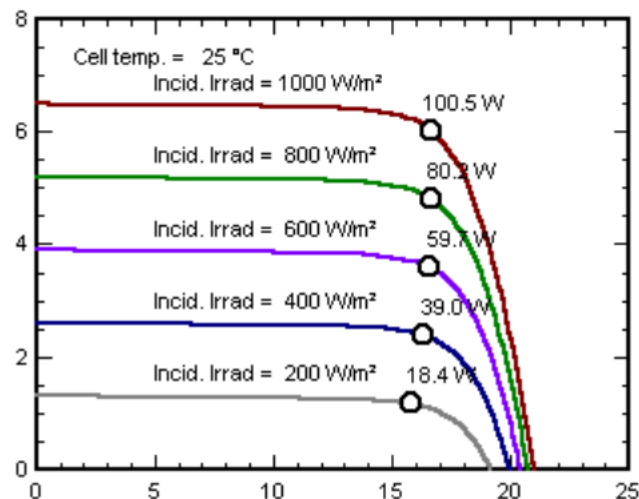


Figure I.7– Caractéristique courant-tension d'une cellule PV à température constante en fonction de l'éclairement (Source Ecosystèmes)

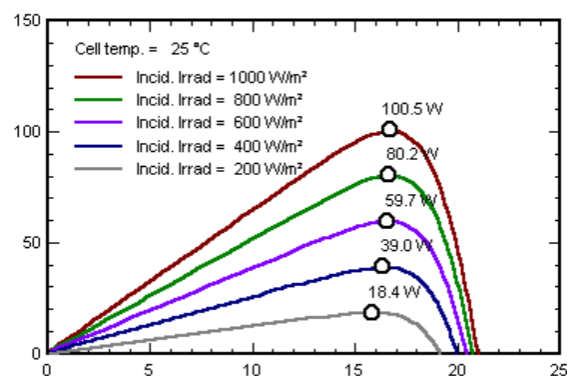


Figure I.8– Influence de l'irradiation- Puissance en fonction de la tension (Source Ecosystèmes)

I.9.2 Influence de la température.

Les caractéristiques électriques d'une cellule PV dépendent de la température de jonction au niveau de la surface exposée. Le comportement de la cellule PV en fonction de la température est complexe.

Les courbes suivantes représentent l'évolution du courant et de la tension en fonction de la température de jonction de la cellule, les autres conditions extérieures restant fixes :

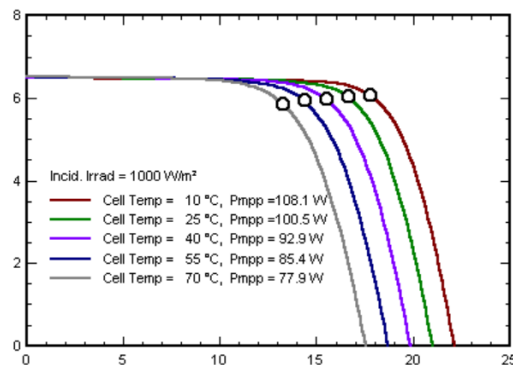


Figure I.9– Caractéristique courant-tension d'une cellule PV à éclairement constant en fonction de la température (Source Ecosystèmes)

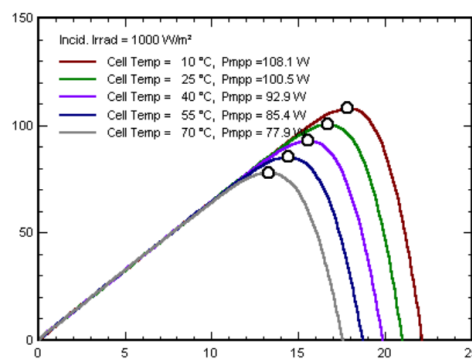


Figure I.10– Influence de la température - Puissance en fonction de la tension (Source Ecosystèmes).

I.9.3 L'influence de la température et du rayonnement

Dans le cas d'utilisation de cellules PV avec le rayonnement solaire, les conditions ambiantes extérieures (température, rayonnement solaire, vitesse de circulation de l'air ambiant - vitesse du vent) varient en permanence...

Pour le calcul d'une installation solaire, il faut donc tenir compte du fait que l'éclairement et la température varient simultanément. Ce point est très souvent négligé lors du dimensionnement d'ensembles solaires photovoltaïques.

I.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le phénomène de la conversion photovoltaïque et sa composante élémentaire. Nous avons par la suite évoqué les différentes technologies de fabrication de la cellule PV et le passage de cette composante élémentaire à un GPV (Générateur Photovoltaïque) par l'association mixte en série et en parallèle de ces cellules.

Nous avons par la suite indiqué l'effet des conditions climatiques sur une cellule PV voir un GPV et l'influence sur la caractéristique I-V.

Chapitre II. Techniques de caractérisation des dispositifs photovoltaïque

Chapitre II. Techniques de caractérisation des dispositifs photovoltaïque

II.1 Introduction

Le phénomène photovoltaïque se traduit par une courbe de multiples coordonnées de courant-tension (I-V) dont on appelle la caractéristique I-V d'un GPV. Afin de définir l'efficacité de ce dispositif représentée par le point de puissance maximale, une caractérisation relevant l'ensemble des points qui constituent la courbe I-V soit indispensable.

Seule la mesure expérimentale des paires courant-tension I-V nous permet de connaître avec précision les paramètres électriques.

Dans ce chapitre et compte tenu du nombre important de méthodes pour la mesure I-V, Nous avons compilé pas mal d'articles relevant ce sujet. Ce chapitre se terminera par une discussion sur les différentes méthodes basées sur leur flexibilité, fidélité et frais. Un tableau résumera les principales caractéristiques des méthodes.

II.2 Différentes techniques

Le principe de base pour relever la courbe I-V est basé sur un balayage des points constituant la courbe et qui appartiennent à l'intervalle représenté entre le point de court-circuit ($V=0$, $I=I_{sc}$) et celui du circuit-ouvert ($V=V_{co}$, $I=0$). Il existe différentes méthodes pour effectuer cette tâche.

II.2.1 Résistance variable

La méthode la plus simple et la plus connue dans la caractérisation des GPV est l'utilisation d'une charge résistive pure R comme le montre la Figure 2.1. La variation de cette résistance R se fait par étapes ; de zéro à l'infini (de 0 à ∞) avec un pas régulier ou irrégulier afin de parcourir toute la courbe I-V depuis le court-circuit jusqu'au circuit ouvert, en relevant la tension et le courant dans chaque étape. Cette méthode n'est applicable qu'aux GPV de faible puissance, à cause de l'indisponibilité des résistances pour une puissance plus élevée [14]. De plus, la variation résistance de charge se fait par étape et manuellement, ce qui rend le processus très lent de sorte que le rayonnement solaire et les conditions thermiques pourraient être modifiées pendant la mesure [15]. Dans chaque étape, la mesure de la tension et du courant se réalise à l'aide d'une paire de multimètre numérique.

Par ailleurs, sur le plan pratique, on utilise un ensemble de résistances comme charge. Un tableau de relais contrôlé par ordinateur, est utilisé pour sélectionner la combinaison de résistances pour obtenir une résistance bien spécifique [16][17]. Les résistances sont choisies de telle sorte que la diffusion de points soit autour du 'coude' de la courbe I-V. Deux canaux

A/D de la carte d'ordinateur sont utilisés afin de mesurer chaque Paire I-V. Avec cette approche, le fonctionnement manuel sur la résistance est évité et le temps d'acquisition est amélioré.

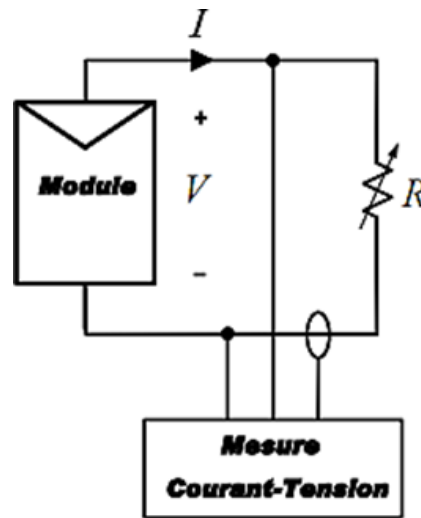


Figure II.1– Caractérisation à l'aide d'une charge résistive

II.2.2 Charge capacitive :

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

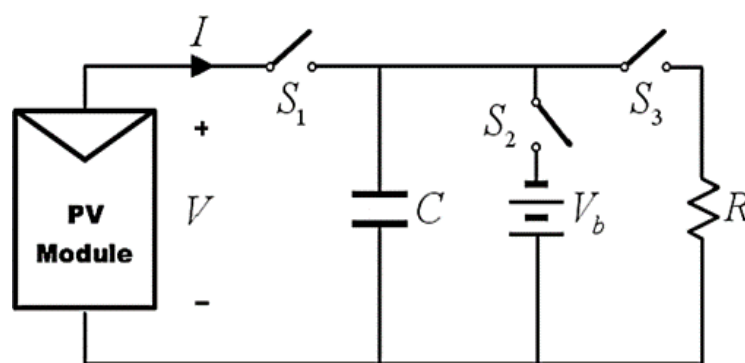


Figure II.2– Caractérisation à l'aide d'une charge capacitive

Au lieu de commencer la deuxième charge avec le courant de court-circuit, nous pourrions commencer avec S2 fermé, de sorte que le condensateur serait initialement chargé à une tension négative et le balayage de la courbe I-V se ferait à partir du 2ème quadrant afin d'obtenir le courant de court-circuit I_{sc} . Par ailleurs, pour effectuer une nouvelle mesure, le condensateur doit se décharger préalablement à travers la résistance R par le biais de la

fermeture de l'interrupteur S3. Il est à noter que les trois interrupteurs doivent être activés avec une séquence appropriée. Le temps de charge du condensateur est directement proportionnel à la valeur de C et la tension de circuit-ouvert du module ou GPV à caractériser et inversement proportionnel au courant de court-circuit [18].

En se basant sur cette techniques, deux variantes ont été proposées sont rapportées dans la littérature [19].

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

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

II.2.3 Charge électronique

La méthode de charge électronique (Figure 2.3) utilise un transistor (habituellement un MOSFET) en tant que charge. En variant la tension grille-source, la résistance entre drain et la source est et par conséquent le de courant fourni par le module l'est aussi [20]. Lorsque le balayage de la courbe I-V est réalisé, le MOSFET doit fonctionner dans ses trois régimes de fonctionnement (coupure, linéaire ou triode et saturation). En conséquence, la plus grande partie de l'énergie fournie parLe module devra être dissipé par cet appareil, qu'illimite son application à la puissance moyenne [21][22].

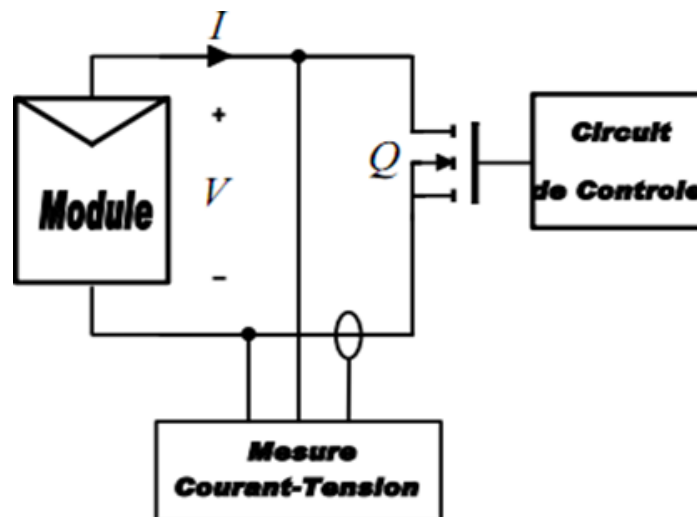


Figure II.3– Caractérisation à l'aide d'une charge électronique.

II.2.4 Charge de quatre quadrants

Une charge de quatre quadrants est une alimentation capable de délivrer et de dissiper de l'énergie ; en d'autres termes, elle peut fonctionner comme source ou générateur de courant bidirectionnel et appliquer une tension positive ou négative, ce qui permet son utilisation comme charge réglable. En figure 2.4 est illustrée la courbe I-V qui peut générer une charge de quatre quadrants et en figure 2.5 est illustré le schéma fonctionnel du circuit qu'on peut implémenter pour réaliser une charge de quatre quadrants.

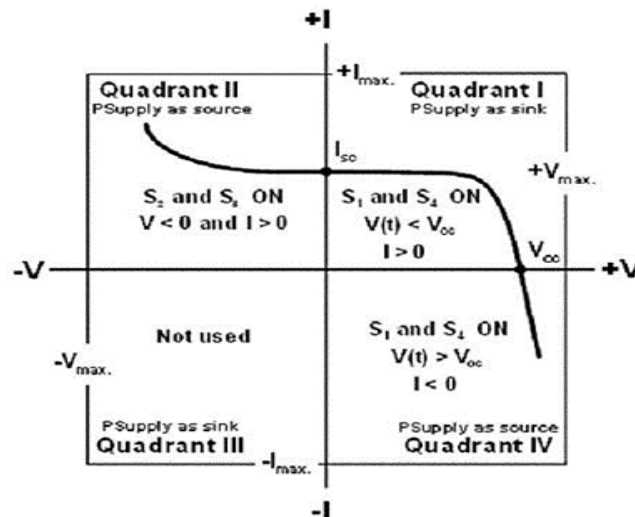


Figure II.4– Courbe I-V dans les quadrants I, II et IV

Pour un module photovoltaïque, l'intérêt principal est d'obtenir la courbe I-V dans le premier quadrant. Mais, l'exploration des points situés dans le 2ème et 4ème quadrants pourraient servir comme outil de diagnostic important afin de détecter la désadaptation dans le fonctionnement du module PV tels que : l'ombrage, le mis match, le hot-spot... etc. [23]

Le principe de fonctionnement d'une charge de quatre quadrants se base sur une alimentation où sa tension de sortie dépendant d'un signal de référence. Ce peut être modifié par une autre référence extérieure ou programmée, pour pouvoir réaliser un balayage de différentes valeurs [24].

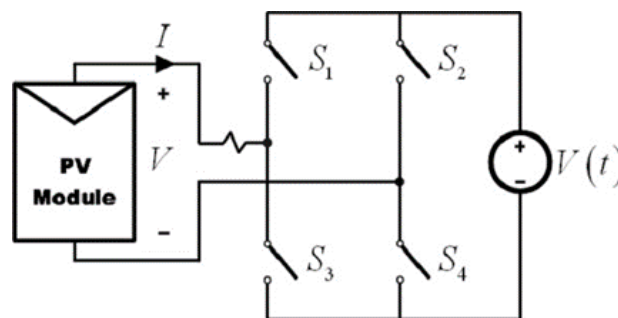


Figure II.5– Schéma fonctionnel d'une charge de quatre quadrants

II.2.5 Charges à base de convertisseurs DC/DC

La capacité des convertisseurs DC-DC à émuler une résistance variable a été étudiée et analysée dans plusieurs applications. Cette propriété des convertisseurs DC-DC d'agir comme résistance a été appliquée pour obtenir des courbes I-V des modules photovoltaïques. Les trois configurations usuelles de convertisseurs DC/DC (Buck, boost et buck-boost) sont similaires à un transformateur DC fonctionnant en mode continu (CCM : Continuous Conduction Mode) et en mode discontinu (DCM : discontinuous Conduction Mode). Dans un transformateur à courant continu, la relation de transformation peut être contrôlée par voie électronique en changeant le rapport cyclique de 0 à 1 [25] [26]. La figure 2.6 montre le schéma servant comme caractériser pour les modules PV au moyen d'un convertisseur DC-DC [27]. Qui émule une résistance R_i aux bornes du. Son principe réside dans l'émulation d'une résistance R_i aux bornes du dispositif PV à caractériser qui pourrait théoriquement varier de 0 (cas du court-circuit) à l'infini (cas du circuit-ouvert) [28] [29].

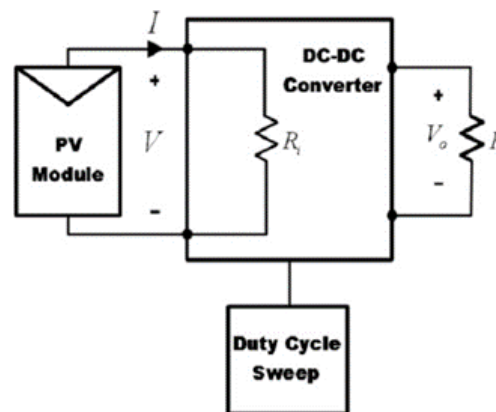
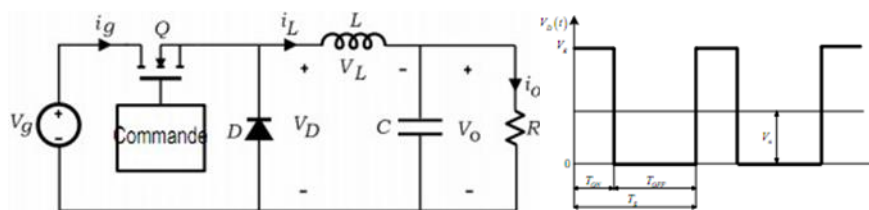


Figure II.6– Schéma synoptique du caractériser à base d'un convertisseur DC-DC

II.2.6 Convertisseur DC-DC abaisseur (Buck)

Comme son nom l'indique, le convertisseur DC-DC abaisseur fournit une tension moyenne de sortie inférieure à la tension d'entrée. La figure 2.7 montre le schéma électrique de ce convertisseur [30] [31].



a) Schéma électrique d'un convertisseur Buck

b) Tension à l'entrée du filtre

Figure II.7– Convertisseur DC-DC Buck.

La charge est constituée par l'impédance Z . Les éléments L et C forment un filtre dont le but est de limiter l'ondulation résultante du découpage sur la tension et le courant de sortie. Si ces éléments sont correctement calculés, on peut supposer que i_s et v_s sont continus (on néglige l'ondulation résiduelle). L'ensemble (filtre + charge) peut être composé différemment, mais nous raisonnerons sur cet exemple par la suite.

II.2.6.1 Fonctionnement

Le cycle de fonctionnement, de période de hachage T_s ($T_s = 1/f_s$), comporte deux étapes. Lors de la première, on rend le transistor passant, la diode se bloque car elle sera polarisée en inverse. Cette phase dure de 0 à αT_s , avec α compris entre 0 et 1 . α Est appelé rapport cyclique. Lors de la seconde, on bloque le transistor. La diode devient passante. Cette phase dure de αT_s à T_s .

II.2.6.2 Modélisation mathématique

Nous allons être amenés à distinguer deux cas : la conduction continue et la conduction discontinue.

Dans le premier, le courant de sortie est suffisamment fort et le courant dans l'inductance ne s'annule jamais, même avec l'ondulation due au découpage.

Dans le second, le courant de sortie moyen est bien entendu positif, mais, en raison de sa faible valeur moyenne, l'ondulation du courant dans l'inductance peut amener ce dernier à s'annuler. Or, les interrupteurs étant unidirectionnels, le courant ne peut changer de signe et reste à 0 .

Les modélisations données par la suite supposent que le fonctionnement est dans le cas de la conduction continue.

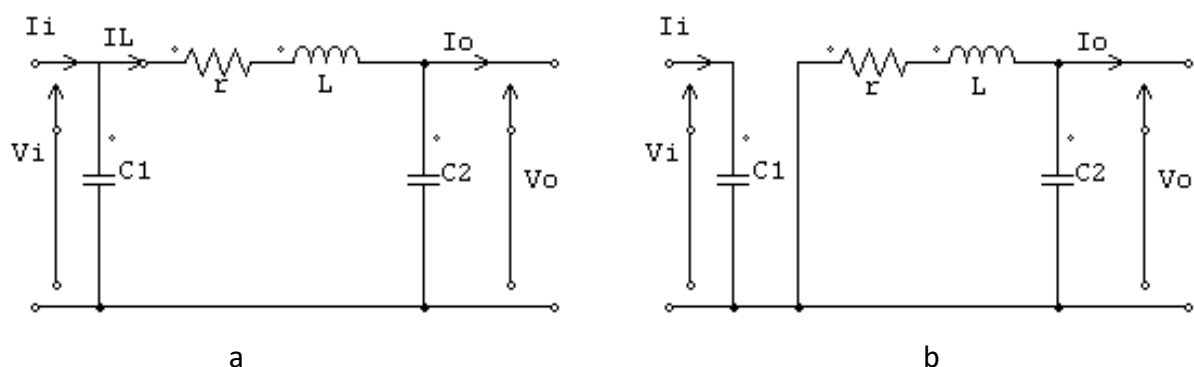


Figure II.8– Circuits équivalents du Buck, S fermé en (a), S ouvert en (b).

En appliquant les lois des courants et des tensions de Kirchhoff sur les deux circuits de la Figure 2.8, on obtient les systèmes d'équations suivants :

$$\begin{cases} I_{C1} = C_1 * \frac{dV_i}{dt} = I_i - I_L \\ I_{C2} = C_2 * \frac{dV_0}{dt} = I_L - I_0 \quad 0 < t < \alpha T_s \dots \dots (2.1) \\ V_L = L * \frac{dI_L}{dt} + r * I_L = V_i - V_0 \end{cases}$$

Pour: $\alpha T_s < t < T_s$

$$\begin{cases} I_{C1} = C_1 * \frac{dV_i}{dt} = I_i \\ I_{C2} = C_2 * \frac{dV_0}{dt} = I_L - I_0 \quad \dots \dots (2.2) \\ V_L = L * \frac{dI_L}{dt} + r * I_L = -V_0 \end{cases}$$

Pour trouver une représentation dynamique valable pour toute la période T_s , on utilise généralement l'expression suivante :

$$\left\{ \left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle T_s = \frac{dx}{dt(\alpha T_s)} * dT_s + \frac{dx}{dt((1-\alpha)T_s)} * (1-\alpha)T_s \right\} \quad (2.3)$$

En appliquant la relation (1.3) sur les systèmes d'équations (1.1) et (1.2), et après arrangement, on obtient les équations qui régissent le système sur une période entière :

Pour : $0 < t < T_s$

$$\begin{cases} I_0 = C_1 * \frac{dV_i}{dt} = I_i - I_L \\ I_L = \frac{1}{\alpha} \left(I_i - C_1 * \frac{dV_i}{dt} \right) \quad \dots \dots (2.4) \\ V_i = \frac{1}{\alpha} \left(V_0 + V * I_L + L * \frac{dI_L}{dt} \right) \end{cases}$$

II.2.7 Convertisseur DC-DC élévateur (boost)

C'est un convertisseur direct DC-DC, la tension moyenne de sortie est supérieure à la tension d'entrée, comme son nom l'indique. Cette structure demande un interrupteur à amorçage et blocage commandé (Bipolaire, MOS, IGBT...) et une diode (amorçage et blocage spontanés).

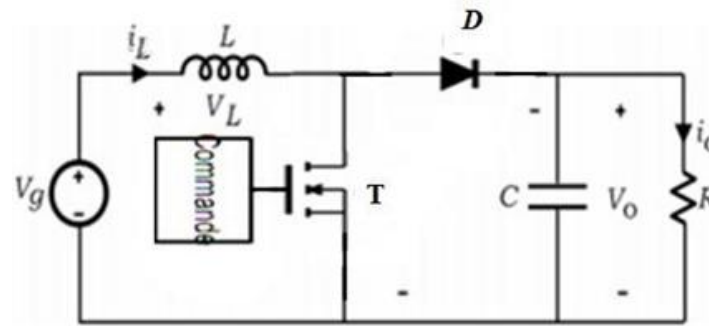


Figure II.9– Convertisseur DC-DC boost

L'inductance permet de lisser le courant appliqué par la source. La capacité C permet de limiter l'ondulation de la tension en sortie.

II.2.7.1 Fonctionnement

Lors de la première partie du cycle de fonctionnement, de 0 à αT_s , l'interrupteur commandé est fermé (passant). Cettefois, la source et la charge ne sont pas en contact durant cette phase. La diode est alors bloquée.

Lors de la seconde partie du cycle, de αT_s à T_s , on ouvre l'interrupteur commandé et la diode devient passante. C'est alors que la source et la charge sont reliées.

II.2.7.2 Modélisation mathématique

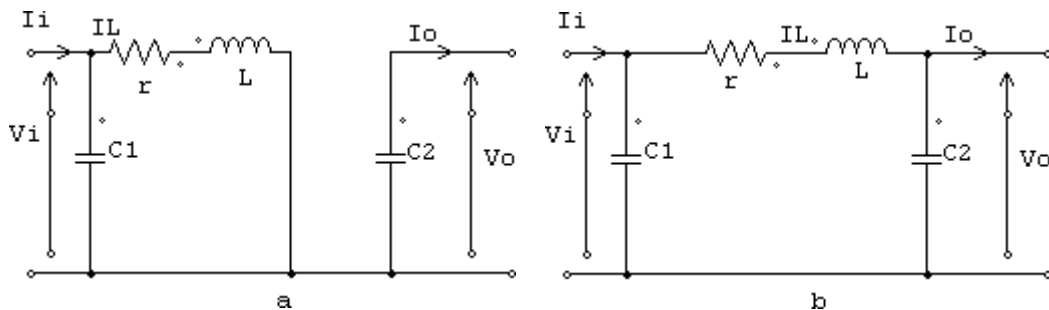


Figure II.10– Circuits équivalents du boost, S fermé (a), S ouvert (b)

Comme pour le circuit Buck, l'application des lois de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents (voir Figure 2.10) des deux phases de fonctionnement nous donne :

Pour $0 < t < \alpha T_s$:

$$\begin{cases} I_{C1} = C_1 * \frac{dV_i}{dt} = I_o - I_L \\ I_{C2} = C_2 * \frac{dV_o}{dt} = -I_o \quad \dots \dots (2.5) \\ V_L = L * \frac{dI_L}{dt} = V_i - r * I_L \end{cases}$$

Pour $\alpha T_s < t < T_s$:

$$\begin{cases} I_{C1} = C_1 * \frac{dV_i}{dt} = I_i - I_L \\ I_{C2} = C_2 * \frac{dV_0}{dt} = I_L - I_0 \\ V_L = L * \frac{dI_L}{dt} = V_1 - V_0 = r * I_L \end{cases} \dots \dots (2.6)$$

En appliquant la relation (2.3) sur les systèmes d'équations (2.5) et (2.6), comme pour le Buck, on trouve le modèle en valeur moyenne du boost :

$$\begin{cases} I_L = I_i - C_1 * \frac{dV_i}{dt} \\ I_0 = (1 - \alpha)I_L - C_2 * \frac{dV_0}{dt} \\ V_i = (1 - \alpha)V_0 + r * I_L + L * \frac{dI_L}{dt} \end{cases} \dots \dots (2.7)$$

II.2.8 Convertisseur DC-DC abaisseur-élevateur (buck-boost).

Le convertisseur buck-boost combine les propriétés des deux convertisseurs précédents, il est utilisé comme un transformateur idéal de n'importe quelle tension d'entrée pour n'importe quelle tension de sortie désirée.

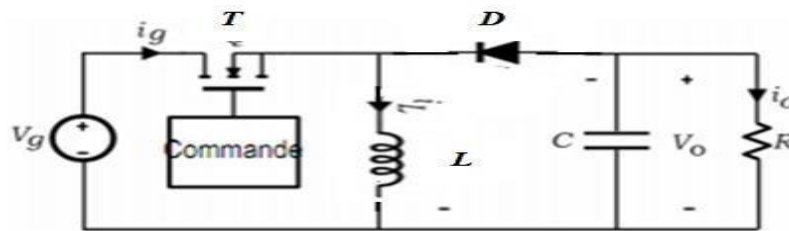


Figure II.11– Convertisseur DC-DC buck-boost.

II.2.8.1 Fonctionnement

Lors de la première partie du cycle de fonctionnement, de 0 à $\alpha \cdot T_s$, l'interrupteur commandé est fermé (passant). La diode est ouverte et l'inductance stocke l'énergie fournie par le générateur d'entrée.

Lors de la seconde partie du cycle, de αT_s à T_s , on ouvre l'interrupteur commandé et la diode devient passante. L'inductance restitue son énergie à la charge.

Il faut noter que le sens de la tension de sortie est inversé par rapport à la tension d'entrée (contrairement aux deux convertisseurs précédents).

II.2.8.2 Modélisation mathématique

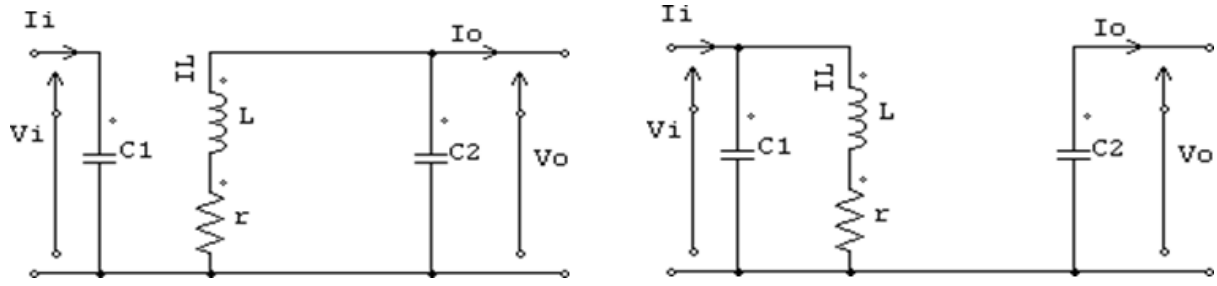


Figure II.12– Circuits équivalents du buck-boost, S fermé (a), S ouvert (b)

La figure 1.12montre les deux schémas équivalents du buck-boost pour les deux cycles de fonctionnement.

En appliquant les lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents précédents, on obtient :

Pour $0 < t < \alpha T_s$:

$$\begin{cases} I_{C1} = C_1 * \frac{dV_i}{dt} = I_i - I_L \\ I_{C2} = C_2 * \frac{dV_0}{dt} = -I_0 \quad \dots \dots (2.8) \\ V_L = L * \frac{dI_L}{dt} = V_i - r * I_L \end{cases}$$

Pour $\alpha T_s < t < T_s$:

$$\begin{cases} I_{C1} = C_1 * \frac{dV_i}{dt} = I_i \\ I_{C2} = C_2 * \frac{dV_0}{dt} = -I_0 - I_L \quad \dots \dots (2.9) \\ V_L = L * \frac{dI_L}{dt} = V_0 - r * I_L \end{cases}$$

En appliquant la relation (1.3) sur les systèmes d'équations (1.8) et (1.9), on trouve le modèle en valeur moyenne du buck-boost :

$$\begin{cases} I_L = \frac{1}{\alpha} \left(I_i - C_1 * \frac{dV_i}{dt} \right) \\ I_0 = -(1 - \alpha) I_L - C_2 * \frac{dV_0}{dt} \quad \dots \dots (2.10) \\ V_i = \frac{1}{\alpha} \left(-(1 - \alpha) V_0 + r * I_L + L * \frac{dI_L}{dt} \right) \end{cases}$$

II.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un état de l'art sur l'aspect théorique des méthodes les plus utilisées dans la caractérisation des modules PV, à savoir : méthode de la résistance variable, méthodes de la charge capacitive, méthode de la charge électronique et méthode utilisant les convertisseurs statiques (hacheur Buck, boost et buck-boost).

Chapitre III. Conception mini caractériser PV en utilisant une charge électronique

Erreur ! Utilisez l'onglet Accueil pour appliquer Heading 1 au texte que vous souhaitez faire apparaître ici.**Chapitre III. Conception mini caractériser PV en utilisant une charge électronique**

III.1 Introduction

Nous présentons dans ce chapitre la conception par la simulation d'un mini caractériser à l'aide du fameux logiciel de simulation ISIS-Proteus que nous avons développé sur cette plateforme la partie Hardware de notre dispositif.

La CAO électronique Proteus, est une suite logicielle, éditée par la société L'absenter Electronics et revendue en France exclusivement par Multi power. Proteus est actuellement (2020) la seule CAO électronique qui permet la conception d'un système électronique complet et de le simuler, y compris avec le code des microcontrôleurs. Pour ce faire, elle inclut un éditeur de schéma (ISIS), un outil de placement-routage (ARES), un simulateur analogique-numérique, un environnement de développement intégré pour microcontrôleurs, un module de programmation par algorithme ainsi qu'un éditeur d'interface pour smartphone afin de piloter à distance des cartes Arduino ou Raspberry [32].

Pour visualiser les résultats obtenus nous avons développés sous LabVIEW une interface graphique pour illustrer la caractéristique issue depuis la partie hardware.

Nous avons utilisé LabVIEW pour la raison de sa simplicité, son mode graphique de programmation. Aussi, étant donné que l'objectif est de contribuer à la mise au point d'un banc éducatif de caractérisation pour GPV, LabVIEW se caractérise par sa compatibilité à interagir avec plusieurs types de cartes électroniques afin d'effectuer un passage depuis les phénomènes physiques à un ensemble de données exploitables dans les deux sens (acquisition ou commande).

Labview est un logiciel graphique développé par National Instrument. Il contient une interface utilisateur interactive appelée « face avant » dans laquelle on introduit les données et on affiche les résultats. L'architecture du programme est contenue dans une autre fenêtre qu'on appelle diagramme. Un programme Labview est appelé instrument virtuel (VI) [33] [34].

III.2 La partie Hardware :

Nous avons vu, précédemment, les différentes techniques pour relever la courbe I-V d'un GPV avec leurs avantages et inconvénients. Notre dispositif consiste à utiliser une charge électronique commandée par une carte à microcontrôleur ARDUINO.

III.2.1 Principe de la technique :

Le principe de la technique se base sur l'application d'une charge électronique aux bornes du GPV et la faire varier d'une manière digital en utilisant une carte a microcontrôleur appelée ARDUINO.

Lors de la variation de cette charge électronique, nous prenons la mesure de la combinaison (I, V) qui représente la caractéristique du GPV.

Comme il s'agit de la simulation, nous avons utilisés le logiciel ISIS-Proteus pour la partie Hardware qui comportera toute al circuiterie électronique de notre montage et le logiciel LABVIEW pour la partie pilotage du banc d'essai, traitement et affichage des données issues.

Pour assurer le pilotage de la carte ainsi que le transfert de données nous avons utilisé une application appelée VSPD (Virtual Serial Port Driver) qui nous a permis d'assurer une communication série virtuelle entre les deux logiciels.

Nous allons part la suite détailler chaque partie qui constitue notre simulation.

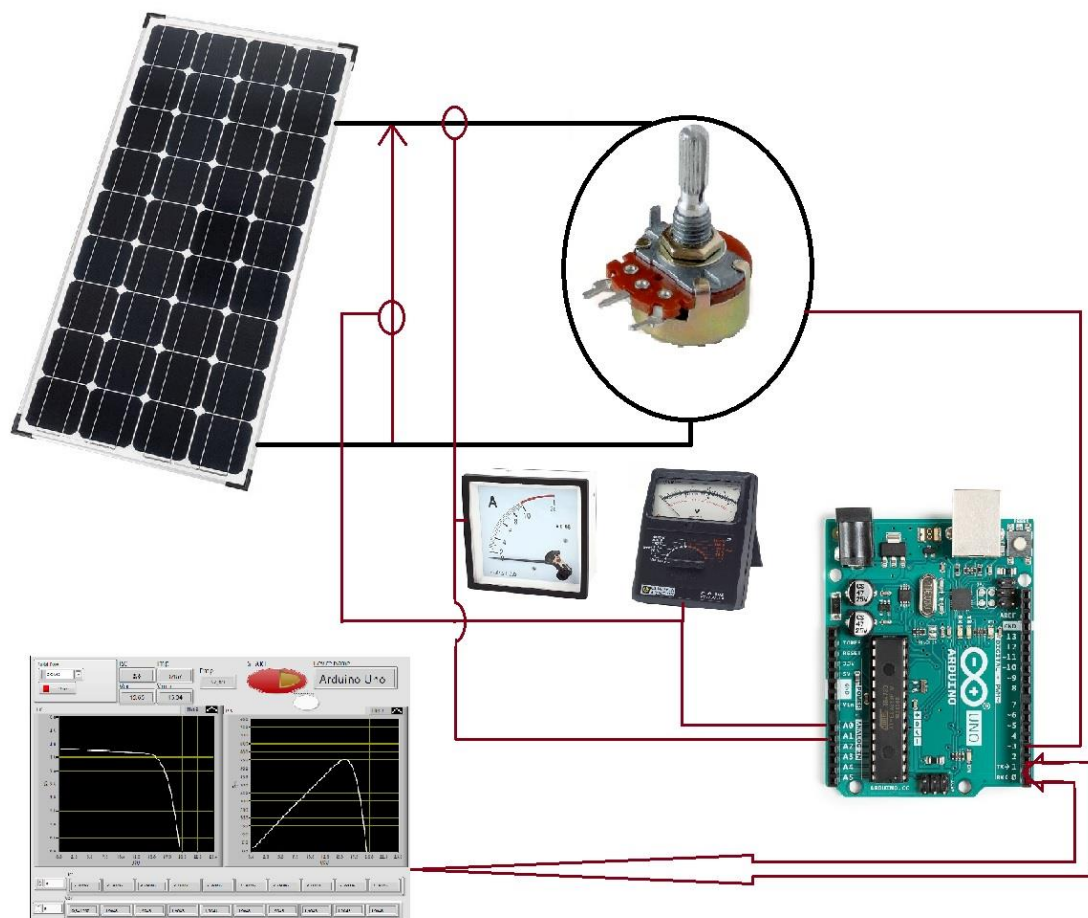


Figure III.1– le schéma synoptique d'un mini-caractériser

III.2.2 La carte ARDUINO :

La carte ARDUINO sera le cœur de notre banc d'essai et servira pour acquisition, commande et transmission de données via le port USB/SERIAL.

III.2.2.1 Acquisition :

La carte ARDUINO est dotée d'un port de six (06) entrées analogiques servons de mesurer une valeur entre 0V et 5V. Comme la caractérisation nécessite les deux valeurs soient la tension et le courant, nous avons utilisé ce port pour mesurer et stocker ces valeurs dans deux vecteurs dans la mémoire interne de la carte.

Pour arriver à mesurer deux caractéristiques qui peuvent dépasser les 5V nous avons utilisés deux capteurs.

III.2.2.1.1 Capteur de courant.

Nous avons relevé la valeur du courant à mesurer par la méthode classique qui nécessite à faire traverser ce dernier par une résistance de faible valeur et prendre la tension en amont et en aval comme montré dans la figure 3.1

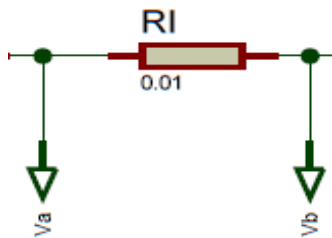


Figure III.2– Conversion du courant à mesurer en tension

Nous avons par la suite utilisé un montage Soustracteur simple a base d'amplificateur opérationnel. Ce montage a pour but de réaliser la soustraction des deux tensions d'entrée Va et Vb comme dans la figure 3.2

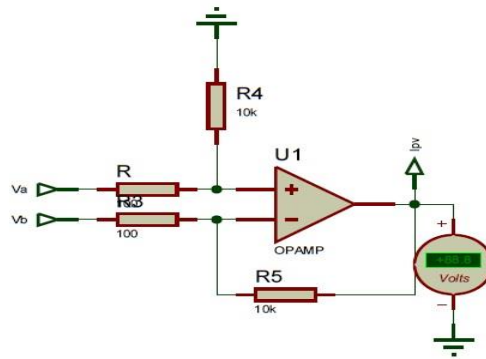


Figure III.3– Soustracteur simple a base d’amplificateur opérationnel

La tension V_+ est obtenue via un pont diviseur de tensions, la tension V_- par le théorème de Millman :

$$V_+ = V_a R_4 / (R_4 + R)$$

$$V_- = \frac{\frac{V_b}{R_3} + \frac{V_{I_{pv}}}{R_5}}{\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_5}} = \frac{\frac{V_b R_5 + V_{I_{pv}} R_3}{R_3 R_5}}{\frac{R_3 + R_5}{R_3 R_5}} = \frac{V_b R_5 + V_{I_{pv}} R_3}{R_3 + R_5}$$

$$\text{Or } V_+ = V_- \Rightarrow \frac{V_a R_4}{R_4 + R} = \frac{V_b R_5 + V_{I_{pv}} R_3}{R_3 + R_5}$$

$$\Leftrightarrow (V_{I_{pv}} R_3) / (R_3 + R_5) = (V_a - V_b) R_4 / (R_4 + R)$$

$$\Leftrightarrow V_{I_{pv}} = R_4 / R (V_a - V_b)$$

La valeur de $V_{I_{pv}}$ représente le courant mesuré conditionnée entre 0 et 5v.

III.2.2.1.2 Capteur de tension.

Pour abaisser la tension sans consommer de puissance, nous avons utilisés le pont diviseur tension qui est formé de deux résistances dont les valeurs déterminent la tension de sortie Figure 3.3

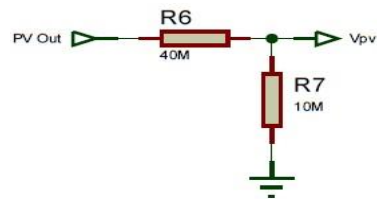


Figure III.4– Montage diviseur de tension

Avec :

$$V_{pv} = \frac{R_7}{R_7 + R_6} V_{PV \text{ Out}}$$

III.2.2.2 Commande :

En utilisant le signal PWM issue de la carte ARDUINO nous avons pu varier la valeur d'une charge électronique connectée au GPV en se servant de la variation de la largeur d'impulsion de 0 à 100%. La Figure 3.4 illustre la partie commande de notre banc d'essai.

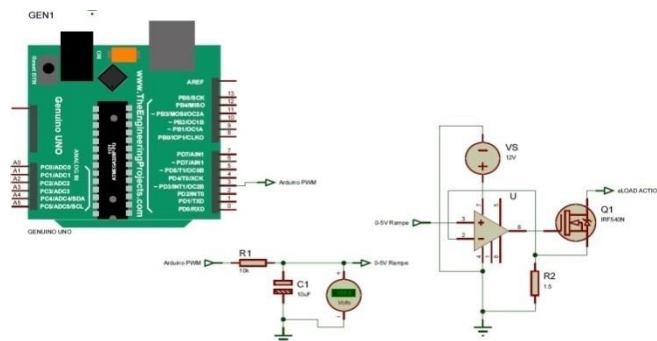


Figure III.5– Commande de la charge électronique via le port PWM de la carte ARDUINO

III.2.2.3 Transmission de données:

La voie série avec Arduino. Nous a servis d'envoyer puis recevoir des informations avec l'ordinateur comme dans la Figure 3.5

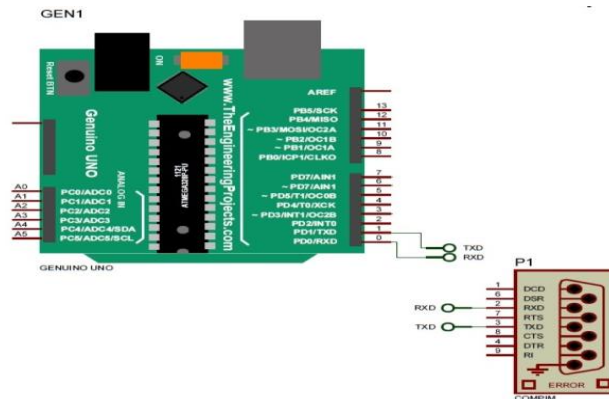


Figure III.6– Communication série pour transfert de données

Les données transférées par le port série seront par la suite traitées et affichées sur une interface graphique d'utilisateur que nous avons développés à l'aide du fameux logiciel de instruments virtuels LABVIEW.

La communication série servira aussi pour synchroniser le transfert de données et de Contrôler la commande de la charge électronique via l'interface LABVIEW.

III.2.3 La charge électronique :

Nous avons utilisé un montage simple d'une charge électronique DC piloter avec Arduino. Alors qu'est-ce qu'une charge électronique DC ou une e-Load ?, pour faire court, eh bien une charge e-Load est comme l'opposé d'une alimentation. Comme cité précédemment, nous avons utilisée le port PWM de la carte Arduino et le faire passer par un filtre RC pour avoir une rampe de tension de 0 à 5V (Nous avons conçu en quelque sorte une conversion numérique-analogique DAC).

La Figure 3.6 montre le passage d'un signal PWM à une rampe de tension via un filtre RC.

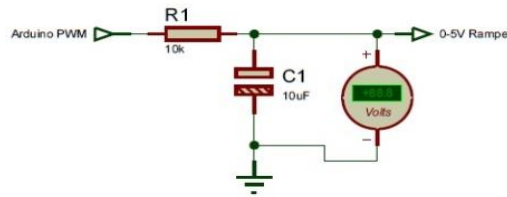


Figure III.7– Conversion PWM vers Rampe de tension de 0-5V

Nous avons utilisé un MOSFET IRF540N à enrichissement à canal N comme résistance variable contrôlée par la sortie DAC. Sur le principe, la valeur de la résistance variable serait déterminée par la tension sur la grille. La résistance entre le drain et la source diminue quand la tension entre la grille et la source augmente [35].

Les MOSFET sont des composants transconducteurs. C'est un mot un peu barbare pour dire que c'est la tension sur la grille qui va servir à réguler l'intensité du courant autorisé à circuler entre le drain et la source. Par ailleurs, comme la liaison drain-source est isolée de la grille (par une couche de verre d'une épaisseur microscopique), le courant consommé en régime continu sur cette dernière broche est négligeable. Ce qui permet d'envisager de piloter un MOSFET même avec des circuits électroniques capables de ne fournir qu'un courant de très faible intensité. Pour cette raison nous nous sommes servis d'un montage amplificateur non inverseur qui servira à amplifier la commande issue de la carte ARDUINO avant d'attaquer la grille du MOSFET utilisé.

La Figure 3.7 montre le montage de la charge électronique commandée.

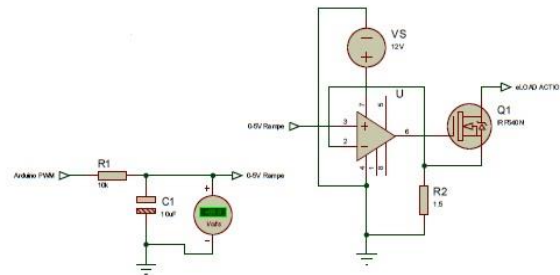


Figure III.8– Montage de la charge électronique commandée.

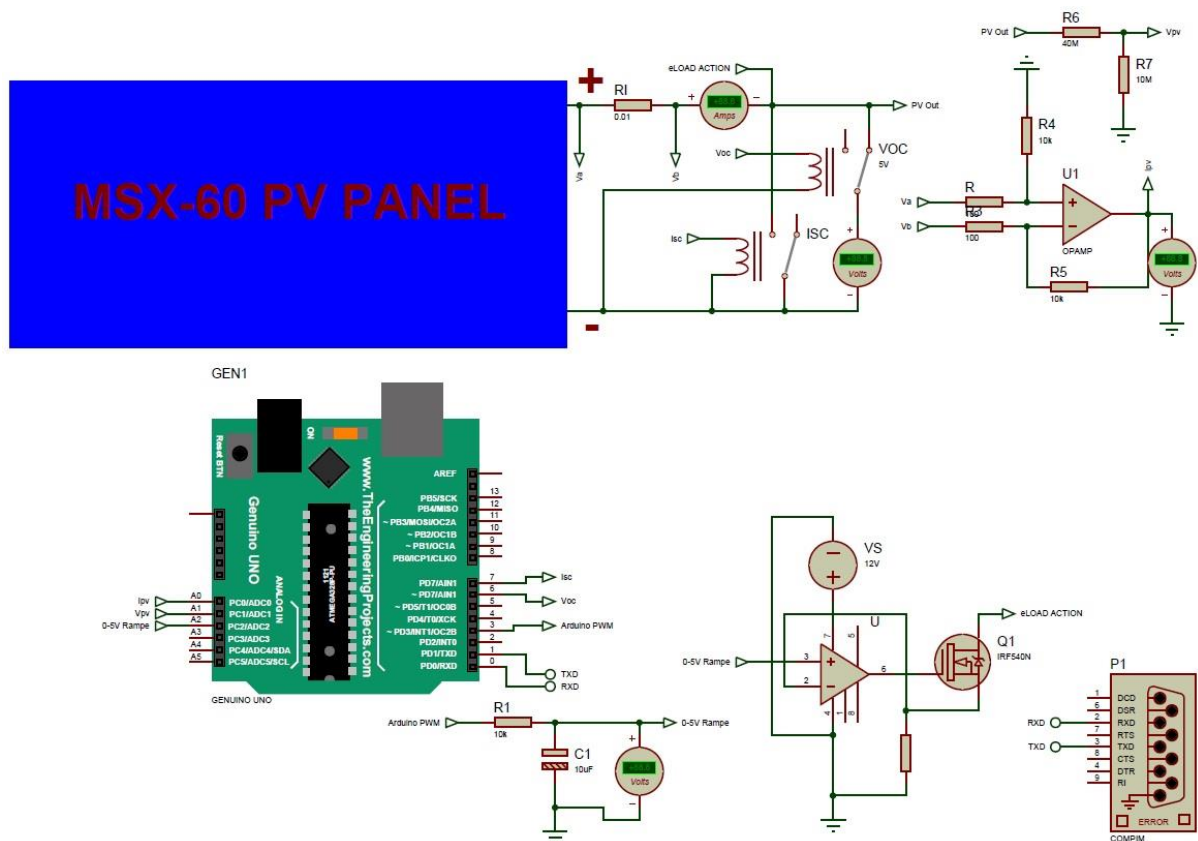


Figure III.9– le montage complet d'un mini caractériseur.

III.3 La partie Software

Nous avons développés à l'aide du Logiciel LABVIEW une interface utilisateur pour le pilotage du banc d'essai ainsi que pour illustrer les résultats obtenus. Elle est conçue de

manière interactive qui ne nécessite aucune connaissance du logiciel Labview par l'utilisateur.

A partir de cette interface, on peut visualiser la caractéristique I-V du GPV sous forme graphique et numérique.

La structure générale du programme suit schéma bloc de la figure 3.8.

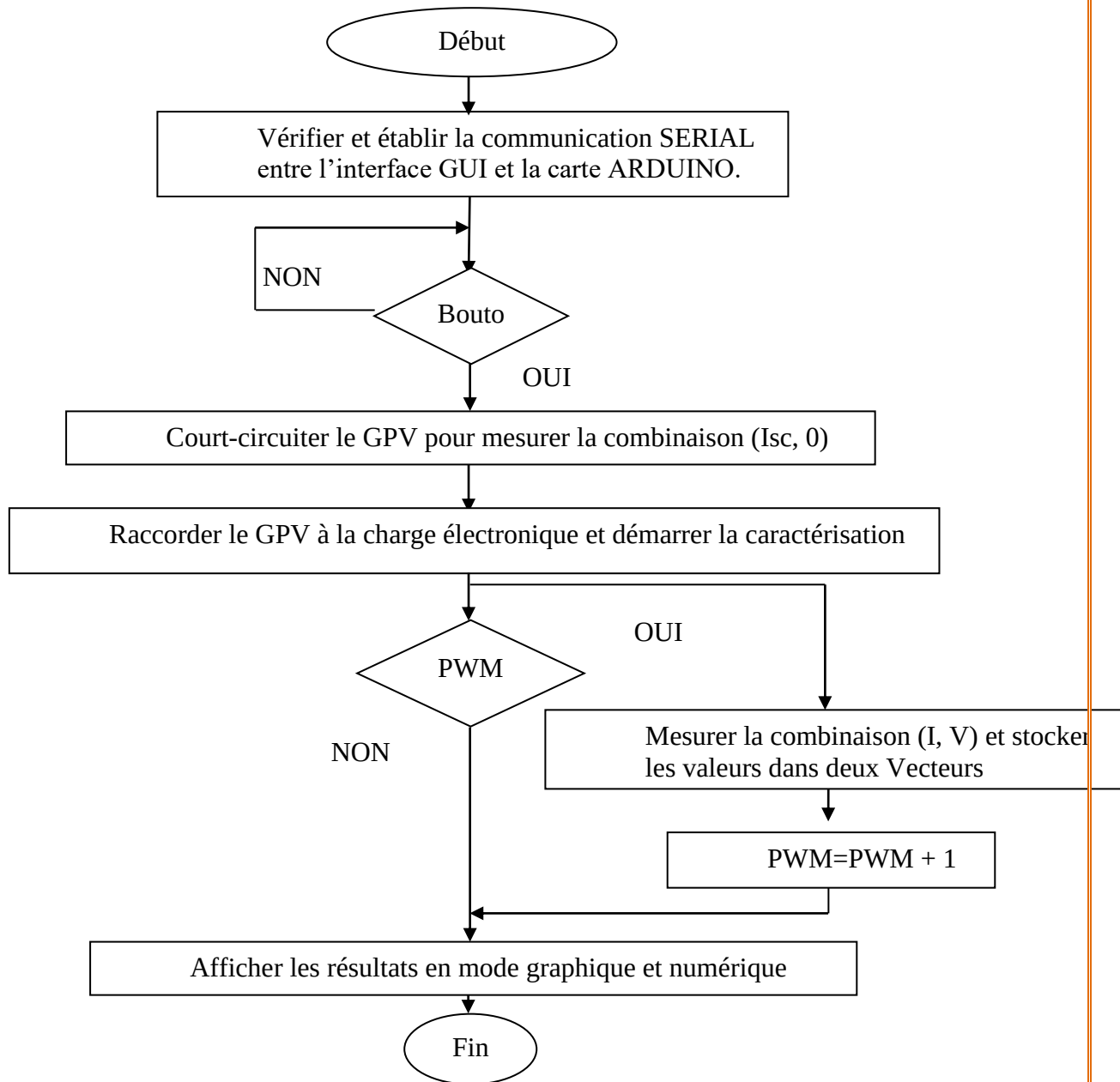


Figure III.10– Organigramme de l'interface GUI sous LABVIEW.

L'interface utilisateur finale (face avant) est montrée dans Figure 3.9 :

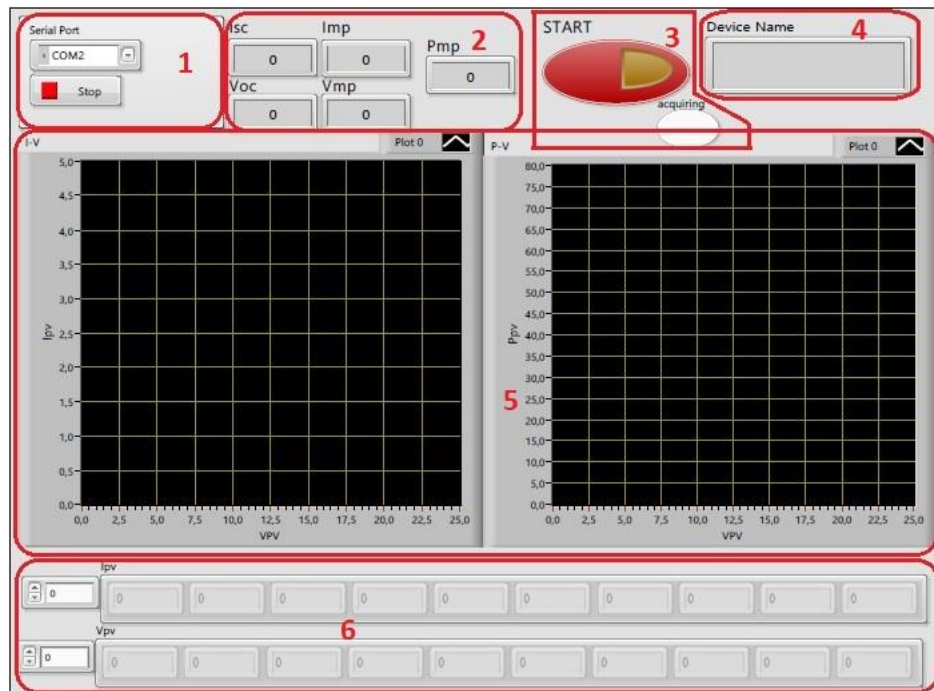


Figure III.11– Interface utilisateur de pilotage du banc d'essai.

III.3.1 La communication série

Cette partie comporte le port COM qui servira de la communication serie entre l'interface utilisateur et la partie Hardware représentée par la carte ARDUINO.

III.3.2 Le courant de court-circuit, la tension du circuit ouvert et le PPM

Ces indicateurs nous indiqueront les valeurs du courant de court-circuit, la tension du circuit ouvert ainsi que la combinaison (I, V) qui représente le point de puissance maximale.

III.3.3 Le bouton de démarrage de la caractérisation et l'indicateur de l'opération

Nous avons introduit un bouton START qui servira de démarrer l'opération de caractérisation avec un voyant qui restera allumé durant cette opération 'Acquiring'.

III.3.4 Le nom du dispositif connecté a l'interface

Lors de l'établissement de la communication entre le banc d'essai et l'interface, cette dernière peut identifier de quel dispositif s'agit-t il. Dans notre cas, il s'agit d'une carte ARDUINO UNO.

III.3.5 Affichage graphique de la caractéristique du GPV

Les deux scopes illustrent la caractéristique I(V) et P(V) du GPV en mode graphique.

III.3.6 Affichage numérique de la caractéristique du GPV

Les deux vecteurs illustrent la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ du GPV en mode numérique.

III.4 La liaison entre LABVIEW et ISIS-PROTEUS

En utilisant l'application VSPD (Virtual Serial Port Driver) nous avons pu créer une paire de ports COM virtuels qui assurera par la suite la communication entre l'interface LABVIEW et le banc d'essai développé sur ISIS-PROTEUS tel montre la Figure 3.10

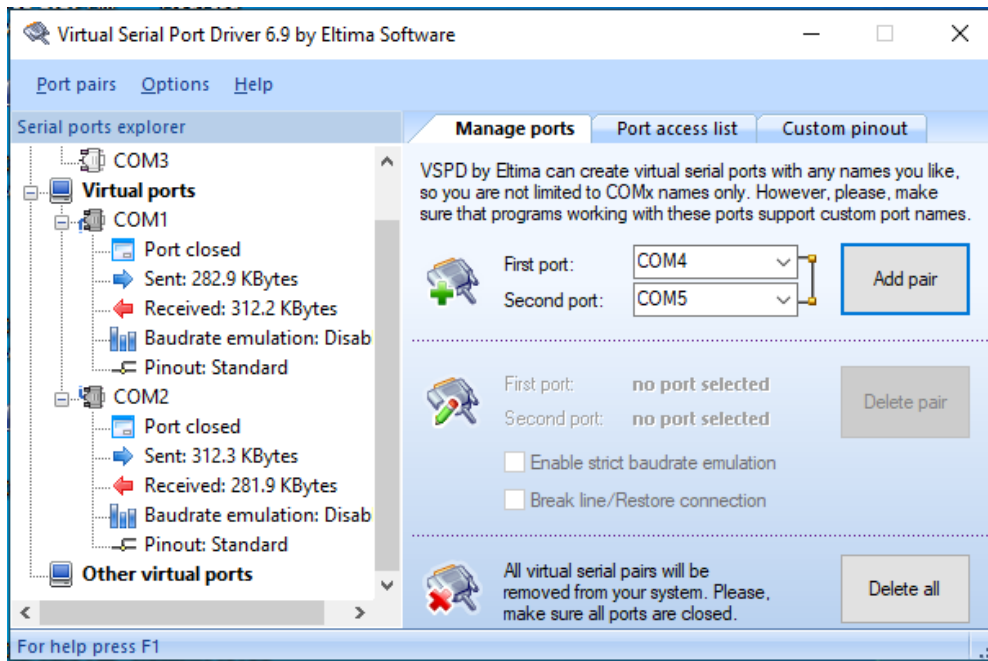


Figure III.12– Création de la paire COM port avec VSPD.

III.5 Conclusion

Nous avons présentés dans cette partie, le principe de base de la technique utilisée et développés un banc d'essai pour simulation à l'aide du logiciel ISIS-PROTEUS. Nous avons par la suite développés une interface de traitement, d'analyse et d'affichage de la caractéristiques I-V sous LABVIEW et qui fera objet d'un pilote du banc d'essai.

Ce qui suit, nous allons présentés des résultats de test et validation de notre banc d'essai.

Chapitre IV. Titre du chapitre 4 ...

Chapitre IV. Test et validation

IV.1 Introduction

Nous présentons dans ce dernier chapitre les résultats de test par la simulation pour validation du banc d'essai.

Nous avons utilisé un modèle de simulation sous ISIS-Proteus du générateur PV (MSX60) qui est en silicium monocristallin est constitué de 36 cellules photovoltaïques élémentaires. Il peut délivrer dans les conditions standards de test (CST) une puissance de 60 W, un courant de 3.5A sous une tension optimale de 17.1V.

IV.2 Test et validation

IV.2.1 Test sous STC (1000 W/m²) et 25°C

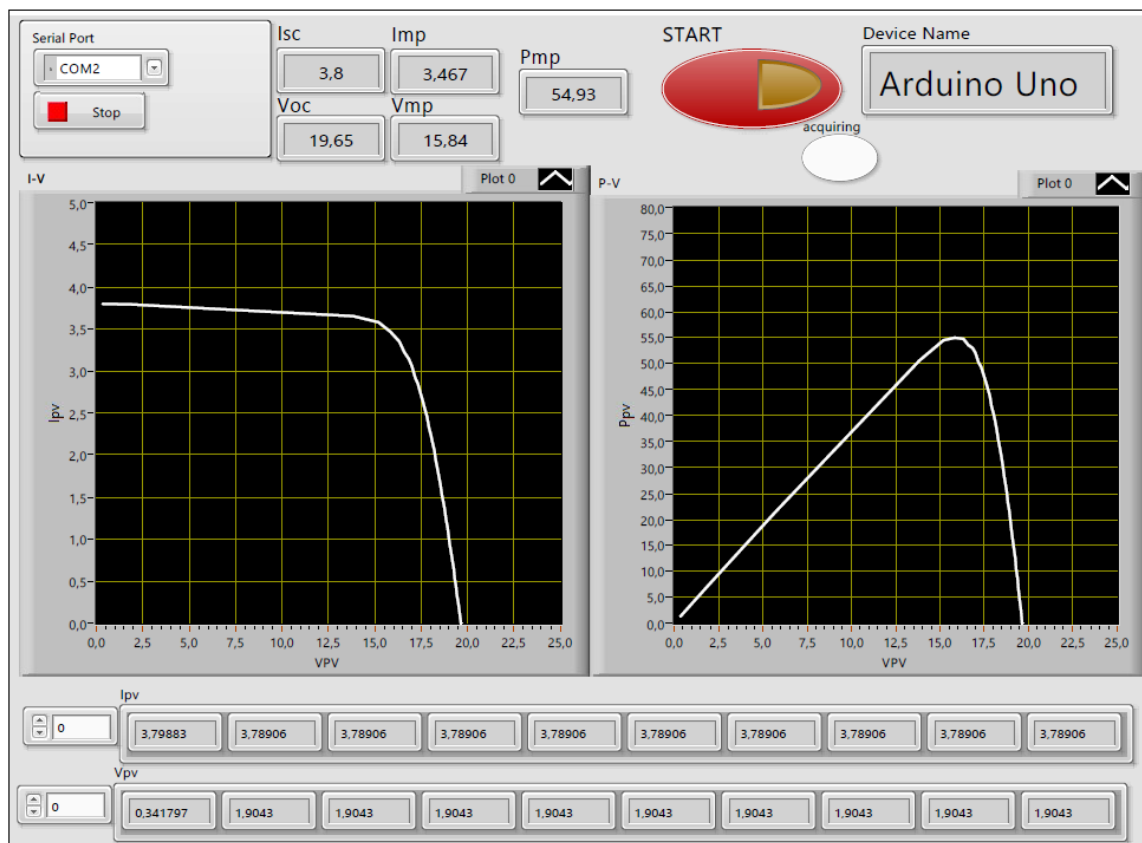


Figure IV.1–Test sous STC (1000 W/m²) et 25°C.

IV.2.2 Test sous (800 W/m²) et 25°C

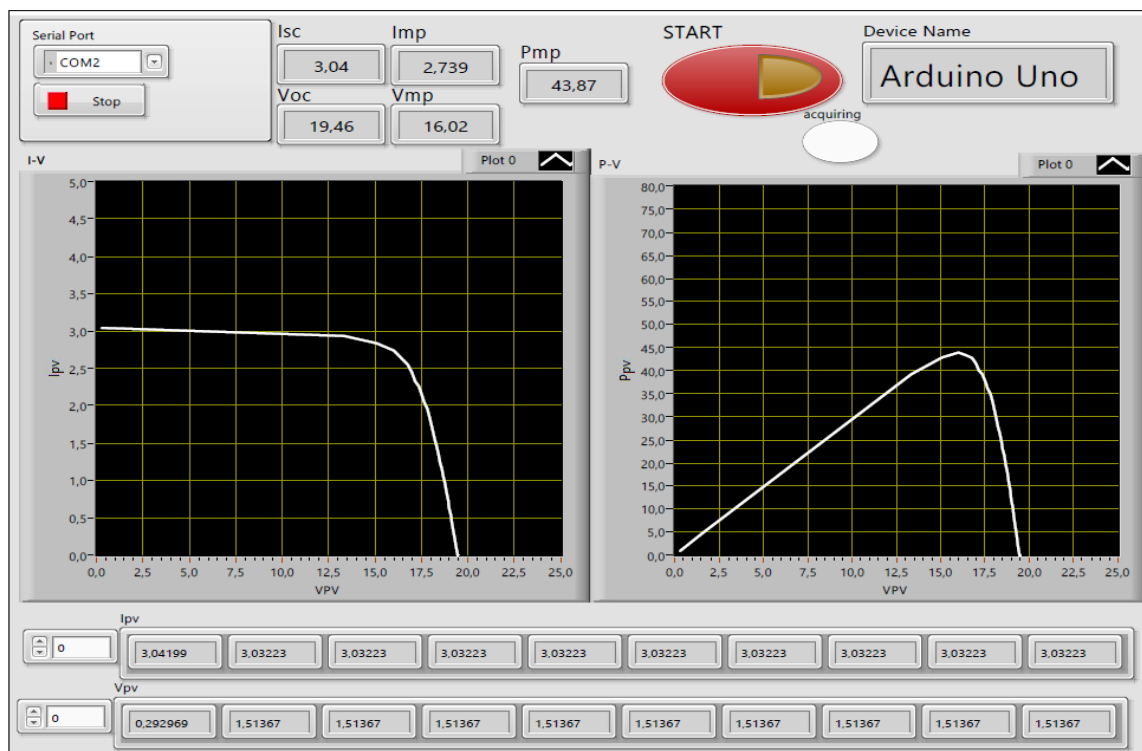


Figure IV.2–Test sous (800 W/m²) et 25°C.

IV.2.3 Test sous (600 W/m²) et 25°C

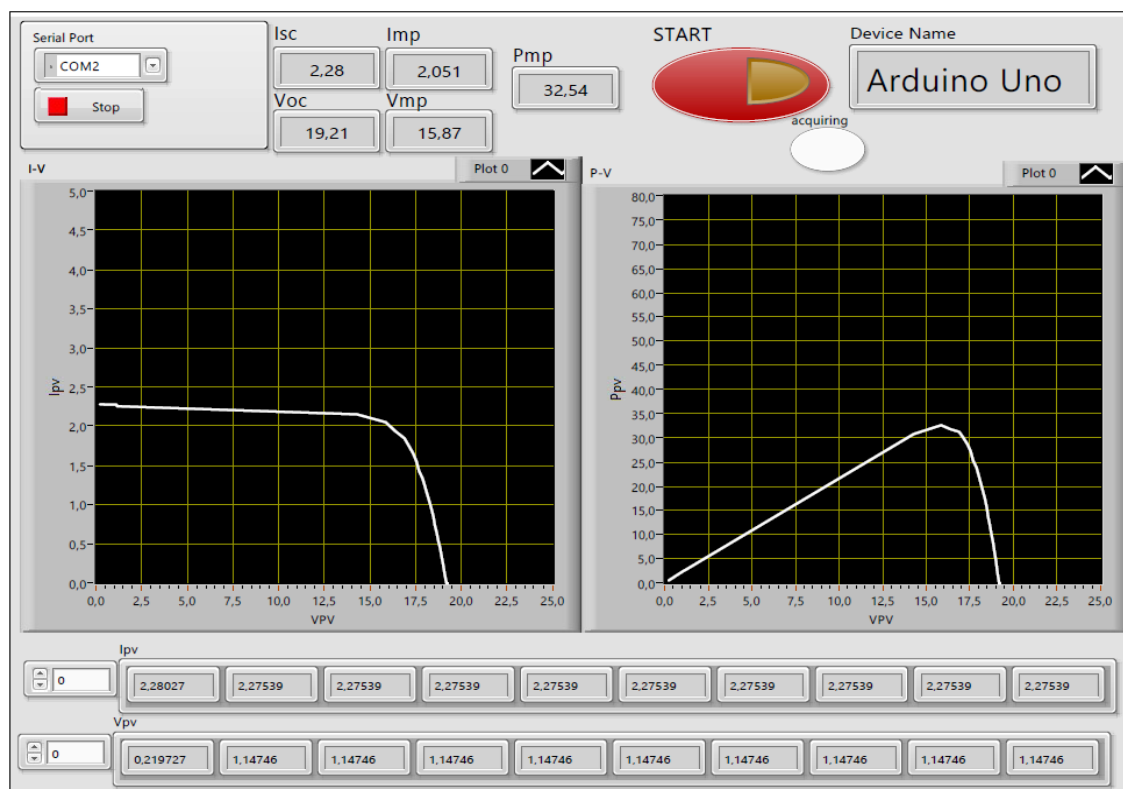


Figure IV.3–Test sous (600 W/m²) et 25°C.

IV.2.4 Test sous (400 W/m²) et 25°C

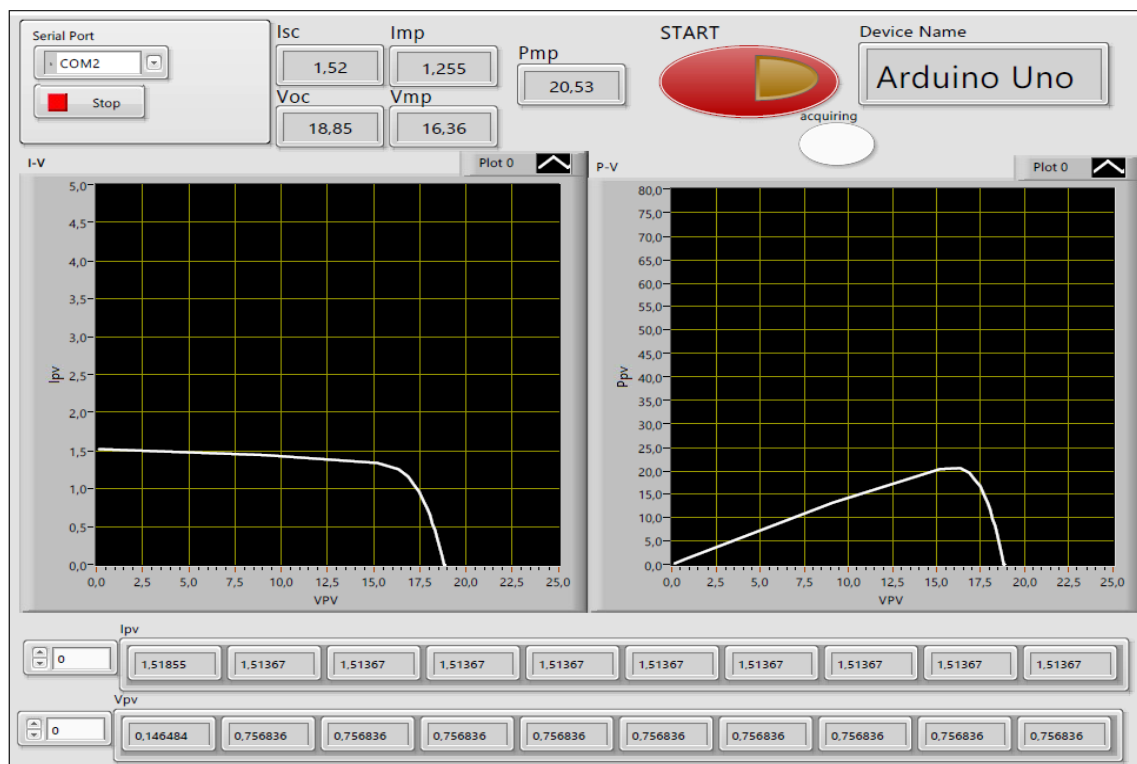


Figure IV.4–Test sous (400 W/m²) et 25°C.

IV.2.5 Test sous (1000 W/m²) et 20°C

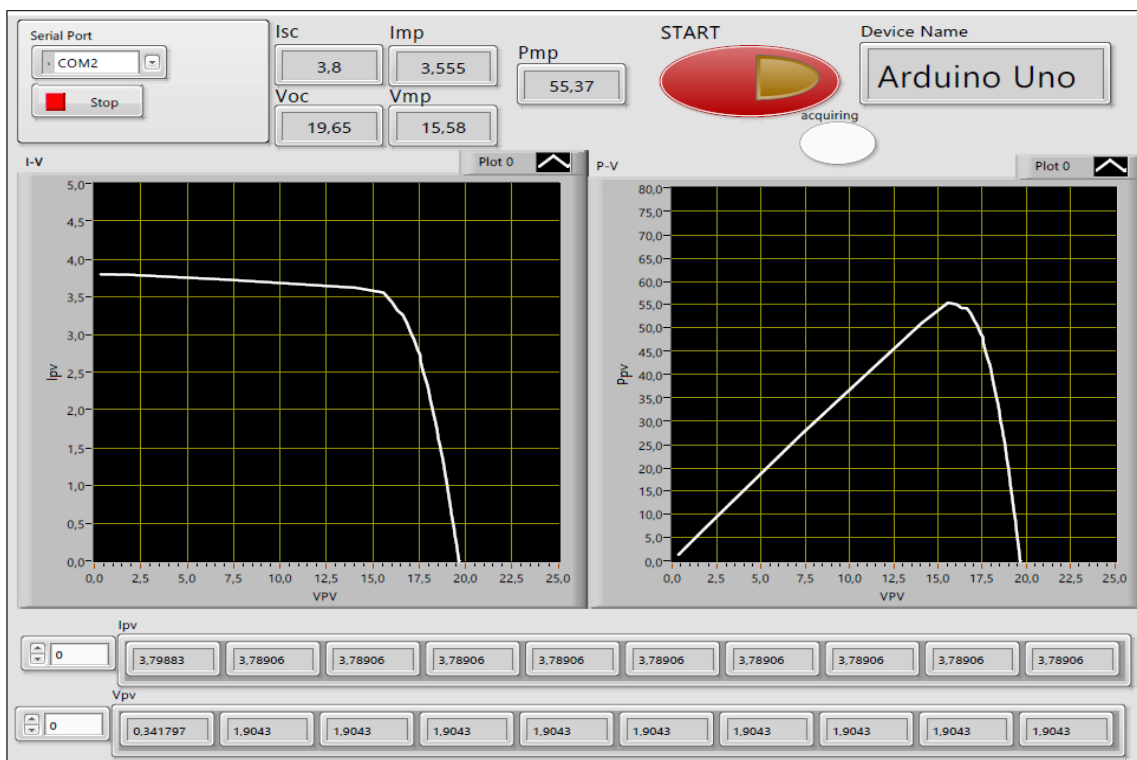


Figure IV.5–Test sous (1000 W/m²) et 20°C.

IV.2.6 Test sous (1000 W/m²) et 30°C

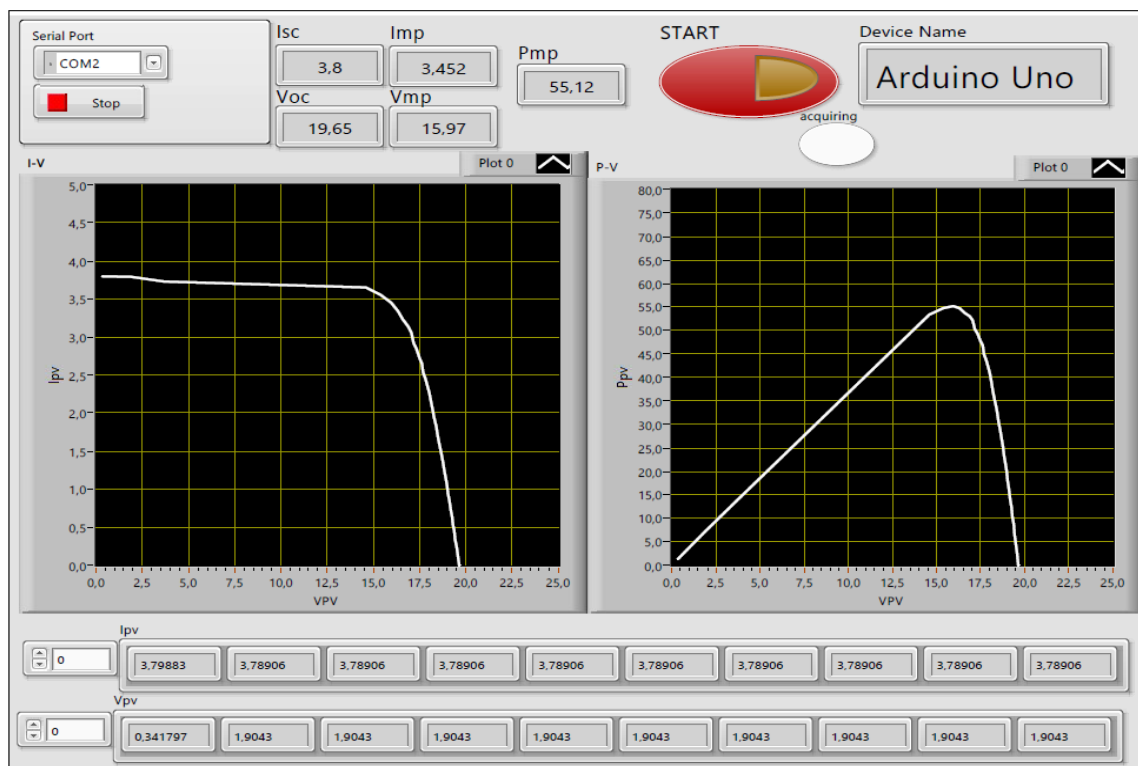


Figure IV.6–Test sous (1000 W/m²) et 30°C.

IV.2.7 Test sous (1000 W/m²) et 40°C

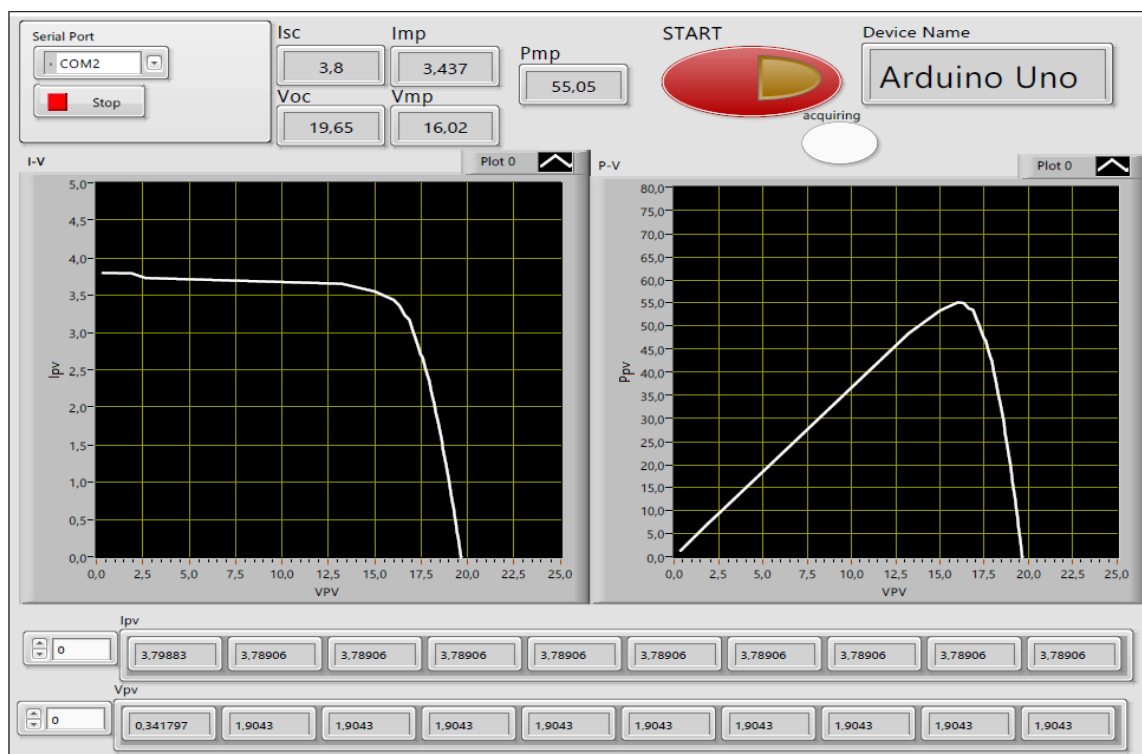


Figure IV.7–Test sous (1000 W/m²) et 40°C.

IV.3 Conclusion

Dans ce chapitre on peut conclure que le changement de l'éclairement effectue proportionnellement sur les caractéristiques de module photovoltaïque qu'il est proportionnel avec les caractéristiques, mais la variation de la température en les conditions STC de l'éclairement ne change pas les caractéristiques de module photovoltaïque

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire concerne une application des plus actuelles des énergies renouvelables, celle de l'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque. Une meilleure rentabilité de ce système à énergies renouvelables implique forcément un meilleur conditionnement, donc adaptation. Avant d'aborder la problématique de conversion, nous avons tout d'abord étudié le contexte et la problématique de l'énergie solaire photovoltaïque. Ceci s'avérer nécessaire pour acquérir une connaissance approfondie du comportement d'un générateur photovoltaïque.

Nous avons établi des programmes de calculs sous l'environnement ISIS-Proteus permettant de tracer la caractéristique I-V pour différents éclairagements et températures solaires.

Dans ce mémoire représente une étude et une conception d'un mini-caractériser pour un module photovoltaïque que :

- dans le premier chapitre, nous avons présenté le phénomène de la conversion photovoltaïque et sa composante élémentaire et on indiqués l'effet des conditions climatiques sur une cellule PV.
- dans le deuxième chapitre, on a présenté un état de l'art sur l'aspect théorique des méthodes les plus utilisées dans la caractérisation de module PV.
- dans le troisième chapitre, nous avons présenté le principe de base de la technique utilisée et développés un banc d'essai pour simulation a l'aide du logiciel ISIS-Proteus .
- pour le dernier chapitre, on a présenté des résultats de test et validation de notre banc d'essai.

nous pouvons conclure que l'effet de le l'éclairement et proportionnel avec les caractéristiques I-V de module photovoltaïque.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Bensaci Wafa Diplôme de master 2011/2012
- [2] Photovoltaics Reports, Fraunhofer ISE, novembre 2016
- [3] Ibid.
- [4] Electricité solaire photovoltaïque, CNRS
- [5] « New world record for solar cell efficiency at 46% », Fraunhofer ISE
- [6] Organic Photovoltaics Research, Energy.gov
- [7] Centre thermique de Lyon (CETHIL), LMSC — LEEVAM université de Cergy, Laboratoire d'optimisation de la conception et ingénierie de l'environnement (LOCIE), Centre d'énergétique (CENERG), Laboratoire systèmes physiques de l'environnement (SPE), université de Corse.
- [8] Temps de retour énergétique d'une cellule photovoltaïque
- [9] Stéphane Petibon "Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques" ; Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse (2009).
- [10] K.G. Deepa, R. Jayakrishnan, K.P. Vi-Jayakumar, C.S. Kartha, V. Ganesan, Sol. Energy 83, 964-968 (2009).
- [11] K.R. Murali, C. Vinothini, K. Srinivasan, Mater. Sci. Semic. Proc. 15, 194-198 (2012).
- [12] A. Antony, "Preparation and characterisation of certain II-VI, I-III-VI semiconductor thin films and transparent conducting oxides", Thèse Doct., Cochin Univ. of Science and Technology, India p. 17 (2004).
- [13] S. Petibon, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, Janvier 2009.
- [14] R. Jimmy et al., Le pompage photovoltaïque, Édition Multi mondes, 1999.
- [15] B. Flèche & D. Delagnes, Energie solaire photovoltaïque, juin 2007.
- [16] S. Masoum et al., Microprocessor-controlled new class of optimal battery chargers for photovoltaic application, Vol. 19, September 2004.
- [17] A. Oi, Design and simulation of photovoltaïque water pumping système, Thèse de Magister de l'université California, USA, Septembre 2005. [5] A. Fortin, Analyse numérique pour ingénieurs, 2eme édition, Presses internationales polytechnique, 1996.
- [18] S. M. Ait-Cheikh, « Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques », Thèse de Doctorat d'état, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2007.
- [19] M. Adouane, « Etude et conception d'une stratégie de commande d'un onduleur connecté au réseau électrique », Mémoire de magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.
- [20] A. Cid Pastor, "conception et réalisation de modules photovoltaïques électrique", thèse de doctorat, institut national des sciences appliquées, Toulouse, 2006.
- [21] Weidog .Xiao, A novel modeling method for photovoltaic cells, 35th annual IEEE Power Electronics Specialists conference, Aachen, Germany 2004, pp 1950-1956.

- [22] Weiner.D An optimal design of a photovoltaic D.C motor coupled water pumping system. IEEE, conférence, 1990, pp 268-274.
- [23] A.Q. Malik, S.J. Bin Haji Damit, "Outdoor testing of single crystal silicon solar cells ", Renewable Energy, 28, 2003, pp. 1433-1445
- [24] M.M. Mahmoud, "Transient analysis of a PV power generator charging a capacitor for measurement of the I-V characteristics ", Renewable Energy, 31, 2006, pp. 2198-2206
- [25] E.E. Van Dyk, A.R. Gxasheka, E.L. Meyer, "Monitoring current-voltage characteristics of photovoltaic modules", IEEE PVSC, 2002, pp. 1516-1519.
- [26] E.E. Van Dyk, A.R. Gxasheka, E.L. Meyer, "Monitoring current-voltage characteristics and energy output of silicon photovoltaic modules", Renewable Energy, 30, 2005, pp. 399-411
- [27] F. Recart, H. Mäckel, et al., "Simple data acquisition of the current-voltage and illumination-voltage curves of solar cells ", IEEE WCPEC, 2006, pp. 1215-1218.
- [28] J. Muñoz, E. Lorenzo, "Capacitive load based on IGBTs for on-site characterization of PV arrays ", Solar Energy, 80, 2006, pp. 1489-1497.
- [29] Y. Kuai, S. Yuvarajan, "An electronic load for testing photovoltaic panels", Journal of Power Sources, 154, 2006, pp. 308-313.
- [30] N. Forero, J. Hernández, G. Gordillo, "Development of a monitoring system for a PV solar plant", Energy Conversion & Management, 47, 2006, pp. 2329-2336.
- [31] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Proteus_\(%C3%A9lectronique\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Proteus_(%C3%A9lectronique)).
- [32] Francis Cottet, Labview, Programmation et Application. Dunod (2001).
- [33] Nicolas POUSSET, Cours d'initiation au logiciel Labview. Site de National Instrument (www.ni.com).
- [34] http://www.chicoree.fr/w/Les_MOSFET

