

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE Technologie
DEPARTEMENT Electronique
N° :



FILIÈRE : Electronique
OPTION : Electronique des
systèmes embarqués

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par :

DILMI IMENE et DILMI SOUAAD

THÈME

Conception d'un outil de diagnostic pour
installation photovoltaïque

Soutenu devant le jury composé de :

Mr. Drif Mahmoud	Université M ^{ed} Boudiaf –M'sila	Président
Mr. Benhamadouche Abdelouahab	Université M ^{ed} Boudiaf –M'sila	Rapporteur
Mr. Bouchelaghem Ahmed	Université M ^{ed} Boudiaf –M'sila	Examineur

Année universitaire : 2021 /2022

ملخص:

يتم إعادة تجميع الأنظمة الكهروضوئية كبديل مهم بين مصادر الطاقة المتجددة التي ستؤمن توافر الطاقة في المستقبل. يمكن استخلاص خصائص أي وحدة كهروضوئية من منحى التيار والجهد الخاص بها. نظرًا لأن المنحنى المميز للوحدة يتأثر بشكل أساسي بالظروف الطبيعية مثل مستوى الإشعاع الشمسي ودرجة حرارة سطح الوحدة، فيجب قياسه بأسرع ما يمكن وبدقة مقبولة في ظروف التشغيل المختلفة. يقدم هذا البحث تطبيقًا لدائرة قياس تيار - جهد بسيطة ودقيقة لأنواع مختلفة من الوحدات الكهروضوئية بناءً على الحمل الإلكتروني. استخدمت الدائرة المقترحة ترانزستور MOSFET مدفوعًا بإشارة تحكم لدفع بوابتها لتتبع منحى التيار والجهد للوحدة الكهروضوئية. إشارة التحكم الناتجة عن الإخراج التناظري لنظام نقل البيانات وتكتسح الفولتية - مصدر البوابة في MOSFET لمسح الفولتية للوحدة من الدائرة المفتوحة إلى قيم الدائرة القصيرة. البيانات المقاسة مثل الإشعاع الشمسي ودرجة حرارة الوحدة والتيار والوحدة والجهد القياسي المأخوذ عبر نظام الحصول على البيانات. أظهرت النتائج مزايا الدائرة المقترحة من حيث الدقة والبساطة والموثوقية.

Abstract :

Photovoltaic systems are recongnized as an important alternative among the renewable Energy sources. That Will séure the availability of Energy in the future. The caractéristiques of any photovoltaic module can be drawn frome its current – voltage curve. Since the module caractéristique curve Is mainly affected by Natural conditions such as Solar radiation level and module surface température, It must Be measured as fast as possible with acceptable accuracy at diffèrent operating conditions. The présent Paper presents an implémentation of a simple and accu rate curent - voltage measuring circuit for various types of photovoltaic modules based on an electronic load. The proposed circuit used a MOSFET transistor driven by a control signal to drive its gate to track the photovoltaic module curent – voltage curve. The control signal Is generated by the analoge output of the data acquisition system and sweeps the gâte – source voltages of the MOSFET to scan the module voltages frome open circuit to short circuit values. The measured data as Solar radiation, module température, module curent and module voltage taken via a data acquisition system. The résulte showed the advantages of the proposed circuit in terme of accuracy, simplicity and reliability

Résumé :

Les systèmes photovoltaïques sont reconnus comme une alternative importante parmi les sources d'énergie renouvelables qui assureront la disponibilité de l'énergie dans le futur. Les caractéristiques de tout module photovoltaïque peuvent être tirées de sa courbe courant – tension. Étant donné que la courbe caractéristique du module est principalement affectée par les conditions naturelles telles que le niveau de rayonnement solaire et la température de surface du module, elle doit être mesurée aussi rapidement que possible avec une précision acceptable dans différentes conditions de fonctionnement. Le présent article présente une implémentation d'un circuit de mesure de courant - tension simple et précis pour différents types de modules photovoltaïques basé sur une charge électronique. Le circuit proposé utilisait un transistor MOSFET piloté par un signal de commande pour piloter sa grille afin de suivre la courbe courant-tension du module photovoltaïque. Le signal de commande est généré par la sortie analogique du système d'acquisition de données et balaie les tensions porte-source du MOSFET pour balayer les tensions du module du circuit ouvert aux valeurs de court-circuit. Les données mesurées telles que le rayonnement solaire, la température du module, le courant du module et la tension du module sont prises via un système d'acquisition de données. Les résultats ont montré les avantages du circuit proposé en termes de précision, de simplicité et de fiabilité.

Remerciement

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

Je voudrais exprimer ma profonde reconnaissance et mes sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'avancement de mes travaux de recherche.

Tout d'abord je voudrais remercier profondément mon encadreur de recherche, Mr. Benhamadouche Abdelouahab, pour avoir accepté de diriger mes travaux et pour m'avoir guidé tout au long du mémoire pour ses conseils, ses critiques et son attitude exemplaire tout au long de la réalisation de ce travail de recherche.

De plus, je voudrais exprimer mes vifs remerciements aux membres du jury pour avoir accepté d'examiner et corriger ce mémoire.

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

Dédicaces (1)

Je voudrais dédie cet humble travail À :

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

Mes chères frères & Ma sœur ET Mon grand-père

Mon binôme et ma meilleur amie «souaad» Tout mes amis Et à toute la famille

« D I L M I »

« J M E N E »

Dédicaces (2)

Je dédie cet modeste travail à :

Mes parents

Mes chères frères et mes sœurs

mon binôme et meilleur amie «JME NE» Tout mes amis et mes collègues Et à

toute la famille « D I L M I »

« SOUAAD »

Table des matières

Remerciement	
Dédicaces	
Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale	1

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

1.	Introduction	2
2.	Energie solaire photovoltaïque	2
3.	Principe de la conversion photovoltaïque	3
4.	Les installations photovoltaïques	4
4.1.	Système autonome sans batterie	4
4.2.	Système autonome avec batterie	4
4.3.	Système fonctionnant au fil du soleil	5
4.4.	Système avec appoint électrique	5
4.5.	Les installations sur site isolé	5
4.6.	Les installations raccordées au réseau de distribution public	6
5.	Description d'un générateur PV (GPV)	7
5.1.	Cellule photovoltaïque	7
5.2.	Technologie des capteurs photovoltaïques	8
5.3.	Module solaire ou photovoltaïque	9
5.4.	Constitution d'un champ photovoltaïque	12
6.	Caractéristique électrique I-V et P-V	12
6.1.	Le courant de court-circuit « I_{cc} »	13
6.2.	La tension en circuit ouvert « V_{co} »	13
7.	Problèmes existants dans un générateur PV	15
8.	Conclusion	16

Chapitre II : diagnostic dans les installations PV

1.	Introduction	17
2.	Caractérisation des GPV	17
3.	Les différentes méthodes de diagnostic des GPV	18
A.	Résistance variable	18
B.	charge capacitive	19
C.	charge électronique	20
D.	Amplificateur de puissance bipolaire.	21
E.	Alimentation électrique à quatre quadrants.	22

4.	Comparaison.	27
	A. La flexibilité	27
	B. Modularité	27
	C. Fidélité	27
	D. Réponse rapide.	28
	E. Affichage direct.	28
	F. Coût.	28
	4.2. Résultat	28
5.	Conclusion	29

Chapitre III : Conception d'un outil de caractérisation pour GPV

1.	Introduction	31
2.	Description du système	31
	2.1 Fonctions exécutées par le système	32
3.	Charge électronique pour la caractérisation d'un GPV	33
	3.1 Principe de fonctionnement d'une charge électronique	35
	3.2 Eléments de commande	35
	3.3 Conversion numérique analogique (CAN)	36
4.	Simulation avec le logiciel Simulink/Matlab	37
5.	Choix du MOSFET	38
	5.1 MOSFET N°1 IRFZ44	38
	5.2 MOSFET N°2 IRF520	39
	5.3 MOSFET N°3 IRF840	40
	5.4 MOSFET N°4 SUD40N06	41
	5.5 MOSFET N°5 STB10N65K3	42
6.	Récapitulatifs	43
7.	Conclusion	44

Chapitre IV : Eléments de réalisation pour le système de caractérisation de GPV

1.	Introduction	45
2.	Structure détaillée du système	45
3.	Description du système	46
	3.1. MOSFET (SUD40N06)	46
	3.2. Convertisseur numérique analogique DAC0808	46
	3.3. Amplificateur AOP 741	46
	3.4. Alimentation	46
	3.5. Mesure du courant et de la tension	46
	3.5.1. Capteur de courant	46
	3.5.2. Mesure de la tension	47
	3.6. Mesure de la température	47
	3.6.1. Sonde à thermocouple	48
	3.6.2. Capteur de température	48
	3.7. Meure de l'éclairément	49
	3.7.1. Capture de lumière photodiode	49
4.	Traitement de données	50

4.1.	Présentation de l'Arduino Nano	50
4.2.	Caractéristiques techniques générales de l'Arduino Nano	52
5.	Simulation Proteus ISIS	52
5.1.	Schéma du système électronique	52
5.2.	Simulation	53
5.3.	Algorithme	53
6.	Conclusion	55
	Conclusion générale	56

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

L'augmentation du coût des énergies classiques d'une part, et la limitation de leurs ressources d'autre part, font que l'énergie photovoltaïque devient de plus en plus une solution parmi les options énergétiques prometteuses, avec des avantages comme l'abondance, l'absence de toute pollution et la disponibilité en grandes quantités en tout point du globe terrestre. La conversion photovoltaïque permet d'obtenir de l'électricité de façon directe et autonome à l'aide d'un matériel fiable avec une durée de vie relativement élevée, en admettant une maintenance réduite.

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

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

Notre projet consiste à mettre en œuvre un système embarqué capable de prélever la caractéristique d'un module PV sans le débrancher de son installation, le système est basé sur une charge électronique à travers l'utilisation d'un MOSFET. Avec une commande adéquate la charge électronique permet de balayer toute la caractéristique d'un GPV dans un temps réduit avec une fiabilité optimale. Pour ce faire, notre travail est organisé en quatre chapitres comme suit :

Le premier chapitre est dédié à la description des systèmes photovoltaïques, quelques notions sur les panneaux solaires, leurs principes de fonctionnement et leur caractéristique électrique (I-V) et (P-V), ainsi que l'influence des différents paramètres de l'environnement sur ces caractéristiques.

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

Dans le troisième chapitre, nous présenterons le système électronique qui permet la caractérisation avec une charge électronique. Nous présenterons l'essentiel du système ainsi que des simulations sous MATLAB/Simulink qui permettent d'établir le MOSFET approprié pour balayer toute la courbe caractéristique du module PV choisi.

Le quatrième chapitre nous permettra de présenter la partie technique du système à concevoir, nous validons nos choix technologiques à travers des simulations avec le logiciel ISIS/Proteus.

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

CHAPITRE

01

1. Introduction

Aujourd'hui, On distingue plusieurs types de sources d'énergies renouvelables : l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque. Excepté l'énergie géothermique qui provient de la chaleur des profondeurs de la terre, ces sources d'énergie proviennent directement ou indirectement du soleil. Elles sont donc disponibles indéfiniment tant que celui-ci brillera. L'énergie photovoltaïque est la plus jeune des énergies renouvelables, elle a l'avantage d'être non polluante, souple et fiable [1].

Dans ce chapitre, nous présentons des généralités sur la conversion photovoltaïque à savoir : les différents types de matériaux de fabrication des cellules et les influence des conditions atmosphériques, éléments du rayonnement solaire et le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

2. Energie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium ou recouverts d'une mince couche métallique. Ces matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure. C'est l'effet photovoltaïque. L'énergie est apportée par les photons, qui heurtent les électrons et les libèrent, induisant un courant électrique. Ce courant continu de micro puissance calculé en watt crête (Wc) peut être transformé en courant alternatif grâce à un onduleur [2].

L'électricité produite est disponible sous forme d'électricité directe ou stockée en batteries (énergie électrique décentralisée) ou en électricité injectée dans le réseau.

Un générateur solaire photovoltaïque est composé de modules photovoltaïques eux même composés de cellules photovoltaïques connectées entre elles. Les performances d'une installation photovoltaïque dépendent de l'orientation des panneaux solaires et des zones d'ensoleillement dans lesquelles vous vous trouvez, ainsi que de l'état de l'installation et de son vieillissement.

3. Principe de la conversion photovoltaïque

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 et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule. La figure 1.1 illustre une cellule PV typique.

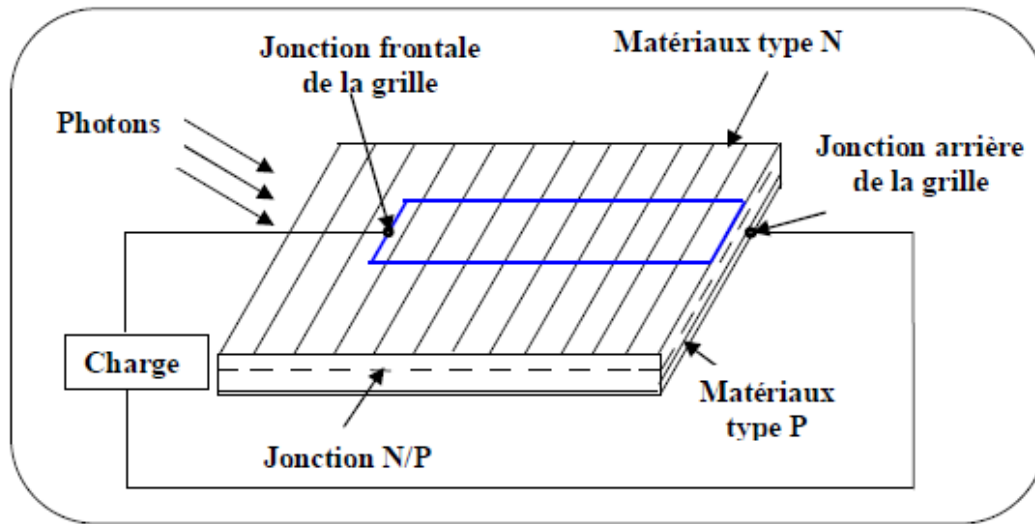


Fig 1.1 : Principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par cellule photovoltaïque [3]

Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au Bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore), créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par les semi-conducteurs, ils transmettent leurs énergies aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons (charges N) et des trous (charges P) créent alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connections des bornes positive et négative de la cellule.

La tension maximale de la cellule est d'environ 0.6 V pour un courant nul, cette tension est nommée tension de circuit ouvert V_{oc} . Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées ; il est appelé courant de court-circuit I_{cc} et dépend fortement du niveau d'éclairement.

4. Les installations photovoltaïques

Généralement une installation photovoltaïque comprend les éléments suivants : [4], [5]

- Un générateur photovoltaïque.
- Un convertisseur statique continu / continu (DC/DC).
- Un convertisseur statique continu / alternatif (DC/AC).
- Un système de régulation et de stockage.
- Une source auxiliaire d'appoints.

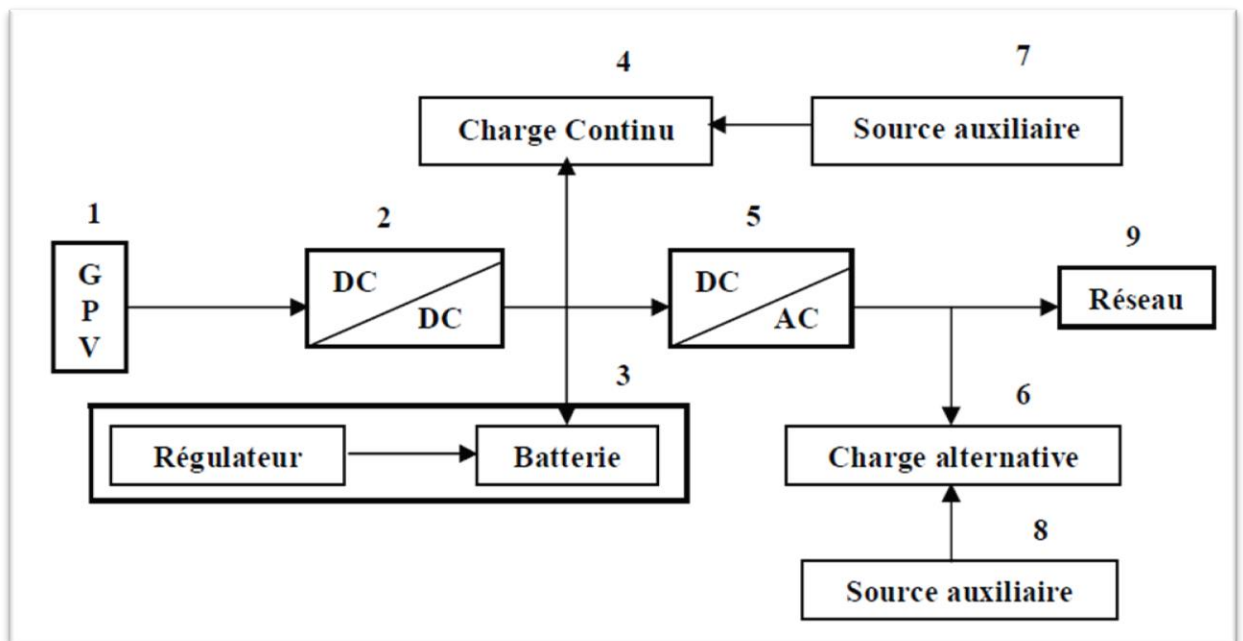


Fig 1.2 : Schéma synoptique d'une installation photovoltaïque

4.1. Système autonome sans batterie

Les systèmes photovoltaïques autonomes sans batterie sont représentés par les blocs (1) et (4) de la figure précédente. La charge de type continu est alimentée directement par le GPV, car la production d'énergie est suffisante pour le fonctionnement de la charge.

4.2. Système autonome avec batterie

Ces systèmes sont représentés par les blocs [(1), (3), (4)] dans le cas où la charge est de type continu et les blocs [(1), (3), (5), (6)] si la charge est de type alternatif. La batterie sert à stocker de l'énergie produite par le GPV, alors l'énergie peut être utilisée de tout temps, même en l'absence de rayonnement solaire.

4.3. Système fonctionnant au fil du soleil

Ces systèmes font intervenir des convertisseurs DC/DC qui permet de faire une adaptation entre le générateur et la charge continu [(1), (2), (4)]. Si la charge est de type alternatif, le convertisseur DC/AC est introduit [(1), (5), (6)].

4.4. Système avec appoint électrique

Pour ces systèmes on introduit des générateurs auxiliaires qui n'interviennent qu'en cas d'insuffisances d'énergie électriques (manque de rayonnement solaire ou batteries déchargées), ces générateurs peuvent être de type continu [(1),(2),(3),(4),(7)] et [(1),(2),(3),(4),(7),(9)] ; ou de type alternatif [(1),(2),(3),(5),(6),(8)] et [(1),(2),(3),(5),(6),(8),(9)]. Les sources auxiliaires peuvent être alimentées soit par le réseau soit par une autre source.

4.5. Les installations sur site isolé

Ce type de montage est adapté aux installations ne pouvant être raccordées au réseau. L'énergie produite doit être directement consommée et/ou stockée dans des accumulateurs pour permettre de répondre à la totalité des besoins. [6].

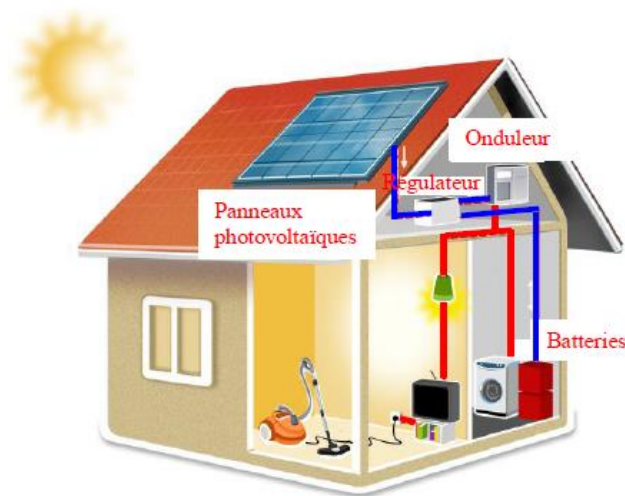


Fig 1.3 : Illustration d'une installation d'un système isolé

Les panneaux photovoltaïques produisent un courant électrique continu. Le régulateur optimise la charge et la décharge de la batterie suivant sa capacité et assure sa protection. L'onduleur transforme le courant continu en alternatif pour alimenter les récepteurs AC. Les batteries sont chargées de jour pour pouvoir alimenter la nuit ou les jours de mauvais temps. Des récepteurs DC spécifiques sont utilisables. Ces appareils sont particulièrement économes.

4.6. Les installations raccordées au réseau de distribution public

4.6.1 Solution avec injection totale

Toute l'énergie électrique produite par les capteurs photovoltaïques est envoyée pour être revendue sur le réseau de distribution.

Cette solution est réalisée avec le raccordement au réseau public en deux points :

- Le raccordement du consommateur qui reste identique avec son compteur de consommation (on ne peut pas utiliser sa propre production),
- Le nouveau branchement permettant d'injecter l'intégralité de la production dans le réseau, dispose de deux compteurs :
 - L'un pour la production,
 - L'autre pour la non-consommation (permet de vérifier qu'aucun soutirage frauduleux n'est réalisé).

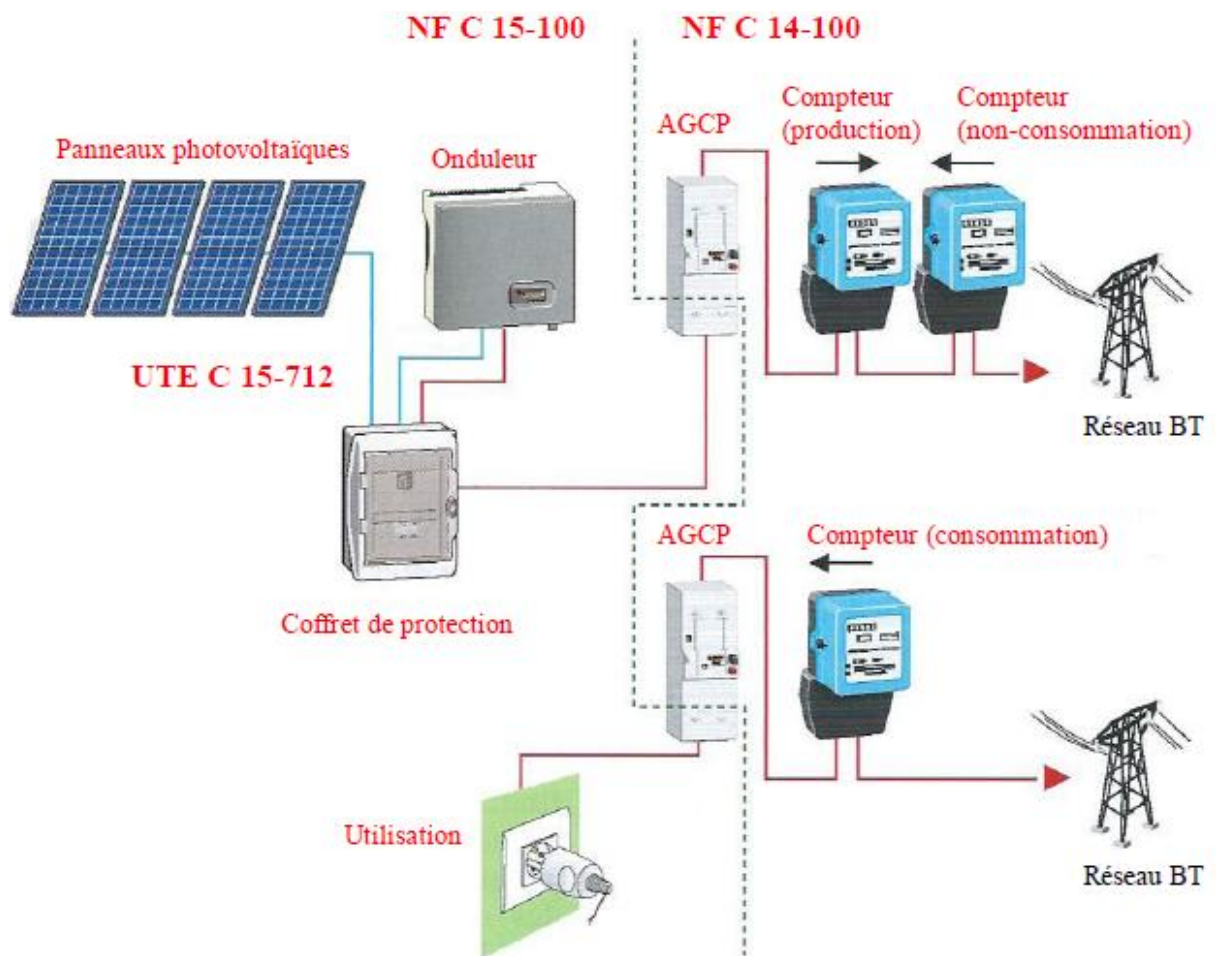


Fig 1.4 : En bleu : énergie électrique continue (DC). En rouge : énergie électrique alternative (AC).

4.6.2 Solution avec injection de surplus

Cette solution est réalisée avec le raccordement au réseau public en un point : l'utilisateur consomme l'énergie qu'il produit avec le système solaire et l'excédent est injecté dans le réseau. Quand la production photovoltaïque est insuffisante, le réseau fournit l'énergie nécessaire. Un seul compteur supplémentaire est ajouté au compteur existant.



Fig 1.5 : En bleu : énergie électrique continue (DC). En rouge : énergie électrique alternative (AC).

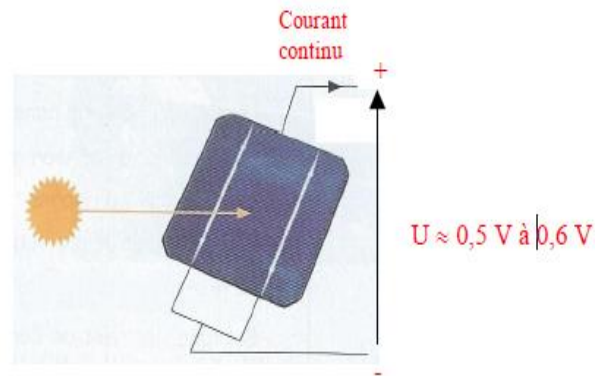
5. Description d'un générateur PV (GPV)

5.1. Cellule photovoltaïque

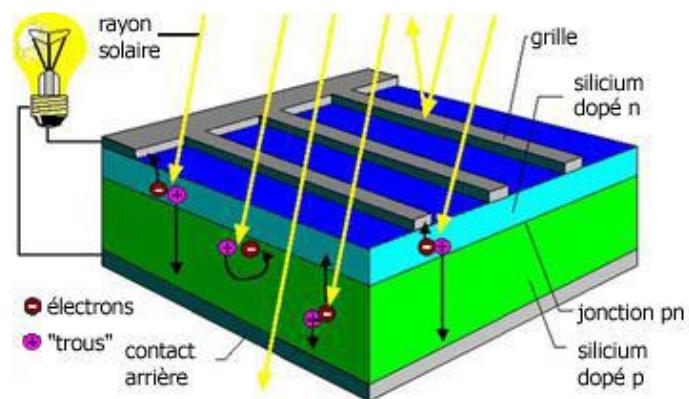
Grâce à l'utilisation de la technologie à semi-conducteurs, dans laquelle des cellules en silicium disponibles au-dessus du sol sont utilisées. De nombreux autres matériaux sont utilisés dans les cellules solaires, mais leur base est le silicium. En général, les matériaux de ces cellules sont soit un matériau cristallin épais tel que du silicium cristallin, soit un matériau amorphe fin tel que du silicium amorphe a-Si et du cadmium (tellure CdTe) ou (Copper Indium Diselenide CuInSe^2 , ou CIS), soit matériaux déposés sous forme de couches

Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques. Il doit être purifié afin d'obtenir un silicium de qualité. Il se présente alors sous la forme de barres de section ronde ou carrée appelée lingots. Les lingots sont ensuite découpés en wafers. Ils sont ensuite enrichis en éléments dopants pour obtenir un semi-

conducteur de type P ou N. Des rubans de métal sont ensuite incrustés en surface et raccordés à des contacts pour constituer des cellules photovoltaïques.



Fig(1.6)une cellule photovoltaïque



Fig(1.7) principe d'une cellule photovoltaïque

5.2. Technologie des capteurs photovoltaïques

Les cellules les plus utilisées pour la production d'électricité sont les cellules silicium polycristallin grâce à leur bon rapport qualité-prix. Les constructeurs garantissent une durée de vie de 20 à 25 ans à 80 % de la puissance nominale [6].

Tab 1.1 : Comparaison des trois principales technologies de capteurs

Technologie	Monocristallin	Polychristallin	Amorphe
Cellule et module			
Caractéristiques	<p>Très bon rendement : 14 à 20 %.</p> <p>Durée de vie : Importante (30 ans)</p> <p>Coût de fabrication : Élevé.</p> <p>Puissance : 100 à 150 Wc/m². 7 m²/kWc. Rendement faible sous un faible éclairement. Perte de rendement avec L'élévation de la température.</p> <p>Fabrication : élaborés à partir d'un bloc de silicium fondu qui s'est solidifié en formant un seul cristal</p> <p>Couleur bleue uniforme</p>	<p>Bon rendement : 11 à 15 %.</p> <p>Durée de vie : importante (30 ans)</p> <p>Coût de fabrication : meilleur marché que les panneaux monocristallins</p> <p>Puissance : 100 Wc/m². 8 m²/kWc.</p> <p>Rendement faible sous un faible éclairement. Perte de rendement avec l'élévation de la température.</p> <p>Fabrication : élaborés à partir de silicium de qualité électronique qui en se refroidissant forme plusieurs cristaux.</p> <p>Ces cellules sont bleues, mais non uniforme : on distingue des motifs créés par les différents cristaux.</p>	<p>Rendement faible : 5 à 9 %.</p> <p>Durée de vie : assez importante (20 ans)</p> <p>Coût de fabrication : peu onéreux par rapport aux autres technologies</p> <p>Puissance : 50 Wc/m². 16 m²/kWc.</p> <p>Fonctionnement correct avec un éclairement faible.</p> <p>Peu sensible aux températures élevées.</p> <p>Utilisables en panneaux souples.</p> <p>Surface de panneaux plus importante que pour les autres panneaux au silicium.</p> <p>Rendement faible en plein soleil.</p> <p>Performances diminuant avec le temps.</p> <p>Fabrication : couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide.</p>
Part de marché	43 %	47 %	10 %

5.3. Module solaire ou photovoltaïque

5.3.1 Association des cellules en série

Un panneau photovoltaïque est un assemblage de cellules permettant d'obtenir une tension et un courant adéquat au besoin de la charge. La puissance délivrée par un panneau solaire est alors fonction de sa surface, c'est à dire du nombre de cellules photovoltaïques qui y sont assemblées..

Les caractéristiques électriques d'une seule cellule sont généralement insuffisantes pour alimenter les équipements électriques. Il faut associer les cellules en série pour obtenir une tension plus importante : le module solaire ou panneau photovoltaïque.

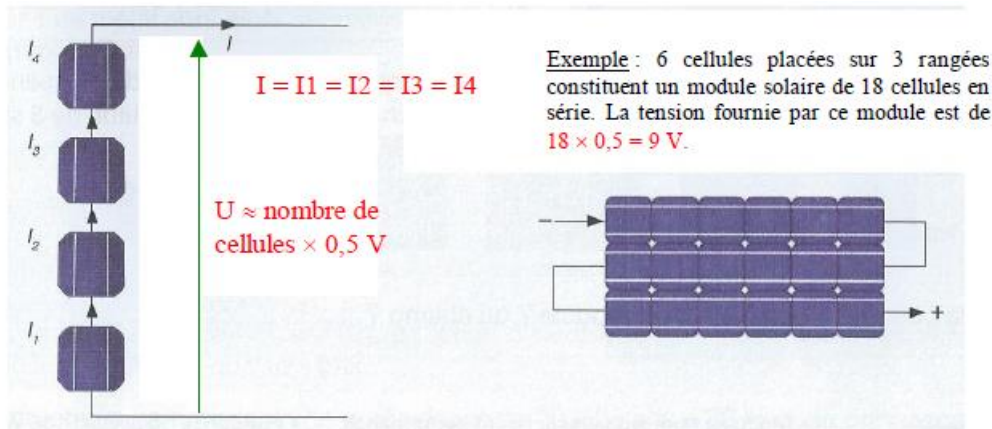


Fig 1.8 : des cellules photovoltaïques en série

Diodes « by-pass »

La mise en série des cellules peut être dangereuse lorsque l'une d'entre elles se retrouve à l'ombre. Elle va s'échauffer et risque de se détruire. En effet, une cellule "masquée" voit l'intensité du courant qui la traverse diminuer. De ce fait, elle bloque la circulation de l'intensité "normale" produite par les autres modules. La tension aux bornes de cette cellule "masquée" augmente, d'où apparition d'une surchauffe. C'est l'effet d'auto polarisation inverse. Une telle cellule est appelée "Hot spot".

Pour éliminer ce problème et protéger la cellule « masquée », on place des diodes « bypass » en antiparallèles sur un nombre limité de cellules de façon à court-circuiter les cellules ombrées. Un panneau solaire dispose généralement d'une à trois diodes by-pass, en fonction de son nombre de cellules (en moyenne 36 cellules pour 3 diodes bypass). En cas de masque :

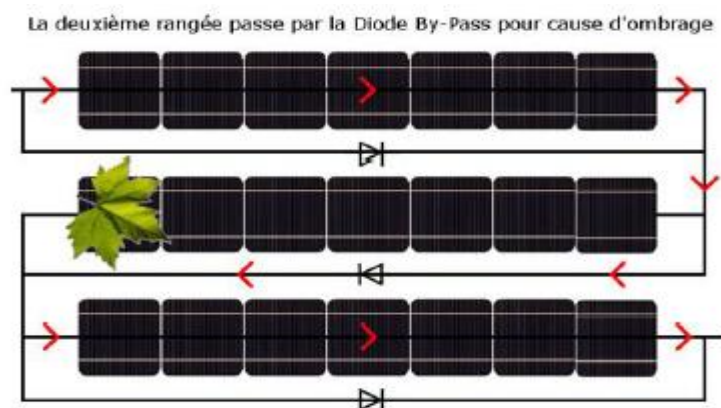


Fig 1.9 : Au niveau de la 2ème rangée, le courant passe par la diode by-pass pour cause d'ombrage.

5.3.2 Association des cellules en parallèle (donner l'équation du courant et de la tension)

L'association des N_p cellules photovoltaïques en parallèle permet d'avoir le courant voulu. La tension de la branche est égale à la tension de chaque cellule et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de cellules en parallèle. La figure (1.10) montre la caractéristique résultante (I_{CCN_p}, V_{CON_p}) obtenue en associant en parallèle (indice p) n_p cellules identiques (I_{CC}, I_{CO})

$$I_{CCN_p} = N_p * I_{CC} \quad (1.1)$$

Avec :

$$V_{CON_p} = N_p * V_{CC} \quad (1.2)$$

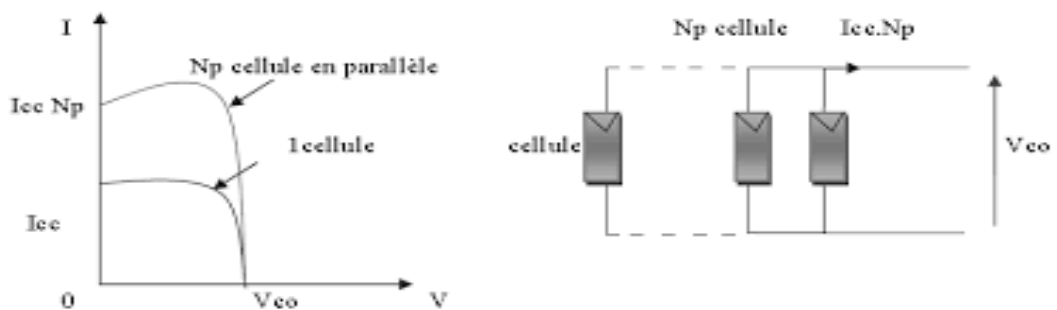


Fig 1.10 : Caractéristiques résultant d'un groupement N_p de cellules en parallèle.[7]

Tandis que les connexions en parallèle de plusieurs cellules augmentent le courant pour la même tension (fig.1.11).

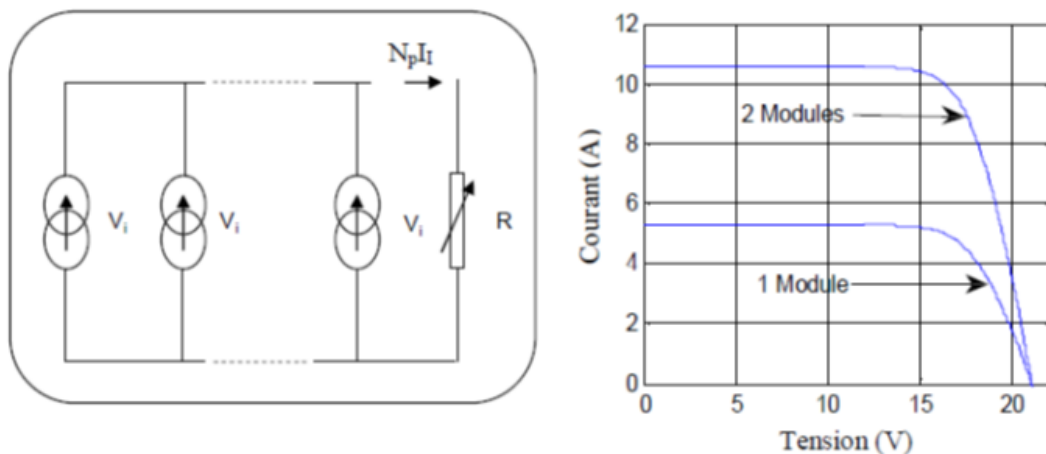


Fig 1.11 : Groupement des cellules en série- parallèle

5.4. Constitution d'un champ photovoltaïque

Afin d'obtenir la tension nécessaire à une charge, les panneaux sont connectés en série. Ils forment alors une chaîne de modules ou string. Les chaînes sont ensuite associées en parallèle et forment un champ photovoltaïque (champ PV).

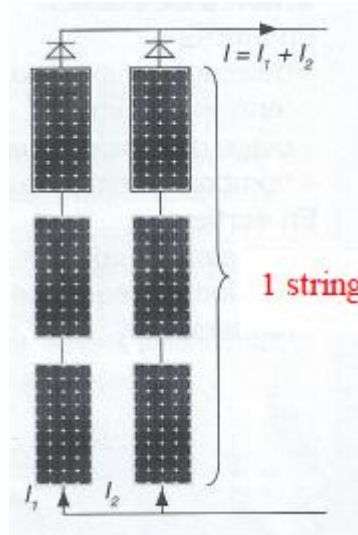


Fig1.12 : un string

Il faut également installer des diodes ou des fusibles en série sur chaque chaîne de modules. Ces protections sont utiles pour éviter qu'en cas d'ombre sur une chaîne, elle se comporte comme un récepteur et que le courant y circule en sens inverse et l'endommage.

6. Caractéristique électrique I-V et P-V

La puissance électrique délivrée par une cellule photovoltaïque est le produit de la tension par le courant qu'elle génère. Ces deux grandeurs, courant et tension, dépendent à la fois des propriétés électriques de la cellule mais aussi de la charge électrique à ses bornes. Les propriétés électriques de la cellule sont synthétisées dans un graphe qu'on appelle caractéristique courant-tension. Tout dipôle électrique est entièrement défini par sa caractéristique courant-tension, qui lui est propre. Une cellule photovoltaïque, en tant que dipôle électrique, dispose de sa propre caractéristique courant-tension, ainsi qu'illustré sur la fig 1.12.

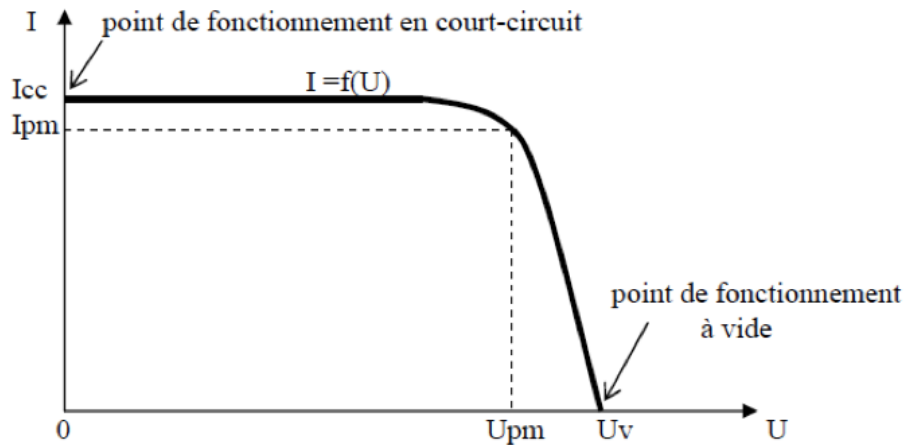


Fig 1.13: Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque

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

6.1. Le courant de court-circuit « I_{cc} »

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

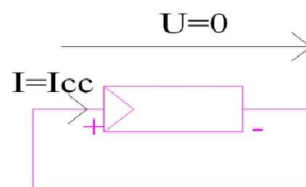


Fig 1.14 : Le courant de court-circuit I_{cc}

6.2. La tension en circuit ouvert « V_{co} »

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

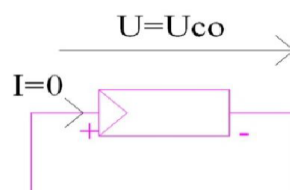


Fig 1.15 : La tension V_{co}

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

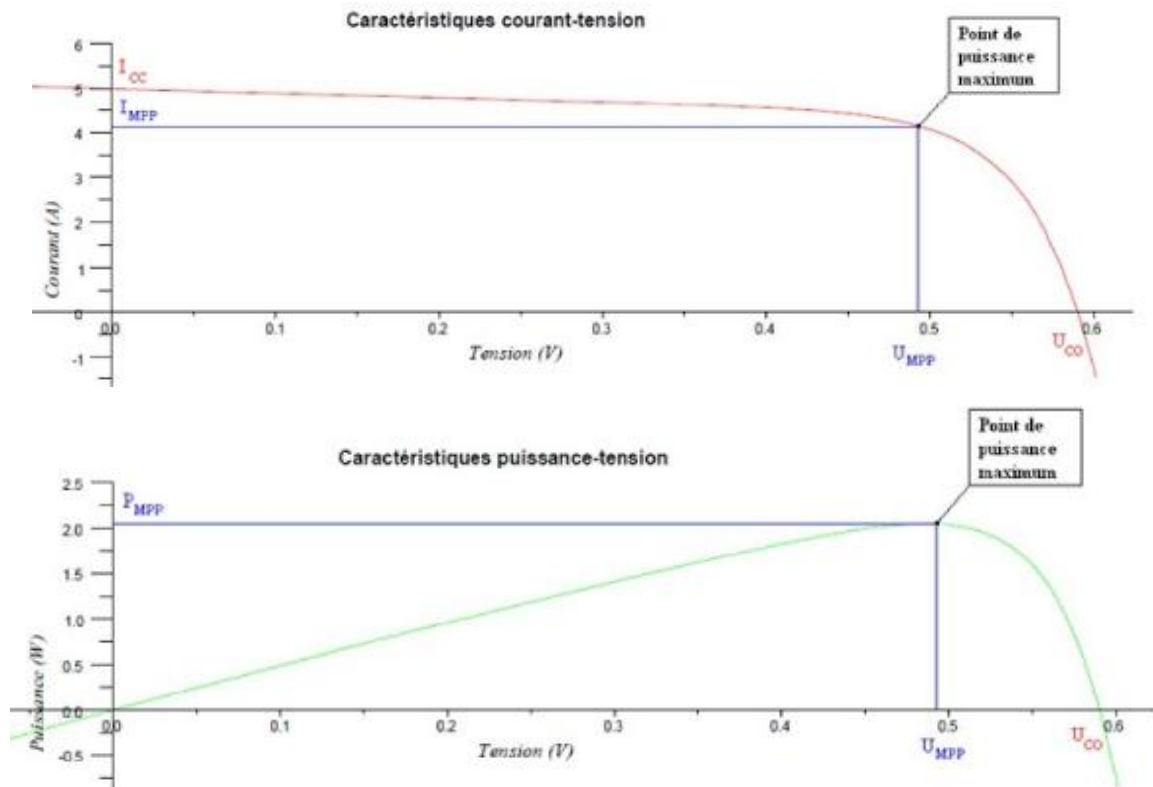


Fig 1.16 : Caractéristiques courant-tension & puissance-tension d'une cellule photovoltaïque

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

Par ailleurs, la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque met en évidence un point de puissance maximum PMPP (MPP signifie en anglais Maximal Power Point, soit Point de Puissance Maximum). Ce point de puissance maximum est le produit d'un courant et d'une tension donnés. On appelle respectivement I_{MPP} et V_{MPP} le courant et la tension correspondant au point de puissance maximum, c'est-à-dire tel que $I_{MPP} \times V_{MPP} = P_{MPP}$.

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

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

- Le courant de puissance maximale noté IMPP,
- La tension de puissance maximale notée VMPP.

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

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

7. Problèmes existants dans un générateur PV

Nous avons décrit dans la partie précédente les différents principaux constituant une unité de production d'un système PV. Nous décrivons dans cette partie les différents défauts et anomalies associés à ces composants.

Au cours de son fonctionnement, une installation PV peut être éventuellement soumise à différents défauts et conditions de fonctionnement anormales. Les défauts et les anomalies apparus varient d'une installation à une autre en fonction de sa conception, installation, opération et maintenance. Les défauts et anomalies principaux ont été identifiés grâce au retour d'expérience des partenaires industriels de ce projet [TRANSENERGIE'08]. Cette liste a été confirmée par des travaux identiques conduits par le laboratoire NREL [KURTZ'09].

Une liste des origines de défauts les plus fréquents est montrée dans ce tableau a été établi en considérant le type du défaut, sa conséquence principale, puis son degré d'impact sur la production du système ou criticité (1 faible, 2 moyens, 3 fort), son occurrence (1 faible, 2 moyenne, 3 forte) ainsi que sa phase d'origine (C : Conception ; I : Installation ; E : Exploitation).

Les défauts avec un score supérieur ou égal à 3 ont été retenus et sont listés dans le Tableau I-1. C'est pour le moment une simple liste de défauts issue du critère que nous avons retenu. Nous n'allons pas chercher à complètement discriminer ces défauts.

Eléments du générateur PV	Origines de défauts et d'anomalies
Générateur PV	<ul style="list-style-type: none"> - Feuilles d'arbre, déjections, pollution, sable, neige etc. - Détérioration des cellules, fissure, échauffement des cellules - Pénétration de l'humidité, dégradation des interconnexions, corrosion des liaisons entre les cellules - Modules de performances différentes - Module arraché ou cassé - Modules court-circuités, modules inversés
Boîte de jonction	<ul style="list-style-type: none"> - Rupture du circuit électrique - Court-circuit du circuit électrique - Destruction de la liaison - Corrosion des connexions
Câblage et connecteur	<ul style="list-style-type: none"> - Circuit ouvert - Court-circuit - Mauvais câblage (module inversé) - Corrosion des contacts - Rupture du circuit électrique
Diode de protection (diode de bypass et diode anti-retour)	<ul style="list-style-type: none"> - Destruction des diodes - Absence ou non fonctionnement de diodes - Inversion de la polarité des diodes au montage, diode mal connectée

Tableau 2 : principaux défauts et anomalies rencontrés dans un générateur PV [2].

8. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre quelques notions sur le rayonnement solaire, et nous avons expliqué sur le fonctionnement de la cellule photovoltaïque, à savoir les différents types de matériaux de fabrications des cellules photovoltaïques et étudié la technologie photovoltaïque, l'influence des conditions atmosphériques et de certains paramètres sur le comportement de la cellule PV et aperçus sur l'architecture d'un générateur photovoltaïque (l'association de la cellule série et parallèle).

CHAPITRE

02

1. Introduction

Le rendement d'un dispositif photovoltaïque est défini comme la puissance maximale générée P_m divisée par le produit de l'irradiance d'entrée et sa surface. Ce rendement dépend de nombreux facteurs, tels que l'irradiation et la température. Par conséquent, la mesure expérimentale de l'I-V courbe permet de connaître avec précision les caractéristiques électriques ainsi que ces performances. Cette mesure fournit des informations très pertinentes pour la conception, installation et maintenance de systèmes photovoltaïques.

Compte tenu du grand nombre de méthodes de mesure I-V, nous présenterons dans ce chapitre les différentes catégories de ces méthodes ainsi qu'un résumé de leurs principales caractéristiques.

2. Caractérisation des GPV

Les caractéristiques I-V d'une cellule, d'un module ou d'un réseau PV sont la clé importante pour identifier sa qualité et ses performances en fonction de paramètres environnementaux variables tels que le rayonnement solaire et la température ambiante [5]. La courbe indique les paramètres caractéristiques du générateur PV représentés en courant de court-circuit, tension en circuit ouvert et le point de puissance maximale auquel le générateur fonctionnerait à son efficacité maximale. Ces paramètres sont indispensables pour la conception de tout système d'alimentation PV petit ou grand. De plus, la courbe permet de déterminer les composants de circuit équivalents du générateur PV représentés dans la résistance série et la résistance shunt, qui sont des paramètres de divulgation pour classer la qualité du matériau du substrat du générateur. Par conséquent, il est primordial de mesurer les caractéristiques I-V avec une grande précision dans des conditions environnementales naturelles [6].

Le processus de surveillance des appareils PV implique principalement l'enregistrement des caractéristiques I-V en fonction du temps. Les tests en intérieur des cellules PV effectués sous STC conduisent à une surestimation de sa puissance électrique. Plus important encore, les tests accélérés en intérieur ne révèlent parfois pas les problèmes qui surviennent lors de l'opération dans des conditions de terrain [7]. Par conséquent, la procédure de test des modules PV dans des conditions de terrain fournit des informations très utiles sur les performances réelles et sur les effets de dégradation possibles des appareils. Le module PV doit être testé dans

des conditions réelles dans des endroits différents correspondant à des conditions climatiques différentes avec des rayonnements solaires et des températures ambiantes variables.

De nombreuses recherches traitent de la mesure de la courbe I-V des cellules ou modules PV dans différentes conditions de fonctionnement avec une variété de méthodes. La méthode la plus simple et la plus simple consiste à utiliser une résistance variable comme charge pour le générateur PV et à mesurer la tension et le courant par étapes. La figure 1 montre un circuit schématique pour mesurer les courbes I – V d'un générateur PV à l'aide d'un rhéostat. Dans cette méthode, la valeur de la résistance RL sera variée par pas de 0 à l'infini pour mesurer les points de la courbe I–V du court-circuit au circuit ouvert [8].

3. Les différentes méthodes de diagnostic des GPV

Le principe de base pour mesurer la courbe I-V est basé sur le contrôle du courant fourni par le photovoltaïque entre le point de courant zéro (V_{oc}) et le court-circuit point de circuit (I_{sc}). Il existe différentes méthodes pour effectuer cette tâche.

A. Résistance variable

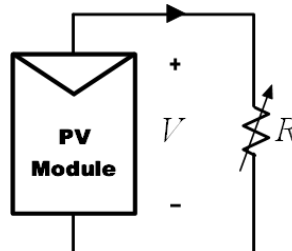


Fig1 résistance variable schéma

La façon la plus simple de mesurer la courbe I-V d'un module est d'utiliser une résistance variable R comme indiqué sur la Fig. 1.

La valeur de R sera variée par pas 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 à chaque pas. Cette méthode n'est applicable qu'aux modules de faible puissance car les résistances de puissance supérieure sont à peine disponibles. Les résistances de charge ne sont pas recommandées pour la caractérisation des modules photovoltaïques car I_{sc} n'est jamais exactement atteint et les caractéristiques de polarisation inverse ne peuvent pas être déterminées. Cependant, l'utilisation de résistances de charge pour évaluer les performances d'un module solaire peut fournir un moyen peu coûteux d'estimer ses performances. Dans [1], la résistance de charge est augmentée

manuellement par étapes. À chaque étape, la tension et le courant (en fait la tension aux bornes d'une résistance shunt) sont détectés à l'aide d'une paire de multimètres numériques à main. Il est rapporté dans [2] que le changement manuel de la résistance de charge rend le processus très lent, de sorte que le rayonnement solaire et les conditions thermiques peuvent être modifiés pendant la mesure. Le système présenté dans [3] et [4] utilise un ensemble de résistances comme charge. Un réseau de relais, contrôlé par une carte informatique, est utilisé pour sélectionner la combinaison de résistances pour obtenir une charge résistive spécifique. Les résistances sont choisies pour obtenir une bonne répartition des points autour du « genou » de la courbe. Deux canaux A/D de la carte informatique sont utilisés pour mesurer chaque paire I-V. Avec cette approche, le fonctionnement manuel sur la résistance est évité et le temps d'acquisition est amélioré.

B. charge capacitive

La deuxième méthode de mesure est basée sur la polarisation du module par un grand condensateur ; qui est chargé alors que le la première passe du court-circuit au circuit ouvert. Un circuit schématique utilisant ce principe est illustré à la Fig. 2.

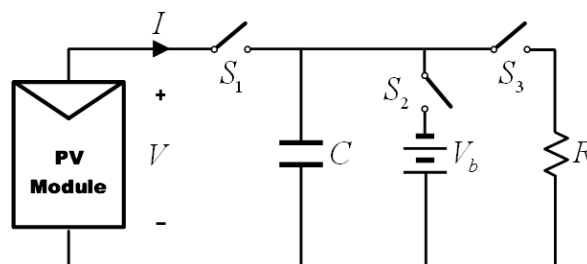


Fig 2 charge capacitive schéma

Au début de la mesure, le condensateur est court-circuit et lorsque l'interrupteur S_3 est ouvert et que le S_1 est fermé son chargement commence. Comme la charge du le condensateur augmente, le courant chute et la tension augmente.

Lorsque la charge est terminée, le courant fourni par le module devient nul et la condition de circuit ouvert est accompli. Au lieu de commencer en circuit court, on pourrait commencer avec S_2 fermé, donc le condensateur serait initialement chargé à une tension négative et la courbe I-V se croiserait l'axe courant pour obtenir I_{sc} . Pour obtenir un I-V fiable courbe avec la méthode des condensateurs, condensateurs de haute qualité (faible résistance série équivalente) avec de petites pertes sont obligatoire. De plus, les trois interrupteurs doivent être

activés avec la séquence appropriée, et la décharge préalable du condensateur est nécessaire pour démarrer une nouvelle mesure. Comme la reproduction de la courbe I-V n'est pas cyclique, un direct la visualisation ou une reproduction partielle de la courbe n'est pas possible. Dans [5], la tension et le courant sont surveillés par moyen d'une carte informatique. La mesure commence lorsque la carte envoie un signal de déclenchement au commutateur qui se connecte le condensateur à la cellule. Les auteurs de [6] décrivent une charge capacitive portable basée sur une grille isolée bipolaire transistors (IGBT), pour les générateurs photovoltaïques en fonctionnement réel les conditions. Les commutateurs sont mis en œuvre à l'aide d'IGBT et le condensateur est réalisé avec un parallèle disposition des condensateurs et des résistances. L'auteur de [2] rapporte que la taille du condensateur doit être directement proportionnelle à I_{sc} et indirectement proportionnelle à la V_{oc} .

De plus, plus la vitesse de mesure est élevée. Système, plus petite sera la taille du condensateur. En conséquence, le papier présente une capacité tableau de calcul, qui permet de sélectionner la bonne capacité pour mesurer les caractéristiques I-V par un système informatisé d'acquisition de données.

C. charge électronique

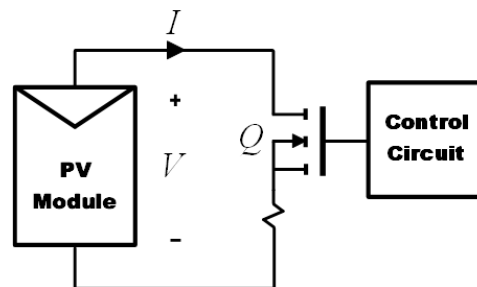


Fig 3. Charge électronique schéma

La méthode de charge électronique (Fig. 3) utilise un transistor (généralement un MOSFET) comme charge ; la résistance entre le drain et la source sont modulés à travers la grille-source tension, et par conséquent le flux de courant fourni par le module. Lorsque cette méthode est utilisée pour tracer l'I-V courbe du module, le MOSFET doit fonctionner dans ses trois modes de fonctionnement (coupure, actif et ohmique Région). Par conséquent, la majeure partie de la puissance fournie par le module devra être dissipé par ce dispositif, qui limite son application à une puissance moyenne. Dans [7], une simple charge électronique basée sur un MOSFET est proposée pour obtenir la courbe I-V des panneaux en balayant rapidement le

charger. Son avantage est la variation rapide de l'équivalent résistance de charge du MOSFET. Le MOSFET linéaire est piloté par un signal de balayage à basse fréquence avec une assez grande amplitude pour couvrir toute la gamme de panneaux caractéristique. Plusieurs MOSFET peuvent être utilisés dans parallèle pour gérer un courant de sortie plus élevé à partir d'un tableau avec plusieurs panneaux photovoltaïques. La tension et le courant de sortie sont détecté à l'aide d'un diviseur de potentiel et d'une résistance de détection respectivement. Les sorties sont transmises à un oscilloscope pour affichant la courbe. I_{sc} et V_{oc} sont obtenus en utilisant deux les détecteurs de crête et les signaux de tension et de courant sont multiplié à l'aide d'un multiplicateur pour obtenir l'instantané puissance, ainsi un troisième détecteur de crête peut être utilisé pour capturer la valeur P_m . Les auteurs de [8] introduisent un système de surveiller les performances des centrales solaires photovoltaïques, y compris Courbes I-V, qui sont obtenues en peu de temps pour éviter interférence des nuages lors des mesures en extérieur. La charge électronique est constituée de plusieurs transistors en Cascade. En réduisant progressivement la base du transistor courant, le générateur PV se déplace du court-circuit indiquer l'état de la tension en circuit ouvert. Une acquisition de données carte avec convertisseur A/N haute vitesse est utilisée pour mesurer le courant et la tension, tandis que le point de fonctionnement changements. L'innovation de ce circuit est que le balayage de la courbe I-V est contrôlée par une rampe de courant, à la place d'utiliser une rampe de tension. Dans [9] est présenté un circuit pour mesurer les courbes I-V des cellules multi-jonctions PV (celles qui avoir plus d'une jonction afin de capter plus photons). Un transistor MOSFET à canal n et un amplificateur opérationnel sont combinés pour créer la tension puits de courant contrôlé. Pour chaque réglage actuel, un amplificateur différentiel est utilisé pour lire la tension aux bornes du cellule solaire, balayant celui-ci à travers plusieurs points le long sa courbe caractéristique. Données recueillies pour chaque courbe comprend la température de la cellule solaire, l'angle solaire et le temps.

D. Amplificateur de puissance bipolaire.

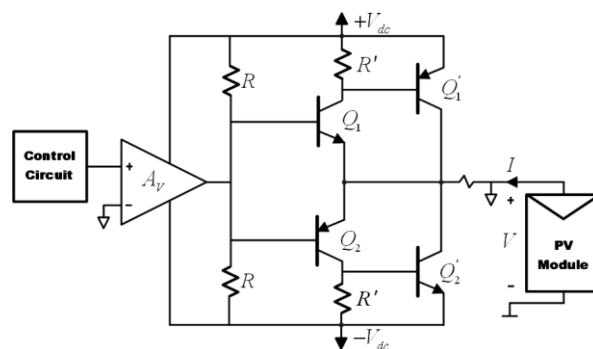


Fig 4. Amplificateur de puissance bipolaire

Cette méthode implique un circuit simple qui permet au le courant et la tension dans le module peuvent être inversés, et il est donc possible de mesurer les courbes I-V sombres du module. Son schéma est basé sur une classe B traditionnelle amplificateur de puissance (Fig. 4). Il utilise deux transistors BJT comme charge, respectivement pour le courant direct et inverse. Le transistor bipolaire doit fonctionner dans ses trois modes de fonctionnement (zone de coupure, active et de saturation). Comme un résultat, la majeure partie de la puissance délivrée par le module sera doivent être dissipés par ces dispositifs, ce qui limite son application à moyenne puissance. Dans [10], un test contrôlé par PC configuration est présentée. Il est orienté pour mesurer l'I-V caractéristiques des cellules solaires de grande surface sous une source lumineuse qui simule le rayonnement solaire. la mesure est effectuée de manière automatisée en employant instruments GPIB standard interfacés à un PC. Épreuve élevée le courant nécessaire à la cellule solaire de grande surface est fourni par un amplificateur de puissance bipolaire piloté par un générateur de fonction, qui réalise une tension échelonnée à sa sortie. Un l'application contrôle le générateur de fonctions pour démarrer à partir d'une tension de polarisation minimale et augmenter par incréments, jusqu'à ce que la polarisation maximale ou une valeur de courant de sécurité maximale est atteint. La tension et le courant à chaque étape sont détectés profitant du voltmètre et de l'ampèremètre séparés entrées d'un multimètre numérique. Dans [5] (également référencé dans section II.B), un circuit très similaire est présenté pour polariser tension d'une cellule, mais au lieu d'utiliser un générateur de fonctions, une carte D/A joué le rôle de circuit de commande.

E. Alimentation électrique à quatre quadrants.

Une alimentation à quatre quadrants est un système capable de fournir ainsi que dissiper la puissance ; en d'autres termes, il peut générer ou absorber du courant avec bipolaire (positif ou tension négative). Il peut être utilisé comme charge réglable pour d'autres alimentations ou d'autres équipements. Pour un module photovoltaïque l'intérêt principal est d'obtenir l'I-V courbe dans le premier quadrant. Mais, l'exploration des points situés dans les deuxièmes et quatrièmes quadrants peuvent être un outil de diagnostic important pour détecter d'éventuelles décalage dans le fonctionnement du module PV ; comme un ou plusieurs cellules partiellement occultées lorsqu'elles sont connectées en série.

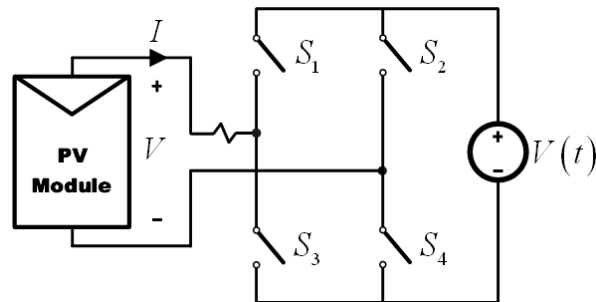


Fig 5. Alimentation électrique à quatre quadrants schéma

Une alimentation à quatre quadrants peut être considérée comme une alimentation fournir $V(t)$, dont la sortie peut être variée par une référence signal d'entrée ou programmé pour balayer une plage de valeurs. Le circuit illustré à la Fig. 5 est une vue fonctionnelle de l'alimentation quatre quadrants. Un circuit schématique pour un l'alimentation à quatre quadrants est plus complexe et est au-delà de la portée de cet examen.

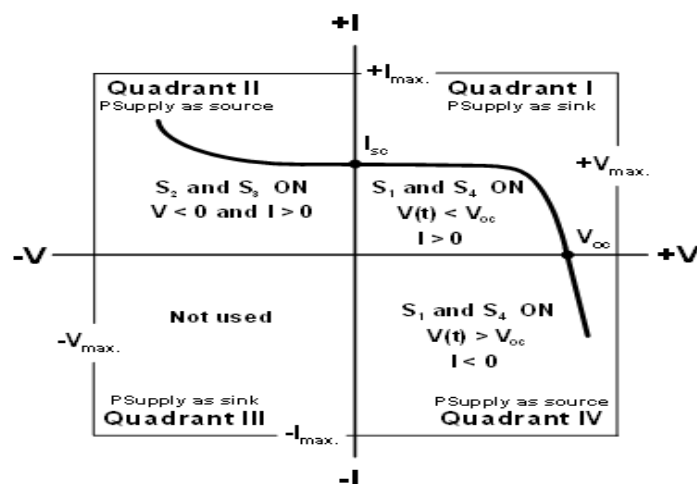


Fig 6. Caractéristique I-V dans les 1er, 2e et 4e quadrants.

Avec S_1 et S_4 fermés et $V(t)$ supérieur à l'ouvert tension du circuit du module PV testé, le fonctionnement PV point est déplacé dans le quatrième quadrant. Avec S_1 et S_4 fermée et $V(t)$ inférieure à V_{oc} , le point de fonctionnement PV est déplacé dans le premier quadrant. Enfin, si S_2 et S_3 sont fermée, la tension PV V est forcée à $-V(t)$ et la PV le point de fonctionnement est décalé dans le deuxième quadrant. Il est illustré à la Fig. 6. Ce type de charge est intrinsèquement chère. De plus, les alimentations à quatre quadrants qui fonctionnent plus de 1 kW. Sont à peine disponibles, donc cette méthode n'est pas applicable pour mesurer un générateur PV complet. En 1], un système pour mesurer les courbes I-V en utilisant des bipolaires variables alimentation opérationnelle avec capacité à quatre quadrants est présenté (ce document est également référencé dans la section II.A)

La procédure consiste à faire varier la tension sur l'alimentation électrique manuellement par étapes. La tension aux bornes de la cellule solaire est mesurée à l'aide d'un multimètre numérique et avec un autre courant est détecté (à l'aide d'un shunt résistance). De plus, les caractéristiques de polarisation inverse peuvent être déterminé. Une alimentation variable est également utile dans mesurer rapidement le courant de court-circuit ou le courant à une tension donnée. Les auteurs de [11] décrivent une méthodologie pour la détermination de la caractéristique I-V courbes de modules photovoltaïques dans diverses conditions. Mais, dans ce cas, le balayage de tension de l'alimentation est contrôlé automatiquement par un ordinateur. La tension et courant sont mesurés simultanément par deux multimètres connectés à un ordinateur via GPIB. L'ordinateur récupère les données acquises, et le principal les paramètres électriques sont déterminés. Dans [12], une installation de caractérisation des cellules photovoltaïques à concentration décrit. Les cellules photovoltaïques sont éclairées par un solaire concentrateur parabolique et un ensemble d'obturateurs permet le contrôle le temps d'exposition de la cellule PV obtenant un train de flashes sur la cellule mais en utilisant le rayonnement solaire. Synchronisé avec les obturateurs est un ensemble d'instruments qui mesure l'I-V courbes pour que tous les points de la courbe puissent être trouvés dans éclairs de rayonnement successifs. Le balayage est contrôlé par un générateur de forme d'onde capable de générer une rampe de tension analogique préprogrammée qui est amplifiée par l'alimentation. Deux canaux (courant et tension) d'un analyseur de puissance sont utilisés comme analyseur à grande vitesse et acquisition simultanée des données de la courbe. Dans [13] le les courbes sont également mesurées selon le même principe la température et l'irradiance du module sont enregistrées au début et la fin de chaque expérience, en rejetant courbes dans lesquelles ces grandeurs varient de manière significative. Dans [14] la tension de l'alimentation est contrôlée par un D/A convertisseur d'une carte informatique. Le courant est mesuré comme une chute de tension sur l'un des ensembles de sept résistances, chacune en utilisant une entrée séparée de l'A/D du même ordinateur carte. Les résistances sont changées automatiquement à l'aide signaux binaires de sortie de la carte, en fonction du courant gamme du module à mesurer.

F. DC /DC convertisseur

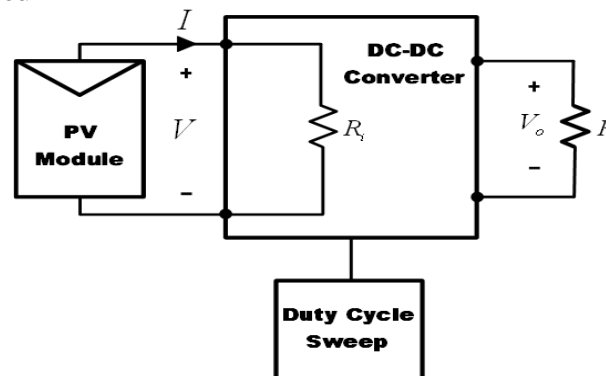


Fig 7. DC /DC convertisseur schéma

La capacité des convertisseurs DC-DC à émuler une résistance a été étudiée et analysée dans plusieurs applications. Cette propriété des convertisseurs DC-DC d'agir comme une résistance émulateurs a été appliqué pour obtenir des courbes I-V de l'énergie solaire modules. Les trois configurations de convertisseur de base (Buck convertisseur, convertisseur Boost et convertisseur Buck-Boost) sont similaires à un transformateur DC à la fois en continu Mode Conduction (CCM) et en Discontinu

Mode de conduction (DCM). Dans un transformateur à courant continu, la relation de transformation peut être contrôlée électroniquement en changeant le rapport cyclique du convertisseur dans la plage $[0,1]$. La Fig. 7 montre le schéma pour caractériser un module au moyen d'un convertisseur DC-DC avec balayage du rapport cyclique, R_i est la résistance émulée sur les bornes du module. Sur la base de ce schéma, en [15]-[16], un système automatique pour tracer les courbes I-V est proposé. Sa méthodologie, basée sur l'utilisation de différents Les convertisseurs DC-DC sont présentés. Dans [17], différentes topologies de convertisseurs DC-DC orientés vers la mesure des courbes I-V ont été analysées. La théorie démontre que les structures Buck-Boost-Derived sont les seules qui permettre un balayage complet de la courbe. Les structures Buck font ne permet pas de tracer les points de la courbe proches de I_{sc} , alors que les structures Boost ne peuvent pas atteindre les points proches à V_{oc} . Lorsque SEPIC (Single-Ended Primary Inductance Converter) et les structures Cuk sont utilisées, la reproduction de la courbe I-V est obtenue avec moins d'ondulation. Expérimental les résultats montrent que ces topologies sont optimales pour cette application. Un inconvénient des convertisseurs DC-DC est l'ondulation de courant par l'inductance due à la commutation technique (ce problème n'est pas présent dans d'autres méthodes). Néanmoins, certaines techniques ont été développées pour réduire l'ondulation, tels que : inducteurs couplés [18] et convertisseurs DC-DC entrelacés [19]. Les deux documents discutent l'utilisation de ces

techniques pour obtenir la courbe I-V de l'énergie solaire modules. Dans [20], cette méthodologie, qui peut effectuer le balayage complet de la tension et du courant, est appliquée à l'analyse et au suivi des pannes dans le photovoltaïque modules. Le système proposé est basé sur l'automatisation génération de courbes I-V à l'aide d'un système d'acquisition de données également utilisé pour détecter la température et l'irradiance. Les mesures météorologiques sont très utiles pour analyser les performances des modules et détecter toute défaillance ou anomalie dans leur fonctionnement. Dans [21], un circuit modèle pour émuler le comportement I-V d'un champ PV est décrit. Ce modèle de circuit est basé sur un DC-DC Buck convertisseur. Le convertisseur DC-DC, convenablement piloté, peut décrire avec précision la caractéristique courant-tension d'un générateur photovoltaïque. Un nouveau système d'alimentation de cellules solaires est présenté dans [22], dans lequel le type Boost bidirectionnel Le convertisseur DC-DC et le circuit de commande simple sont employé avec une petite cellule solaire de moniteur. Aussi, un pouvoir comparaison d'efficacité entre la nouvelle puissance des cellules solaires système d'approvisionnement et un conventionnel est fait théoriquement et expérimentalement. Dans [23]-[25], un Boost convertisseur DC-DC bidirectionnel est utilisé pour mesurer l'évolution réelle des courbes caractéristiques I-V de générateurs photovoltaïques. Ces courbes I-V sont utilisées plus tard d'émuler ces générateurs pour tester des onduleurs photovoltaïques. Un prototype de 15 kW est conçu et construit. Avec le dispositif proposé, la configuration optimale et performances des modules photovoltaïques et des générateurs, ainsi que le fonctionnement des onduleurs photovoltaïques peuvent être analysés en profondeur dans des conditions atmosphériques réelles. Une charge DC contrôlable haute performance basée sur Buck convertisseur avec filtre d'entrée est introduit dans [26]. La charge présente une structure simple, un faible coût et une réponse rapide. La charge peut être utilisée pour tester et évaluer des piles à combustible individuelles, piles à combustible ou panneaux solaires. La charge peut être programmé pour produire la courbe de polarisation complète de piles à combustible et de piles à combustible, ainsi que I-V caractéristique des panneaux solaires. La charge DC programmable peut être utilisé pour émuler une résistance variable, charge à courant variable ou charge à puissance variable. La charge peut également être utilisé pour émuler un profil de charge CC arbitraire. La performance de la charge cc contrôlable proposée a été analysé et simulé. La limite de la charge cc contrôlable proposée réside dans son incapacité à émuler des charges cc actives avec inversion de puissance, telles que variateurs de vitesse capables de freinage régénératif.

4. Comparaison.

Afin de souligner les propriétés des différentes méthodes présentées, une comparaison détaillée est réalisée. La comparaison est effectuée avec les paramètres fondamentaux suivants pour les systèmes de mesure :

A. La flexibilité

La flexibilité est un important facteur de comparaison et joue un rôle important afin de sélectionner l'un des méthodes. En conséquence, le convertisseur DC-DC permet de configurer la vitesse et la direction du balayage. En modifiant le rapport cyclique, des zones spécifiques de la courbe I-V peuvent être partiellement atteintes. Il peut fonctionner en continu autour du point de puissance maximum du module photovoltaïque sous test. Avec une alimentation à quatre quadrants, une partie de la reproduction de la courbe I-V est également possible, mais nécessite une programmation complexe du signal $v(t)$. Les méthodes basées sur la charge électronique montrent également une grande flexibilité, mais la reproduction des points autour du MPP nécessite des dissipations de puissance, en particulier avec des générateurs de forte puissance, puisque les transistors fonctionnent dans leur zone linéaire. Dans la méthode de charge capacitive, la reproduction de la courbe I-V n'est pas cyclique, donc une visualisation directe ou une reproduction partielle de la courbe I-V n'est pas possible.

B. Modularité

Il est très important de permettre plusieurs configurations. La méthode basée sur un convertisseur DC-DC permet de faire une extension du système en connectant simplement un DC-DC convertisseur en parallèle. La charge capacitive et les méthodes de chargement électronique présentent des difficultés lorsque la puissance du réseau testé augmente. La conception principale se soucie de la vitesse pour le premier et de la dissipation de puissance pour la seconde. Dans le cas d'une alimentation à quatre quadrants, la modularité n'est possible que chez certains constructeurs, qui permettent de combiner plusieurs fournitures permettant leur contrôle comme s'il s'agissait d'un seul approvisionnement, ce qui signifie une forte augmentation des coûts.

C. Fidélité

Il est difficile d'évaluer quelle méthode est la plus fiable car cette fonctionnalité dépend largement des données du système d'acquisition. Cependant, avec une méthode basée sur un convertisseur DC-DC, la haute-fidélité est obtenue même pour un haut balayage de vitesse.

Une analyse exhaustive des revues méthodes révèle qu'il est difficile de ne reproduire exactement point zéro de tension (I_{sc}). Alimentation à quatre quadrants La méthode ne nécessite qu'une interpolation autour de zéro volt. Dans la méthode du condensateur peut également être appliquée, mais uniquement si une charge négative préalable est imposée. Avec variables méthode de résistance et méthode de charge électronique uniquement une extrapolation est possible.

D. Réponse rapide.

Une réponse rapide est particulièrement intéressante car elle s'assure que tous les points de la courbe ont été obtenus avec les mêmes conditions climatiques. Il est également important que possibilité de configurer la vitesse de balayage, puisque cela augmente la flexibilité et la fiabilité du système.

E. Affichage direct.

L'affichage direct offre la possibilité d'une lecture rapide premier test du module. Mais toutes les méthodes ne permettent pas un affichage. La reproduction de la courbe I-V n'est pas cyclique pour la variable méthodes de résistance et de charge capacitive, et donc, un l'affichage direct ou la reproduction partielle d'une courbe n'est pas possible.

F. Coût.

Habituellement, une bonne évaluation des coûts peut être faite en sachant ce qui inclut le système d'acquisition de données, l'analogique ou technique numérique utilisée, qu'elle nécessite un logiciel et programmation et le nombre de capteurs. Éliminer capteurs de courant et de tension, les coûts diminuent considérablement. La méthode de charge capacitive nécessite une rapidité d'acquisition et le stockage de la mémoire dans l'instrument, ce qui entraîne coût élevé. Peut-être, la meilleure façon d'évaluer toutes les méthodes en termes de coût prend en compte toutes les précédentes fonctionnalités comme un ensemble complet. Ainsi, la méthode basée sur Le convertisseur DC-DC est moins cher car il est flexible, modulaire et fiable. De plus, il offre une grande puissance densité et permet un affichage direct de la courbe I-V. Table 1 résume les propriétés de chaque méthode. Notez que le procédé basé sur un convertisseur DC-DC présente des caractéristiques qui le rend préférable pour mesurer la courbe I-V de modules photovoltaïques.

4.2. Résultat

Dans cet article, plusieurs méthodes pour obtenir le I-V de modules photovoltaïques rapportés dans la littérature sont discuté et analysé. Les résultats de la discussion et le tableau comparatif devrait servir de guide utile pour sélectionner la méthode la plus pratique pour un PV spécifique système.

	A	B	C	D	E	F
• Résistance variable	Moyen	Moyen	Moyen	Bas	No	Bas
• Charge capacitive	Bas	Bas	Moyen	Bas	No	Haut
• Charge électronique	Haut	Haut	Moyen	Moyen	Oui	Haut
• Amplificateur de puissance bipolaire	Haut	Haut	Haut	Moyen	Oui	Haut
• Alimentation 4 quadrants	Bas	Bas	Haut	Haut	Oui	Haut
• Convertisseur DC-DC	Haut	haut	Haut	Haut	Oui	Bas

Tab 01. Comparaison entre les méthodes

5. Conclusion

Un système complet pour mesurer les courbes I-V de tout dispositif photovoltaïque a été mis en place. Le système repose sur trois principes : l'utilisation d'instruments à usage général pour effectuer les mesures, qui garantissent l'exactitude et la précision ; l'utilisation de matériel ouvert, qui permet la reproduction du système dans n'importe quel laboratoire ; et l'évolutivité, qui mesure tout appareil PV. Ces caractéristiques réduisent également le budget final du système. Le matériel est composé d'une partie commune, qui peut être utilisée pour mesurer n'importe quel générateur PV, et une pièce interchangeable, qui doit être conçue en tenant compte des spécifications de l'appareil PV sous test. De cette façon, le système proposé peut être utilisé pour mesurer n'importe quel générateur PV. Le fourni logiciel permet au processus de mesure d'être configuré et contrôlé pour prendre automatiquement Courbes I-V à intervalles de temps réguliers. En outre, le programme offre un ensemble d'outils pour effectuer des données traitement à partir des courbes I-V obtenues telles que l'extrapolation à STC. Une étude approfondie des incertitudes associées au processus de mesure a été réalisée. Ainsi, les courbes I-V rapportées pour les modules testés incluent leur incertitude respective. Ne campagne de mesures a été réalisée. Trois modules commerciaux de différentes technologies photovoltaïques ont été caractérisées par le système. Ces modules étaient auparavant envoyés à un laboratoire accrédité indépendant afin de comparer les résultats obtenus par le système

proposé à ceux donnés par l'IAL. Les résultats obtenus prouvent que l'erreur relative lors de la mesure des principaux paramètres électriques et effectuer l'extrapolation à STC est inférieur à 5%. En court-circuit l'erreur n'est jamais supérieure à 5 %, la tension en circuit ouvert est inférieure à 0,5 % et la puissance maximale est d'environ 4% dans le pire des cas. Ainsi, les résultats obtenus suggèrent que le système proposé est adapté et peut être rentable pour les laboratoires à budget réduit ou pour des applications pédagogiques.

CHAPITRE

03

1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter la description du système de caractérisation photovoltaïque. Nous allons baser la conception de ce système sur l'utilisation d'une charge électronique à base de transistor MOSFET. Nous allons au début du chapitre illustrer les différents éléments qui constituent ce système. Nous allons ensuite montrer et expliquer le choix des composants qui serviront à la réalisation pratique du système.

2. Description du système

Notre travail principal est de construire un système de mesure à base de composants électroniques et de capteurs pour tracer les caractéristiques des modules PV.

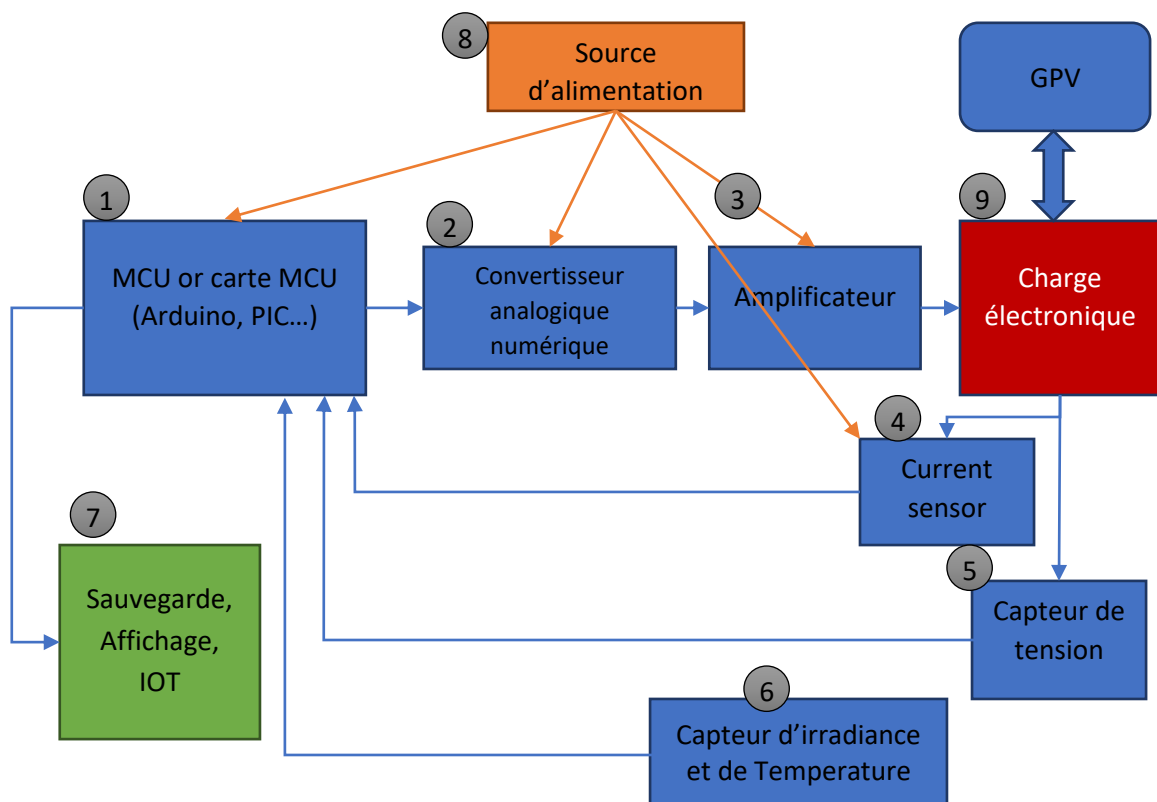


Fig 3.1. Eléments et fonctionnalités réalisées par le système de caractérisation.

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

module PV que nous projetons de caractériser est un module de faible puissance qui ne doit pas dépasser les 120 Wc avec un courant maximum de 7A et une tension cête de 30Volt.

Le système est basé sur l'utilisation d'une charge électronique, qui permet d'émuler le fonctionnement d'une charge ohmique, avec la possibilité d'ajustement de la résistance équivalente. La charge électronique est un instrument de test conçu pour absorber le courant et la puissance d'une source d'alimentation.

2.1 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) (éléments 1, 2, 3, 9)**
 - Commande d'une charge électronique par un signal analogique qui varie de 0 à V_{max} , V_{max} représente la tension maximum qui permet d'absorber le courant maximal du générateur photovoltaïque.
 - A chaque nouvelle valeur de la tension V_{max} on mesure :
 - Le courant (I_{pv}) (élément 4)
 - La tension (V_{pv}) (élément 5)
- **La mesure de la température du panneau photovoltaïque (élément 6)**
 - La mesure de température du panneau PV doit s'effectuée 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 (élément 6)**
 - 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.

➤ **Sauvegarde et utilisation des données (élément 7)**

- Un élément essentiel du système est l'utilisation des données, les données mesurées à travers les capteurs et traitées par le MCU sont ensuite utilisées localement via un afficheur, ou envoyées vers PC pour leur visualisation sur un logiciel spécialisé tel que Labview.
- D'autres fonctionnalités peuvent être ajoutées comme telles :
 - La sauvegarde des données de 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)
 - Des boutons pour la commande du système

➤ **Source d'alimentation (élément 87)**

- Une source électrique est nécessaire pour le fonctionnement des composants électroniques du système, cette alimentation doit fournir à ces différents composants suffisamment de courant et une tension adaptée au type de composants et à la fonctionnalité souhaitée.

3. Charge électronique pour la caractérisation d'un GPV

La mesure des courbes I-V pour d'un générateur PV dépend principalement du balayage de la tension aux bornes du module PV du court-circuit (valeur minimale) au circuit ouvert (valeur maximale), ce qui correspond au changement du courant du module à partir de la valeur maximale (courant de court-circuit) à la valeur minimale (courant nul). Un MOSFET de puissance peut être utilisé comme charge électronique à variation rapide contrôlée au moyen d'une tension grille-source variable (VGS). Fig 1 montre l'idée de base du circuit pour tester un module PV en utilisant un MOSFET comme charge électronique.

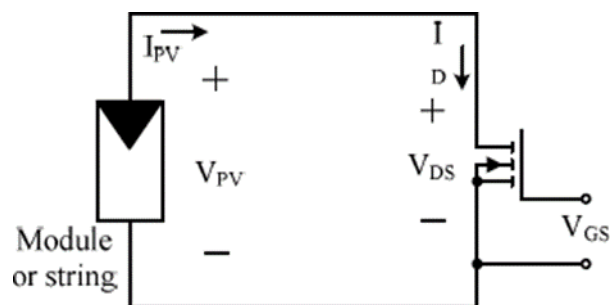


Fig 3. 2. Circuit de base pour tester les modules PV en utilisant un MOSFET comme charge électronique.

Ainsi, le point de fonctionnement correspond à l'intersection de la caractéristique du module PV avec celle du MOSFET pour une tension V_{GS} donnée. La fig 3.3 montre une caractéristique du module PV avec celle du MOSFET. En balayant V_{GS} avec un signal approprié, le point de fonctionnement du MOSFET balaie la caractéristique I-V entre la tension de circuit ouvert du module et le courant de court-circuit. Tant que V_{GS} est inférieur à la tension de seuil (V_{th}), le MOSFET sera désactivé. Lorsque V_{GS} est augmenté au-dessus de V_{th} , le dispositif fonctionnera dans sa région active où le courant de drain (I_D) augmente approximativement de manière linéaire avec V_{GS} .

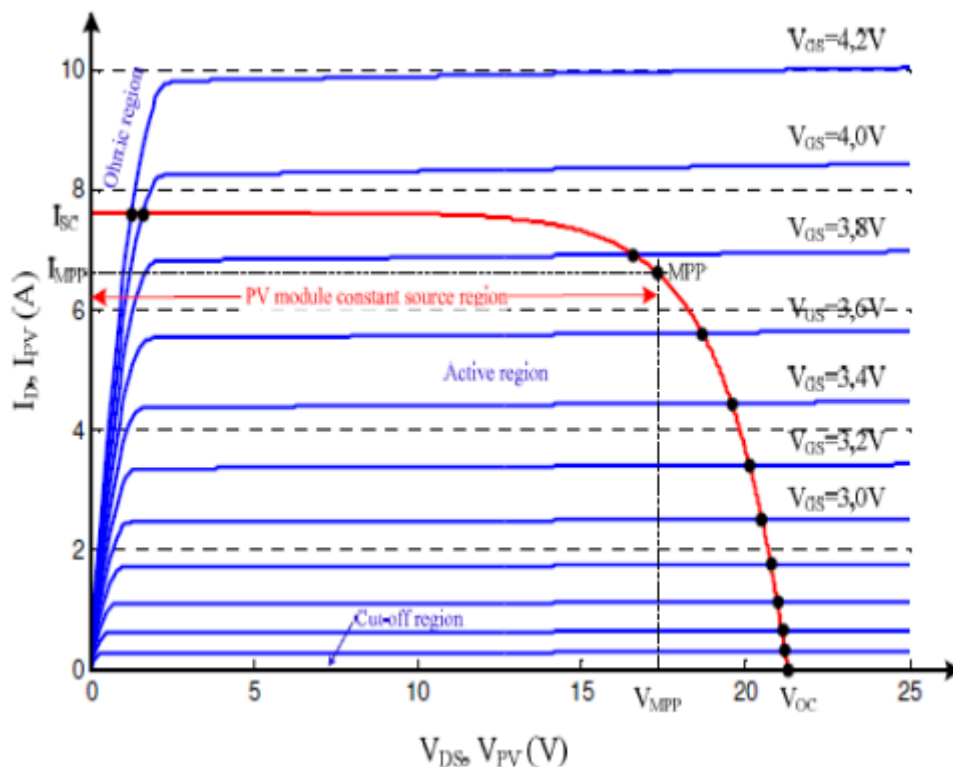


Fig 3.3. Caractéristique d'un module PV et caractéristiques d'un MOSFET.

En ce qui concerne le module PV, pour une tension supérieure à la tension au point de puissance maximale (V_{MPP}), la caractéristique sera similaire à celle d'une source de tension. À des tensions inférieures à V_{MPP} , le module PV se comportera comme une source de courant. Dans cette région plate, indiquée sur fig 3.3, la tension de module (V_{PV}) est sensible à de petites variations de courant de module (I_{PV}) et donc à de petites variations de V_{GS} . En raison de cette sensibilité élevée, le point de fonctionnement se déplacera trop rapidement dans cette région plate à moins qu'un signal de balayage approprié ne soit créé pour générer la tension V_{GS} .

3.1 Principe de fonctionnement d'une charge électronique

Le schéma fonctionnel du circuit électronique développé pour mesurer les caractéristiques I-V des modules PV est illustré à fig 3.1. D'après la figure, les composants matériels du circuit de mesure sont ; MOSFET en tant que charge électronique avec dissipateur thermique pour dissiper la puissance, un signal de commande sur grille pour le balayage de la tension VGS, des outils de mesure et un système d'acquisition de données composé principalement d'un microcontrôleur.

3.2 Eléments de commande

La commande d'une charge électronique, doit appliqué une commande qui permet de laisser passer un certain courant électrique à travers le MOSFET tel que montré sur la figure suivante.

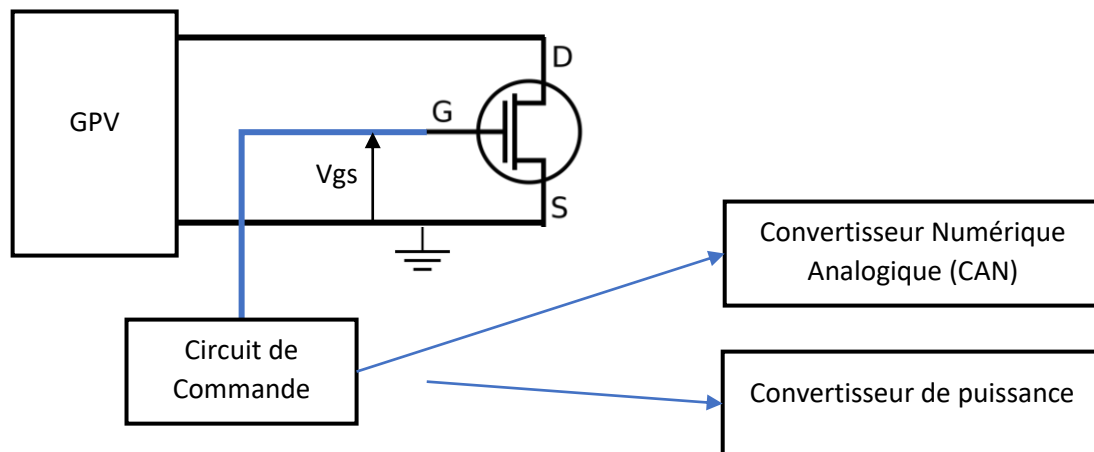


Fig 3.4 Commande d'une charge électronique

Pour appliquer un signal de commande sur la tension grille/source V_{gs} , nous avons plusieurs technique, les plus usités dans la literature scientifique sont :

- **Convertisseur de puissance** : Dans ce cas on utilise un convertisseur de puissance qui converti un signal de commande numérique à largeur d'impulsion variable PWM en une tension proportionnelle pour faire varié V_{gs} .
- **Convertisseur Numérique Analogique (CAN)** : Dans ce cas on utilise un convertisseur CAN qui transforme un signale de commande numérique de valeur binaire en un valeur analogique. Contrairement à la première solution, la plus part de ces circuits permettent d'avoir des tensions en sortie limitée (soit inférieur à 5V), de ce

fait un circuit à base d'amplificateur opérationnel est utilisé pour adapter cette tension à la tension requise par le MOSFET choisi.

3.3 Conversion numérique analogique (CAN)

La figure suivante donne le symbole d'un convertisseur numérique analogique (DAC, Digital to Analog Converter) à N bits ; il peut être suivi, ou non, d'un filtre de lissage (passe bas).

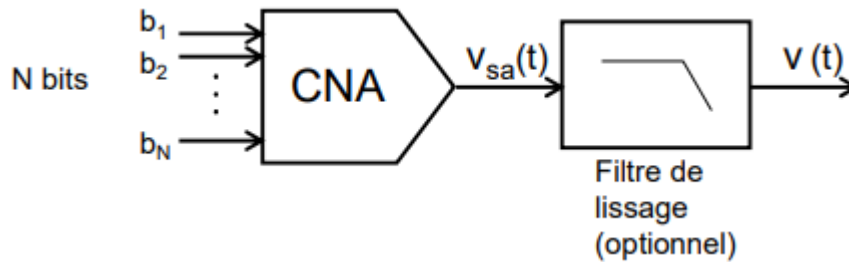


Fig.3.5 Conversion numérique analogique.

Chacun des 2^N mots binaires pouvant être appliqué en entrée est associé à une tension analogique de sortie $V_{sa}(t)$ (il peut s'agir également d'un *courant*⁵) telle que :

$$V_{Sa} = (b_1 \cdot 2^{N-1} + b_2 \cdot 2^{N-2} + \dots + b_{N-1} \cdot 2^1 + b_{N-2} \cdot 2^0) \cdot \frac{V_{PE}}{2^{N-1}}$$

En prenant b_1 comme MSB.

La figure 3.6 présente la caractéristique de transfert idéale pour une entrée sur 3 bits.

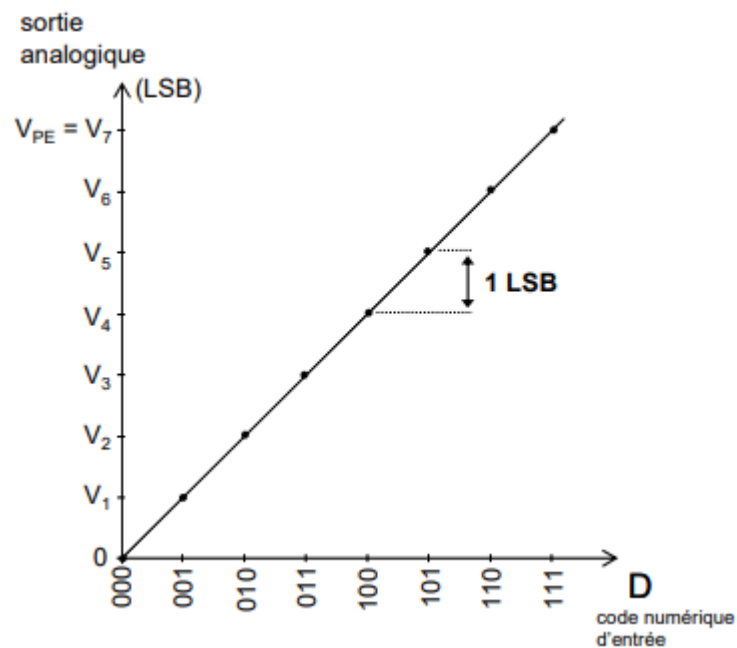


Fig 3.6. Caractéristique de transfert idéale d'un CNA 3 bits.

On définit le LSB, ou quantum, comme étant la plus petite variation possible de la tension de correspondant à un changement du bit de poids faible :

$$1\text{LSB} = V_{PE} / (2^N - 1) = V_{ref} / 2^N$$

La fig 3.7 illustre la conversion N/A d'une série de mots binaires (i) pour $N = 3$.

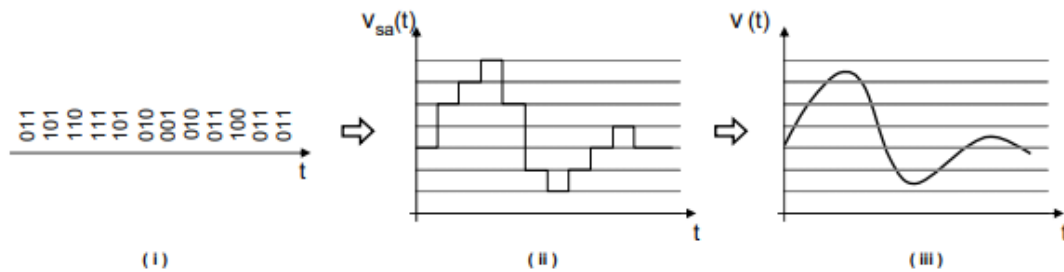


Fig 3.7. Exemple de conversion pour un CNA 3 bits.

La sortie analogique $v_{sa}(t)$, est quantifiée. On ajoute parfois en sortie du CNA un filtre analogique passe-bas ou filtre de lissage.

4. Simulation avec le logiciel Simulink/Matlab

Dans cette partie, nous présenterons le modèle de simulation de la charge électronique à base de transistor MOSFET pour le traçage des courbes caractéristique d'un GPV, afin de valider le choix des composants du système à réaliser.

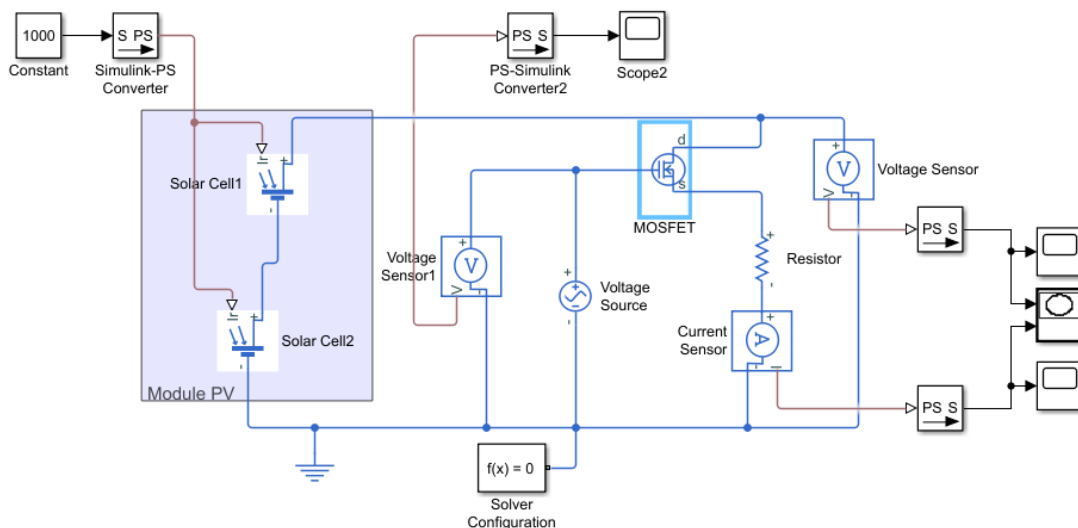


Fig. 3.8 : Simulation en matlab

Pour ce faire, nous allons utiliser le logiciel Simulink avec le toolbox SimElectronics qui permet de faire des simulations plus élaborées des circuits électroniques

Le modèle de simulation comporte 3 parties :

- Un module photovoltaïque : un ensemble de 40 cellules en série avec une tension $V_{co} = 24V$ et $I_{cc} = 7.35A$ sous les conditions de test standard.
- Un générateur de tension pour balayer la tension V_{gs} de 0 à V_{gsmax} .
- Un MOSFET qui permet de tirer le courant du GPV proportionnellement à la tension V_{gs}

5. Choix du MOSFET

Comme cité précédemment, le choix des MOSFET est le point crucial au bon fonctionnement de la charge. Ils doivent satisfaire aux contraintes de puissance et disposer d'une zone de fonctionnement permettant de couvrir l'ensemble des points de la caractéristique des GPV que nous voulons caractériser. Les caractéristiques typiques d'un GPV donnée par le fabricant comprennent généralement les données mesurées dans les conditions standards : V_{MPP} , I_{MPP} , P_{MPP} , I_{cc} et V_{oc} .

Dans la suite de cette section nous allons présenter les différentes simulations qui permettent de choisir le meilleur MOSFET pour la réalisation du système de caractérisation visé.

5.1 MOSFET N°1 IRFZ44

Tab.1 :Caractéristiques électriques de MOSFET IRFZ44

PRODUCT SUMMARY		
$V_{DS}(V)$	60	
$R_{DS(on)}(\Omega)$	$V_{GS} = 10V$	0.028
I_{DS}	50A	
Configuration	Single	

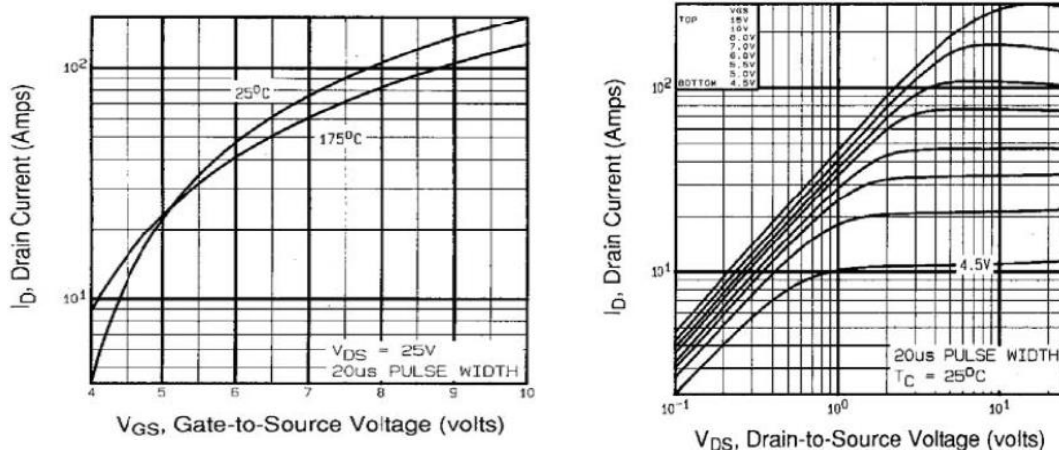


Fig 3.9. Caractéristiae électrique du Mosfet IRFZ44

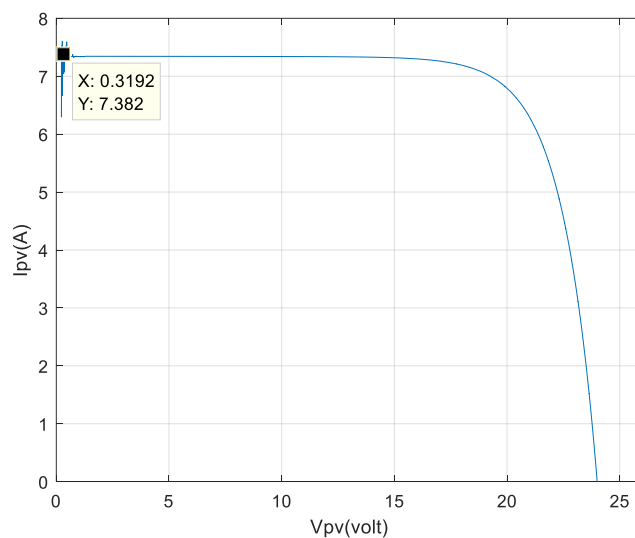


Fig 3.10. Résultat de simulation du caractériser avec le MOSFET IRFZ44

5.2 MOSFET N°2 IRF520

Tab.1 :Caractéristiques électriques de MOSFET IRFZ44

PRODUCT SUMMARY	
$V_{DS}(V)$	100
$I_D(A)$	9.2
$R_{DS}(\Omega)$	0.27 à $V_{GS} = 10V$
V_{GS}	10
Configuration	Single

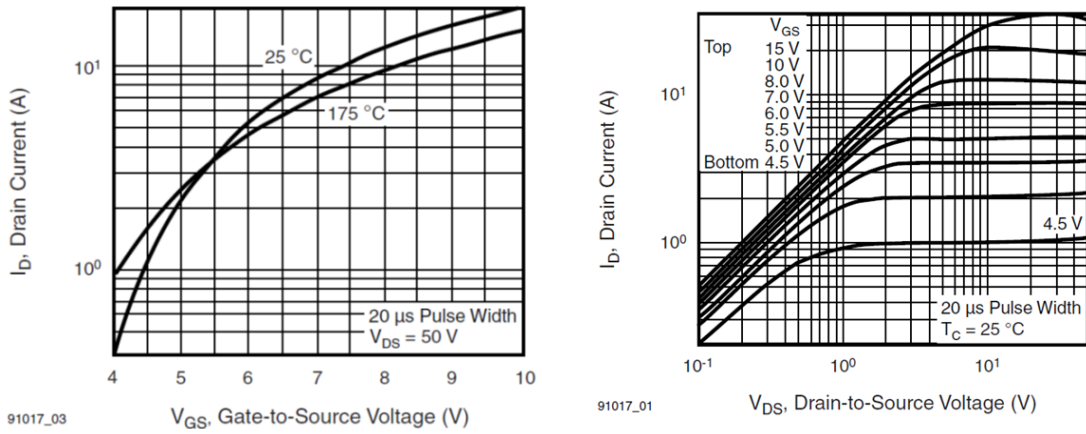


Fig 3.11. Caractéristique électrique du MOSFET IRF520

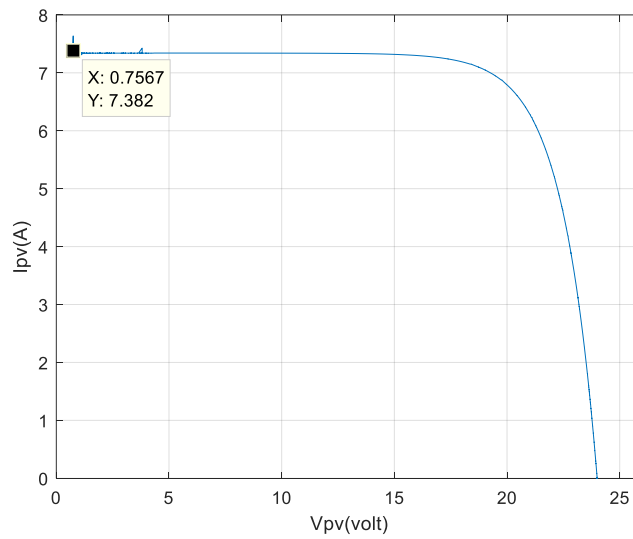


Fig 3.12. Résultat de simulation du caractériser avec le MOSFET IRF520

5.3 MOSFET N°3 IRF840

Tab 4. Caractéristique électrique du MOSFET IRF840

PRODUCT SUMMARY		
$V_{DS}(V)$	500	
$R_{DS(on)}(\Omega)$	$V_{GS} = 10V$	0.85
$I_{DS}(A)$		
Configuration	Single	

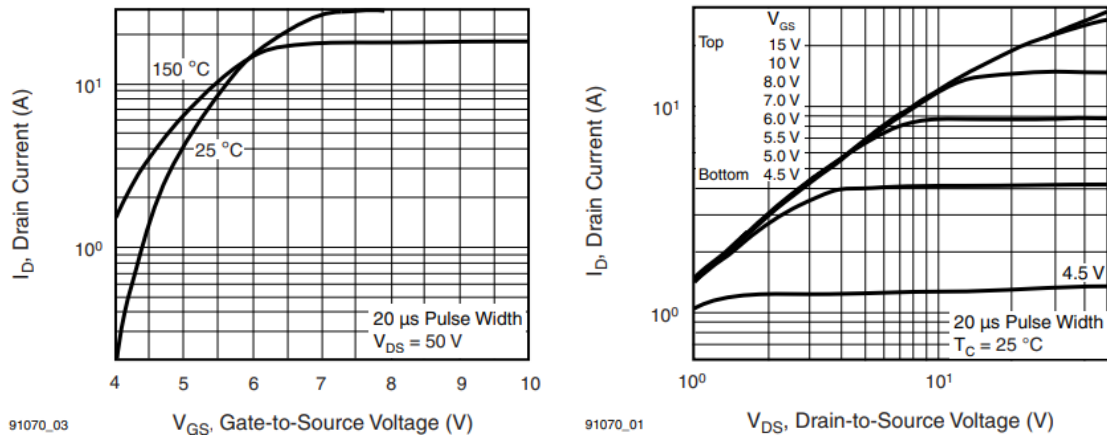


Fig 18. Caractéristique électrique du MOSFET IRF840

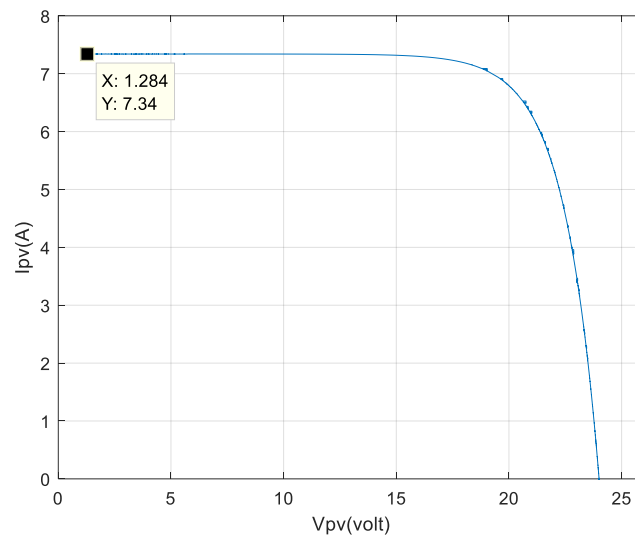


Fig 3.12. Résultat de simulation du caractériser avec le MOSFET IRF840

5.4 MOSFET N°4 SUD40N06

Tab 5. Caractéristique électrique de MOSFET SUD40N06

PRODUCT SUMMARY		
$V_{DS}(V)$	$r_{DS(on)}(\Omega)$	$I_D (A)^a$
60	0.022@ $V_{GS} = 10V$	30
	0.025@ $V_{GS}=4.5V$	30

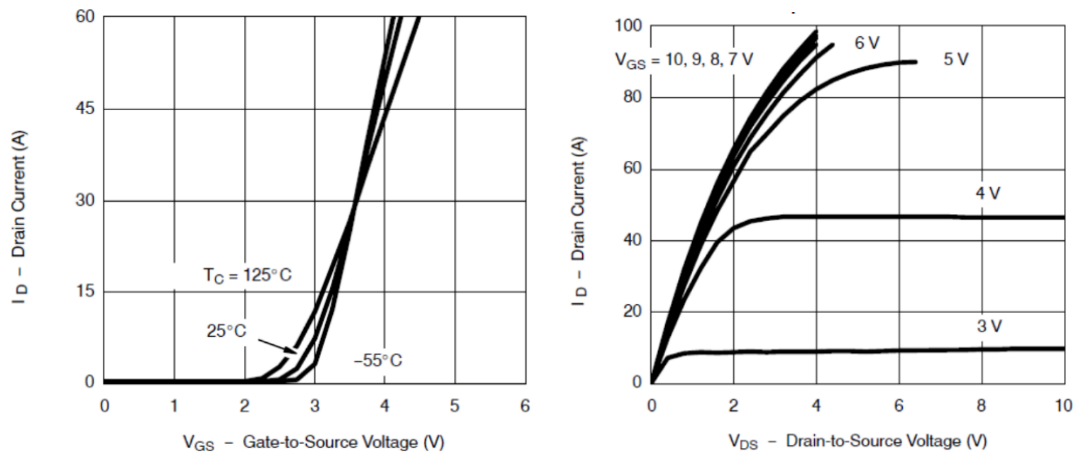


Fig 20. Caractéristiques électriques du MOSFET SUD40N06

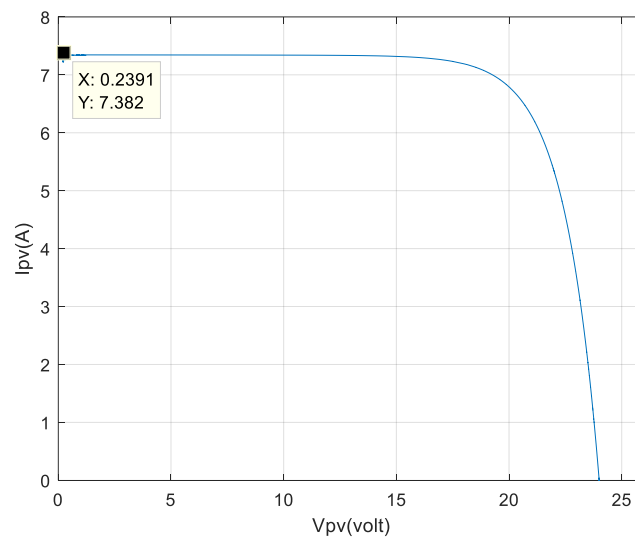


Fig 3.12. Résultat de simulation du caractériser avec le MOSFET SUD40N

5.5 MOSFET N°5 STB10N65K3

Tab6.Caractéristique électrique du Mosfet STB10N65K3

Order codes	V_{DS}	$R_{DS(on)}^{max}$	I_D	P_{TOT}
STB10N65K3	650V	1Ω	10A	150W
STF10N65K3				35W
STFI10N65K3				
STP10N65K3				150W

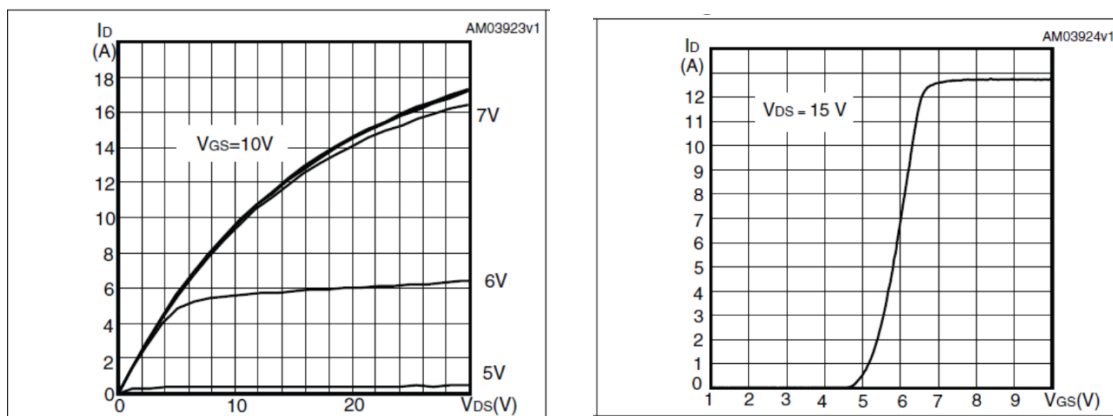


fig. 22. Caractéristique électrique du MOSFET STB10N65K3

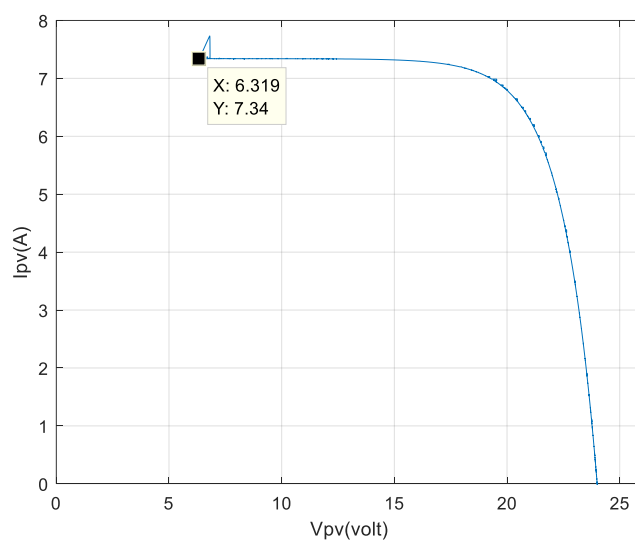


Fig 3.12. Résultat de simulation du caractériser avec le MOSFET STB10N65K3

6. Récapitulatifs

	MOSFET1	MOSFET2	MOSFET3	MOSFET4	MOSFET5
$V_{DS}(V)$	60	100	500	60	650
$R_{DS(on)}(\Omega)$	0.028	0.27	0.85	0.022	1
$I_{DS}(A)$	50	9.2	8	30	10
$V_{GS}(V)$	10	10	10	10	30
Tension minimale de balayage (V)	0.31	0.75	1.28	0.23	6.31

Dans les simulations des figures précédentes nous avons choisi qui ont donné de meilleurs résultats pour avoir de bonnes courbes qui représente les caractéristique I-V/PV d'un module PV

7. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre la description du système de test des dispositifs photovoltaïques, notre système est une charge électronique qui permet de balayer la caractéristique d'un GPV. Ce système est basé sur l'utilisation de MOSFET de puissance. Nous avons exécuté un nombre important de simulation sous Matlab qui nous ont permis de choisir le meilleur MOSFET qui sera le mieux adapté à notre cahier des charges.

CHAPITRE

04

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 charge électronique MOSFET 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.

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.

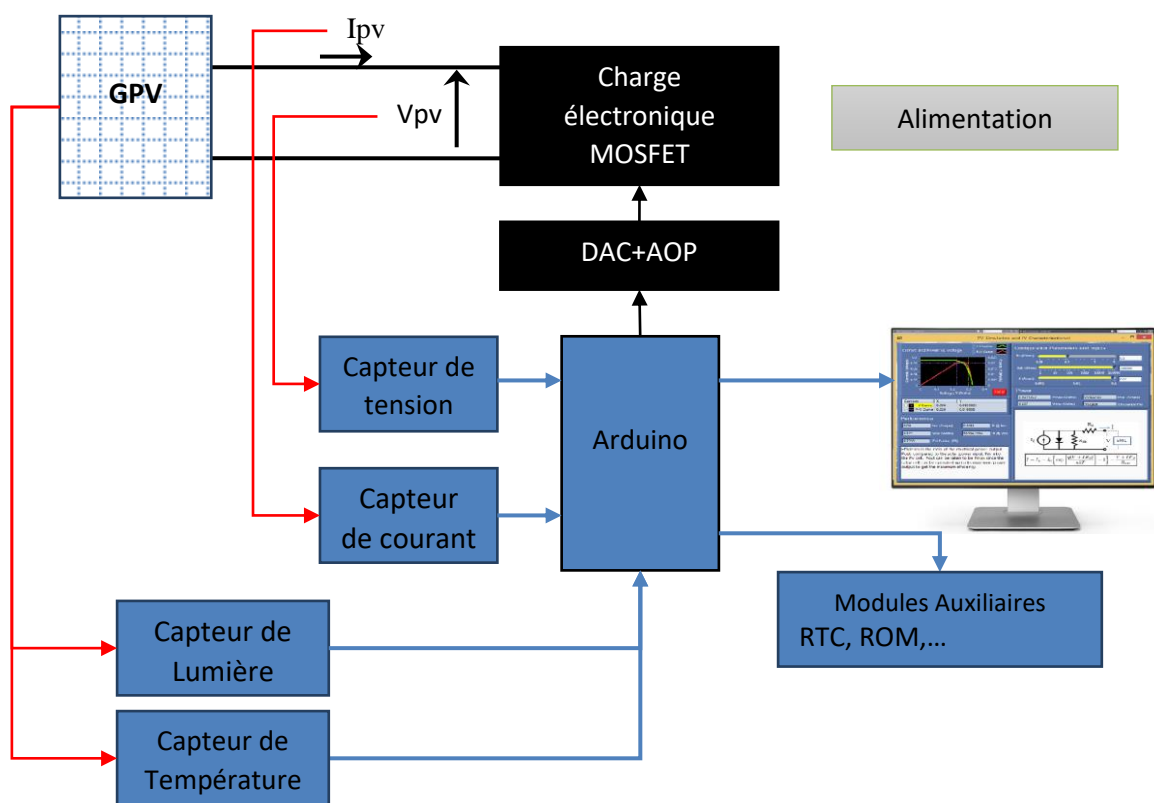


Fig 4.1. Schéma synoptique du système

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.

3. Description du système

Les éléments essentiels de notre travail, qui consiste en partie à l'acquisition de données à mesure la tension et le courant, l'éclairage et 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.

3.1. MOSFET (SUD40N06)

3.2. Convertisseur numérique analogique DAC0808

3.3. Amplificateur AOP 741

3.4. Alimentation

3.5. 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.

3.5.1. 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 $\pm 5A$, ± 20 et ± 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 (Fig 4.2), ce capteur permet de mesurer un courant allant de $-20A$ à $+20A$ avec une sensibilité de $180mV/A$.

➤ **Caractéristiques :**

- ACS712ELC--20B (version pour 20A),
- 5 μ 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,
- 2.1 kVrms tension d'isolation minimum
- 5,0 VDC, tension d'alimentation
- La tension de sortie proportionnelle aux courants AC ou DC

3.5.2. 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 inférieure à 5V, c'est pour cette raison qu'on utilise un diviseur de tension qui permet d'adapté la tension du GPV à la tension max accepté par le microcontrôleur.

Les tensions du diviseur sont reliées à la tension d'alimentation de 5V et à la masse d'un côté et à deux résistances de $R1=30k\Omega$ et $R2=7.5k\Omega$ d'un autre côté (Fig 4.3).

3.6. 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.

3.6.1. 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 μ V 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%.

3.6.2. 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. La figure ci-dessous illustre les module MAX6675 avec une sonde thermocouple de type K.

Tab 1: 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)	$\pm 3^\circ\text{C}$
Résolution	0.25°C
Courant consommé	1.5mA

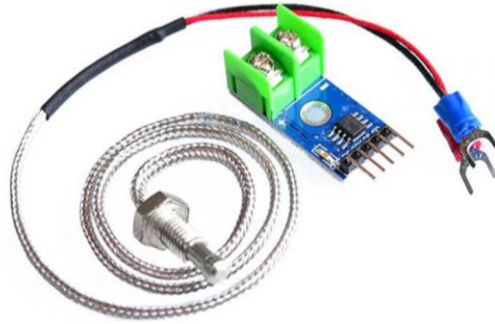


Fig 4.4 : Carte d'un capteur de température MAX6675.

3.7. 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 photorésistances et des photodiodes.

3.7.1. 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. À l'inverse d'une LED (diode électroluminescente), qui produit de la lumière, la photodiode utilise de la lumière pour réaliser une fonction spécifique.

À 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.

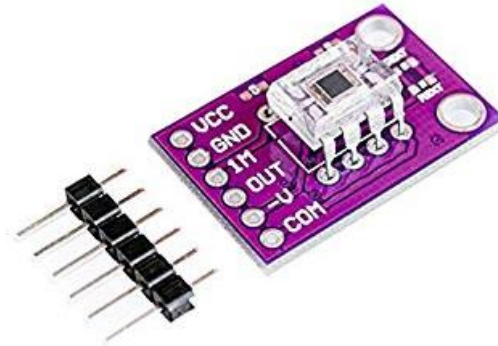


Fig 4.5 : capteur de lumière OPT101.

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.

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.

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.

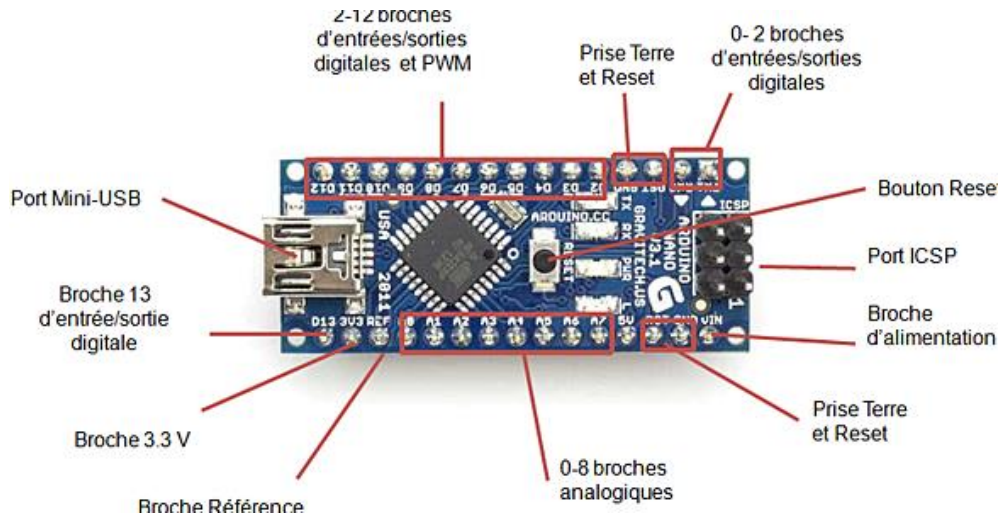


Fig 4.7 Carte microcontrôleur Arduino Nano

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 carte 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.

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 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

5. 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.

5.1. Schéma du système électronique

L'architecture de base que nous avons utilisé pour la conception du testeur de module PV est représenté sur la fig 4.8. , 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 : charge électronique MOSFET
- 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 : interface série RS232.

5.2. Simulation

Pour effectuer les simulations nécessaires pour valider le fonctionnement du système, nous devons utiliser le schéma illustré dans la fig 4.8. et nous devons programmer la carte Arduino avec un programme ARDUINO IDE qui reprend les le fonctionnement et le comportement de l'organigramme déjà présenté. Le programme génère un signal numérique on va convertir à un signal analogique par DAC amplifié pour alimenter la Gachet de MOSFET.

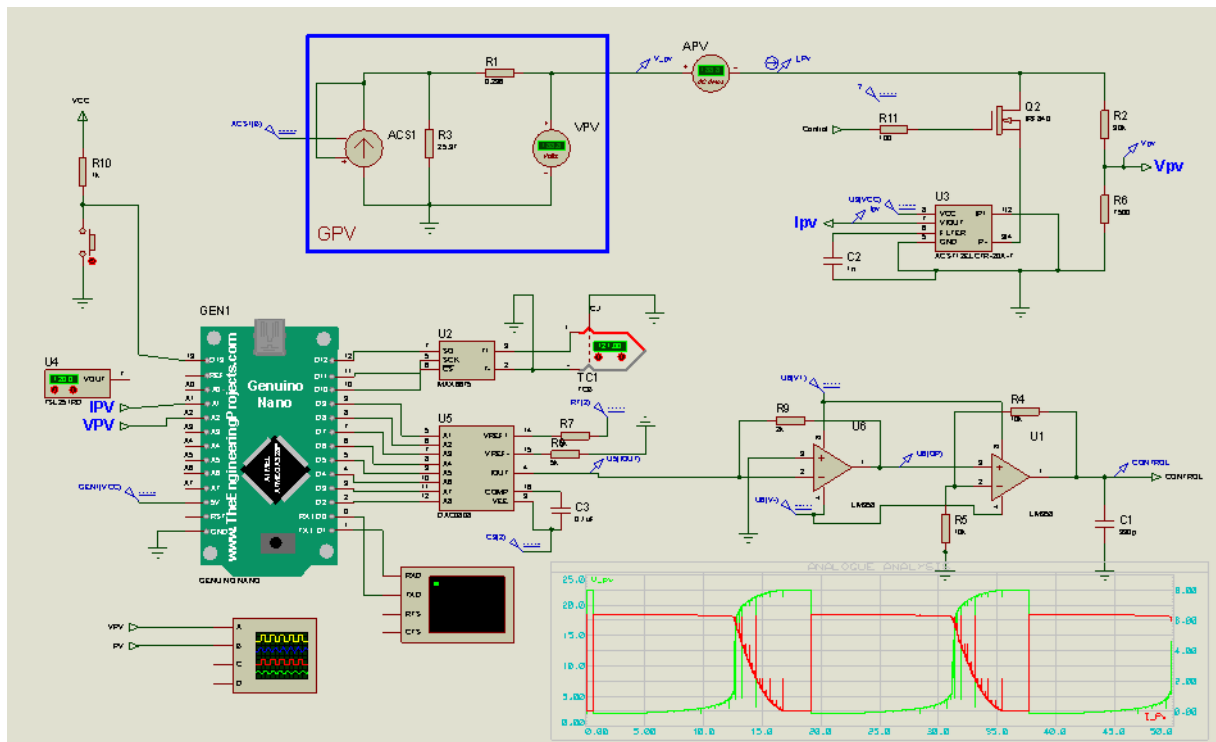


Fig 4.8 Schéma Proteus du testeur de module PV

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.

5.3. Algorithme

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.

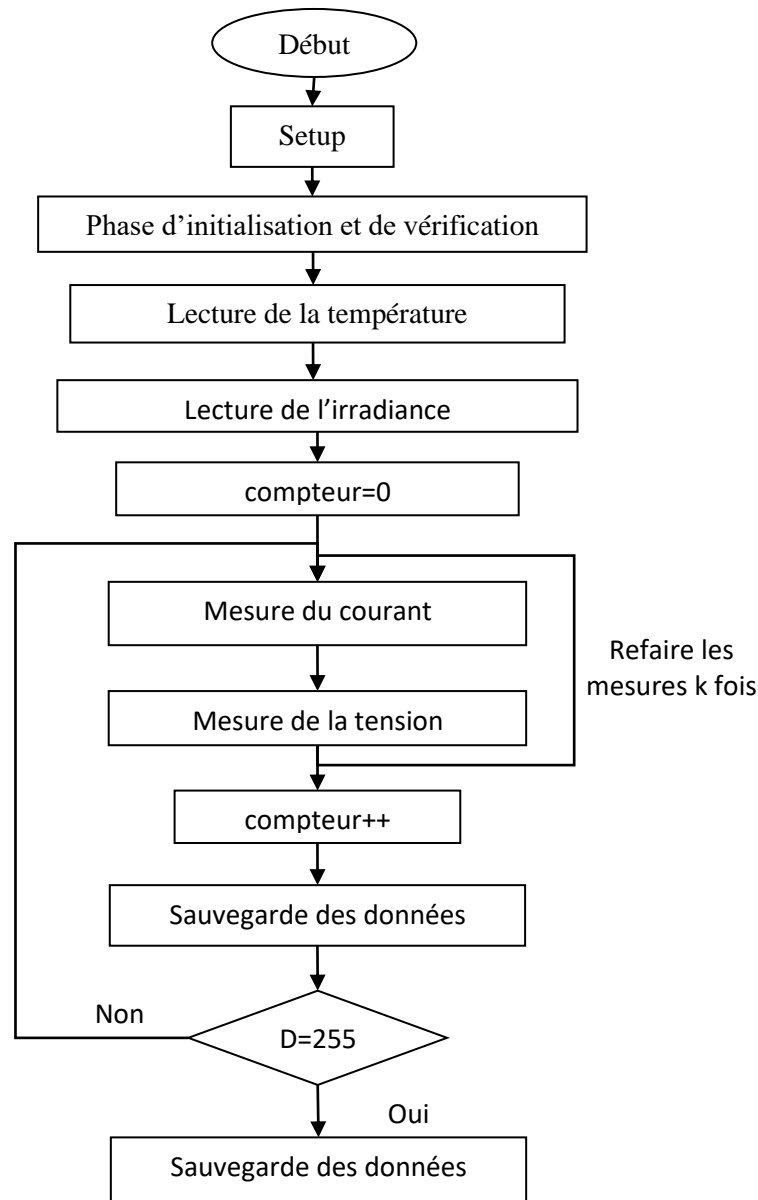


Fig 4.9 Organigramme du fonctionnement teste de caractéristiques panneaux photovoltaïques.

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 numérique avec un cycle bien défini et des temps d'établissement adéquat pour permettre d'effectuer les mesures nécessaires correctement et de manière rapide.

En utilisant un CAN de 8bits, nous sommes limité à 255 point de la tension V_{gs} , nous utilisons dans le programme Arduino un compteur qui compte de 0 à 255 est qui génère un signal numérique qui permet au DAC0808 de générer un tension linéaire de 0V à 5V. cette tension est ensuite amplifiée pour correspondre à V_{gs} du MOSFET choisi.

Les mesures de courant et de tension sont effectuées 'k' fois à chaque pas du compteur, ces 'k' mesures permettent d'avoir une valeur moyenne ce qui permet d'avoir une meilleure précision.

6. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les éléments nécessaires à la conception et à la réalisation d'un système de caractérisation pour module photovoltaïque de faible puissance. Nous avons présenté les éléments constituant le système, 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

Conclusion générale

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

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres :

D'abord, dans le premier chapitre nous nous sommes intéressés au diagnostic des générateurs photovoltaïques, nous avons commencé par une présentation de ces systèmes de production leurs différents composants et nous décrivons le principe de fonctionnement des cellules solaires ainsi que leurs caractéristiques IV/PV.

Dans le second chapitre nous avons présentée principalement les différentes méthodes de caractérisation des panneaux photovoltaïques.

Ensuite, dans le troisième chapitre nous avons présenté les meilleurs résultats de la simulation qui présente les caractéristiques IV/PV d'un module photovoltaïque. Ceci nous a permis de choisir le meilleur MOSFET le plus adapté à notre cahier des charges.

Enfin, dans le dernier chapitre à partir de mesure de radiation, courant, tension, température nous avons créé un programme qui génère un signal numérique converti par le DAC en un signal analogique amplifié pour alimenter le MOSFET de la charge électronique, nous avons pu réaliser et valider les simulations nécessaires sur le logiciel de simulation électronique PROTEUS.

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

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

RÉFÉRENCE

BIBLIOGRAPHIE

Référence bibliographie

- [1] A. Zerga, „Optimisation du rendement d’une cellule solaire à base de silicium monocristallin de type n+p”, Mémoire de Magistère Tlemcen-1998.
- [2]. Mr. BENHAMADOUCHE Abdelouahab. Conception d’un caractériser autonome pour panneau photovoltaïque. NADIR CHEYMA / LAKHNACHE CHAHRA-ZAD. UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M’SILA. Année universitaire : 2019/2020.
- [3] - B.Azoui «Concept and realisation of a three phase Brushless DC Motor (BLDCM) for solar application », Thesis of doctorat of science, University of Batna 2002.
- [4] - **B.Equer** « Le Pompage Photovoltaïque Manuel de cours », énergie solaire photovoltaïque ellipses 1993
- [5] - **Y. Bakelli** « Étude et dimensionnement d’un convertisseur statique pour la connexion d’un générateur photovoltaïque » mémoire de magister , Université de Boumerdes 2005
- [6].lycée des métiers de l’énergie de métallurgie et de la vente .jean caillaud.ruelle sur touvre.
- [7] Nichapour OleKsiy (simulation, fabrication et analyse de cellule photovoltaïque à contacte arrières interdigités), Thèse de doctorat. L’institut national des sciences appliquées de Lyon 2005.
- [8] .E. Durán, M. Piliouguine, M. Sidrach-de-Cardona, J. Galán, J.M. Andújar Department of Electronic Engineering, Computer Systems and Automatics - University of Huelva (Spain).
Tlf: +34 959 217655, Fax: +34 959 217348, e-mail: {aranda, jgalan, [andujar](mailto:andujar@uhu.es)}@uhu.es
Department of Applied Physics II - University of Málaga (Spain). Tlf: +34 952132772/22, Fax: +34 952131450, e-mail: {michel, [msidrach](mailto:msidrach@ctima.uma.es)}@ctima.uma.es
- [9] Dang Minh Trung « Elaboration de cellules solaires photovoltaïques a base de polymères conjugués, études des systèmes reticulables ». Thèse de doctorat, Université Bordeaux1, 2009.
- [10] Vighetti Stéphane « Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion ». Thèse de doctorat, Université Grenoble, Institut polytechnique de Grenoble, 2010.
- [11] A.Q. Malik, S.J. Bin Haji Damit, "Outdoor testing of single crystal silicon solar cells ", Renewable Energy, 28, 2003, pp. 1433-1445
-

Référence bibliographie

- [12] 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
- [13] E.E. Van Dyk, A.R. Gxasheka, E.L. Meyer, "Monitoring current-voltage characteristics of photovoltaic modules", *IEEE PVSC*, 2002, pp. 1516-1519.
- [14] 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
- [15] 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.
- [16] J. Muñoz, E. Lorenzo, "Capacitive load based on IGBTs for on-site characterization of PV arrays ", *Solar Energy*, 80, 2006, pp. 1489-1497.
- [17] Y. Kuai, S. Yuvarajan, "An electronic load for testing photovoltaic panels", *Journal of Power Sources*, 154, 2006, pp. 308-313.
- [18] N. Forero, J. Hernández, G. Gordillo, "Development of a monitoring system for a PV solar plant", *Energy Conversion & Management*, 47, 2006, pp. 2329-2336.
- [19] J. Salmon, R. Phelps et al., "Solar cell measurement system for NPS Spacecraft Architecture and Technology Demonstration Satellite NPSAT1", 17th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2003.
- [20] M.G. Gunvench, C. Gurcan et al., "Solar simulator and I-V measurement system for large area solar cell testing", *Proceedings of the 2004 American Society for Engineering Education Annual Conference & Exposition*, 2004.
- [21] L.A. Hecktheuer, A. Krenzinger, C.W.M. Prieb, "Methodology for photovoltaic modules characterization and shading effects analysis "; *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*, 24(1), 2002.
- [22] J. Fernández-Reche, I. Cañadas et al., "PSA Solar furnace, A facility for testing PV cells under concentrated solar radiation", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 90, 2006, pp. 2480-2488
- [23] M. A. de Blas, J. L. Torres, E. Prieto, A. García, "Selecting a suitable model for characterizing photovoltaic devices", *Renewable Energy*, 25, 2002, pp. 371-380.
- [24] F. Granek, T. Zdanowicz, "Advanced system for calibration and characterization of solar cells", *Opto-Electronics Review*, 12(1), 2004, pp. 57-67.
-

Référence bibliographie

- [25] J.M. Andújar E. Durán et al., "Automatic generation system for I-V curves and monitoring of PV modules" (in Spanish), XXV Jornadas de Automática, 2004.
- [26] J.M. Enrique, E. Durán, M. Sidrach-de-Cardona, J.M. Andújar, M.A. Bohórquez, J.E. Carretero, "A new approach to obtain I-V and P-V curves of PV panels by using DC-DC converters", 31st IEEE PVSC, 2005, pp. 1769-1772.
- [27] E. Durán, J. Galán, M. Sidrach-de-Cardona, J.M. Andújar, "A new Application of the Buck-Boost-Derived Converters to obtain the I-V curve of PV Modules", 38th IEEE PESC, 2007, pp. 413-417.
- [28] E. Durán, J.M. Enrique, M.A. Bohórquez, M. Sidrachde- Cardona, J.E. Carretero, J.M. Andújar, "A new Application of the Coupled-Inductors SEPIC Converter to obtain I-V and P-V Curves of Photovoltaic Modules", 11th EPE, 2005.
- [29] E. Durán, J. Galán, M. Sidrach-de-Cardona, "Interleaved DC-DC converters to obtain the I-V characteristic curve of PV modules", 22th Eur. Phot. Solar Energy Conference, 2007, pp. 318-321.
- [30] M.A. Bohórquez, J.M. Enrique, E. Durán, M. Sidrachde- Cardona, J.E. Carretero, J.M. Andújar, "Analysis and monitoring of failures in PV panels by means of I-V and P-V curves using DC-DC converters", WREC 2005, 2005, pp. 477-483.
- [31] M.C. Di Piazza, C. Serporta, G. Vitale, "A DC-DC Converter Based Circuit Model for a Solar PV Array", 21th Eur. Phot. Solar Energy Conference, 2006, pp. 2726- 2731.
- [32] H. Matsuo, F. Kurokawa, "New Solar Cell Power Supply System Using a Boost Type Bidirectional DC-DC Converter", IEEE Trans. Ind. Electron., 1, 1984, pp. 51-55.
- [33] P. Sanchis, I. Echevarría et al., "Electronic Converter for the Analysis of PV Arrays and Inverters", 33th IEEE PESC, 2003, pp. 1748-1753.
- [34] P. Sanchis, J. López et al., "Electronic Controlled Device for the Analysis and Design of Photovoltaic Systems", IEEE Power Electronics Letters, 3, 2005, pp. 1748-1753.
- [35] L. Marroyo, P. Sanchis et al., "Equipment for the Analysis of the Maximum energy of Real Photovoltaic Systems", IEEE ISIE, 2005, pp. 1031-1036.
- [36] M. Kazerani, "A High-Performance Controllable DCLoad"; IEEE ISIE, 2007, pp. 1015-1020.
- [37] O. N. A. Esmail, E. T. El Shenawy, Adel A. Elbaset and Hesham F. A. Hamed, —Design and practical implementation of a data acquisition system for photovoltaic applications,|| Journal of Applied Sciences Research, vol.9 (8), pp. 4856-4866, 2013.
- [38]<https://www.journaldunet.fr/web-tech/dictionnaire-de-l-iot/1440684-microcontrolleur-definition-et-composants/>
-

Référence bibliographie

[39]<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/930/1/012049/pdf>

[40] <https://riverglennapts.com/ar/current-voltage/240-voltage-divider.html>

[41]<http://perso.wanadoo.fr/xcotton/electron/coursetdocs.htm>.

[42]This datasheet is subject to change without notice.

THE PRODUCT DESCRIBED HEREIN AND THIS DATASHEET ARE SUBJECT TO SPECIFIC DISCLAIMERS, SET FORTH AT www.vishay.com/doc?91000

[43]For technical questions, contact: hvm@vishay.com THIS DOCUMENT IS SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE. THE PRODUCTS DESCRIBED HEREIN AND THIS DOCUMENT ARE SUBJECT TO SPECIFIC DISCLAIMERS, SET FORTH Atwww.vishay.com/doc?91000

[44]Document Number: 70264 S-50281—Rev. I, 21-Feb-05 www.vishay.com

[45] www.st.com

[46]Canada Facility 20 000 Stewart Crescent Maple Ridge, BC, Canada, V2X 9E7
Tel:1-604-466-6654Fax:1-604-466-6600<mailto:molicel@molicel.com>
<http://www.molicel.com>

[47]<https://www.techno-science.net/definition/3227.html>

[48]https://stringfixer.com/fr/Voltage_regulator

[49] X. You, Y. Wang, « Massive MIMO channel modeling », Departement of Electrical and Information Technology, Lund University, Suède, Décembre 2015
