

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Ziane Achour de Djelfa  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département Génie Électrique  
Filière Énergies Renouvelables  
Spécialité Énergies Renouvelables en Électrotechnique



Support de cours

NIVEAU

MASTER ÉNERGIES RENOUVELABLES EN ÉLECTROTECHNIQUE

---

# LES SYSTÈMES DE CONVERSION DE L'ENERGIE PHOTOVOLTAÏQUE

*Modélisation, Simulation, Commande MPPT et Dimensionnement*

---

Préparé par :  
**Dr. TOUAL Belgacem**

Année Universitaire  
**2021-2022**

---

# PRÉFACE

Ce support de cours s'adresse aux étudiants Master Energies Renouvelables en Electrotechnique. Il consiste à donner un aperçu sur l'énergie Photo-Voltaïque (PV), la modélisation des générateurs PVs, leur simulation, leur commande MPPT et leur dimensionnement. En partant des généralités sur l'énergie PV reflétant la présentation des ressources solaires, des cellules PVs et des avantages et des inconvénients de cette énergie, ce document expose à la suite les différents modèles mathématiques des cellules PVs ainsi qu'une simulation d'un parmi eux.

La troisième partie de ce document, vise après l'exposition des convertisseurs DC/DC utilisés aux systèmes PVs et leurs modélisations ainsi que leurs simulations, à présenter le principe de la commande MPPT des systèmes PVs en focussant plus deux techniques très utilisées qui sont la technique perturbation-observation et la technique incrémentation de la conductance.

A la suite une dernière partie, touche par l'étude le dimensionnement arithmétique des systèmes PVs d'usage domestique ainsi que le dimensionnement par abaque des systèmes de pompage.

---

# TABLE DES MATIÈRES

## 1 Généralités sur l'énergie

<b>photovoltaïque</b>	<b>1</b>
1.1 Introduction . . . . .	1
1.2 Ressources solaires . . . . .	1
1.2.1 Le soleil . . . . .	1
1.2.2 Rayonnement solaire . . . . .	2
1.3 Cellules photovoltaïques . . . . .	4
1.3.1 L'effet photovoltaïque . . . . .	4
1.3.2 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque . . . . .	4
1.3.3 Technologies des cellules photovoltaïques . . . . .	5
1.4 Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque . . . . .	7
1.4.1 Avantages . . . . .	7
1.4.2 Inconvénients . . . . .	8

## 2 Modélisation d'un générateur

<b>Photovoltaïque</b>	<b>9</b>
2.1 Paramètres électriques de la cellule photovoltaïque . . . . .	9
2.1.1 Courant de court-circuit, $I_{cc}$ . . . . .	9
2.1.2 Tension de circuit ouvert, $V_{co}$ . . . . .	9
2.1.3 La courbe courant -tension . . . . .	10
2.1.4 La courbe puissance -tension . . . . .	10
2.1.5 Facteur de forme, FF . . . . .	11
2.1.6 Rendement de conversion, $\eta$ . . . . .	12
2.2 Modélisation des cellules photovoltaïques . . . . .	12
2.2.1 Modèle à une diode . . . . .	12
2.2.2 Modèle à deux diodes . . . . .	14
2.3 Simulation d'un générateur PV sous MATLAB-SIMULINK . . . . .	16
2.3.1 Paramètres du module utilisé . . . . .	16
2.3.2 Schémas bloc de simulation . . . . .	16
2.3.3 Caractéristiques du module pv . . . . .	19

2.3.4	Les effets des conditions climatiques sur les caractéristiques d'un module photovoltaïque . . . . .	20
<b>3</b>	<b>Commande MPPT</b>	<b>23</b>
3.1	Couplage directe source PV-charge . . . . .	23
3.2	Adaptation de la charge . . . . .	24
3.3	Les convertisseurs DC/DC (hacheurs) . . . . .	25
3.3.1	Hacheur survolteur (Boost) . . . . .	26
3.3.2	Simulation du convertisseur Boost . . . . .	26
3.4	Principe de la commande MPPT . . . . .	28
3.5	Les différentes techniques de la commande MPPT . . . . .	29
3.5.1	Méthode perturbation et observation P&O . . . . .	29
3.5.2	Méthode incrémentation de la conductance . . . . .	35
<b>4</b>	<b>Dimensionnement des systèmes photovoltaïques</b>	<b>39</b>
4.1	Cours par problème . . . . .	39
4.1.1	L'éclairage et l'usage domestique . . . . .	41
4.1.2	Le pompage de l'eau potable . . . . .	43
	<b>Références</b>	<b>45</b>

---

# GÉNÉRALITÉS SUR L'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE

## 1.1 INTRODUCTION

Il ne fait aucun doute que le soleil est une source d'énergie connue depuis l'Antiquité. C'est pourquoi, depuis des siècles, l'homme cherche des moyens d'exploiter cette énergie. Parmi les moyens les plus connus " le photovoltaïque".

L'énergie photovoltaïque est l'un des enjeux de la politique énergétique du notre siècle, qui résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique, au moyen d'une photopile [1]. La révolution des semi-conducteurs a conduit à un développement technologique important dans divers domaines. Pour l'énergie photovoltaïque, cela a conduit à la fabrication de cette photopile, qu'on appelle aussi, cellule solaire [2].

## 1.2 RESSOURCES SOLAIRES

### 1.2.1 LE SOLEIL

Le soleil reste jusqu'à présent la plus importante source d'énergie, malgré la distance considérable qui le sépare de la terre (149.6 x 10<sup>6</sup> de kilomètres). Il s'agit d'une immense sphère lumineuse composée principalement de gaz ionisé, et du plus grand corps céleste du système solaire. Il est si grand qu'il pourrait contenir plus d'un million de planètes Terre [3].

La puissance émise par le soleil sous forme de rayonnement est estimée à  $90 \times 10^{15}$  GW, alors que la couche terrestre n'arrive à recevoir que  $180 \times 10^6$  GW. Arrivant à la terre, le rayonnement solaire subit de considérables modifications, dues principalement aux phénomènes d'absorption et de diffusion. De là, on introduit la notion de l'éclairement comme étant la densité de puissance reçue par une surface soumise à un flux lumineux, dans les conditions atmosphériques optimales. Cette densité de puissance atteinte  $1 \text{ kW/m}^2$  pour un site situé au niveau de la mer [4].

L'Algérie dispose d'environ 3200 heures d'ensoleillement par an, bénéficiant d'une situation climatique favorable à l'application des techniques solaires [5].

Cette énergie est disponible en abondance sur toute la surface terrestre, et malgré une atténuation importante lorsqu'elle traverse l'atmosphère, la quantité qui reste est encore assez importante quand elle arrive au sol.

### 1.2.2 RAYONNEMENT SOLAIRE

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique, compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10 ( $\mu\text{m}$ ). La figure (1.1) représente la variation de la répartition spectrale énergétique. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement au :

- 9% dans la bande des ultraviolets ( $<0,4 \mu\text{m}$ ),
- 47% dans la bande visible ( $0,4 \text{ à } 0,8 \mu\text{m}$ ),
- 44% dans la bande des infrarouges ( $>0,8 \mu\text{m}$ ).

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de 1,37 kilowatt par mètre carré ( $\text{kW}/\text{m}^2$ ), à plus ou moins 3 %, selon que la terre s'éloigne ou se rapproche du soleil dans sa rotation autour de celui-ci. L'atmosphère absorbe toutefois une partie, de sorte que la quantité d'énergie atteint la surface terrestre dépasse rarement  $1,2 \text{ kW}/\text{m}^2$  ( $1200 \text{ W}/\text{m}^2$ ). La rotation et l'inclinaison de la terre font également que l'énergie disponible en un point donné, varie selon latitude, l'heure et la saison. Enfin, les nuages, le brouillard, les particules atmosphériques et divers autres phénomènes météorologiques, causent des variations horaires et quotidiennes qui tantôt augmentent, tantôt diminuent le rayonnement solaire et le rendent diffus [6].

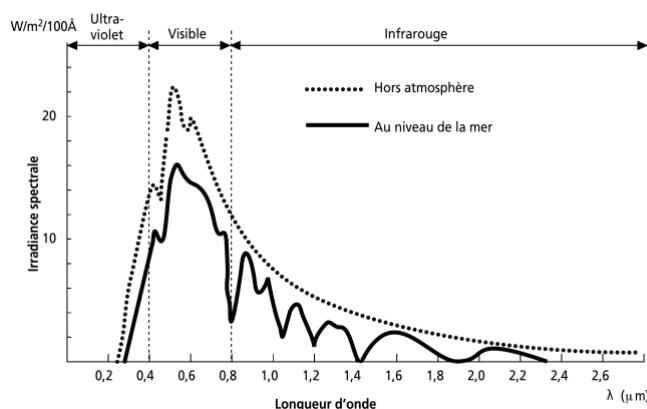


FIGURE 1 – Analyse spectrale de rayonnement solaire [6].

Ainsi, le rayonnement solaire nous arrive au sol sous deux formes :

- Rayonnement direct issu du disque solaire. On le mesure en le faisant arriver perpendiculairement à la surface du capteur.
- Rayonnement solaire diffus, provenant de toute la voûte céleste après diffusion par les constituants de l'atmosphère

La somme du rayonnement direct et diffus définit le rayonnement global sur une surface plane qui est souvent horizontale.

On utilise la notion *AM* pour « Air Mass » afin de caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise [7]. Elle correspond également à la perte de l'énergie solaire par l'absorption atmosphérique. Ainsi, lorsque le soleil est au zénith, cela correspond à *AM1* comme illustré sur la figure (1.2). Pour une position du soleil à  $30^\circ$  par rapport à l'horizontal, on aura *AM2*. Lorsque le soleil est à une position de  $48^\circ$  par rapport à l'horizontal, cela correspond à *AM1.5*. Par convention, *AM0* désigne le rayonnement solaire hors atmosphère. Lorsque le rayonnement solaire traverse l'atmosphère, il subit une atténuation et une modification de son spectre, à la suite de phénomènes d'absorption et de diffusion dans les gaz, l'eau et les poussières. Ainsi, la couche d'ozone absorbe une partie du spectre lumineux provenant du soleil, et en particulier une partie des ultraviolets dangereux pour la santé. Le rayonnement solaire direct reçu au niveau du sol (à  $90^\circ$  d'inclinaison) atteint  $1000 \text{ W/m}^2$  du fait de l'absorption dans l'atmosphère (*AM1*). Cette valeur change en fonction de l'inclinaison des rayons lumineux par rapport au sol. Plus l'angle de pénétration  $\theta$  des rayons lumineux (voire figure 1.2) est faible, plus l'épaisseur atmosphérique que les rayons auront à traverser sera grande, d'où une perte d'énergie conséquente. Par exemple, l'énergie directe transportée par le rayonnement solaire atteignant le sol avec un angle de  $48^\circ$  avoisine les  $833 \text{ W/m}^2$  (*AM1.5*).

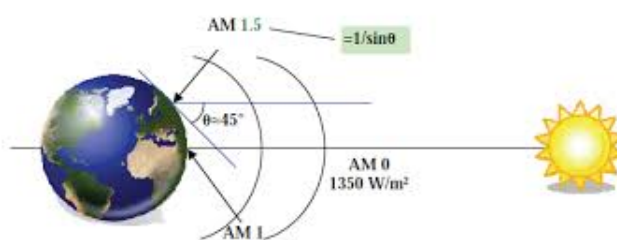


FIGURE 2 – Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil.

Le nombre d'air masse *AM* est donné par l'expression suivante [8].

$$AM = \left( \frac{P}{1013} \right) \cdot \left( \frac{1}{\sin \theta} \right) \cdot e^{-\left( \frac{z}{7,8} \right)} \quad (1)$$

Avec,  $P(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$  la pression,  $\theta$  ( $^\circ$ ) l'élévation du soleil sur l'horizontal ( $90^\circ$  au Zénith) et  $Z(\text{Km})$  l'altitude. Ainsi, au niveau de la mer ( $Z=7800\text{m}$ ) :  $AM = \frac{1}{\sin \theta}$

Le mesure de rayonnement solaire permet d'évaluer le potentiel solaire sur un site donné. Il existe plusieurs instruments permettant de mesurer le rayonnement solaire parmi lesquels on peut citer : le pyranomètre, le pyréliomètre ou l'héliographe.

## 1.3 CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

Les cellules photovoltaïques (photon : grain de lumière et volt : unit de tension) convertissent directement l'énergie lumineuse en électricité (courant continu basse tension). Comme l'énergie lumineuse vient du soleil, on parle alors des cellules solaire [9].

### 1.3.1 L'EFFET PHOTOVOLTAÏQUE

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique, qui convertit la lumière (photons) en électricité grâce à l'utilisation d'un matériau semi-conducteur. Ce dernier possède des propriétés électroniques particulières. Pour constituer une cellule photovoltaïque il faut, à partir de ce matériau, constituer d'une jonction avec une couche supérieure présentant un excès d'électrons (zone dopée n) et une couche inférieure comportant un déficit d'électrons (zone dopée p) ou inversement. L'exposition du semi-conducteur au rayonnement solaire, va créer un excès de charges électriques dans les deux couches, et la mise en contact de deux matériaux de propriété électronique différente, va provoquer un champ électrique [10].

### 1.3.2 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE

On peut représenter une cellule photovoltaïque, comme une diode plate sensible à la lumière, quand un photon de lumière d'énergie suffisante, heurte un atome sur la partie négative de cette diode, elle excite un électron et l'arraché de sa structure moléculaire, créant ainsi un électron libre sur cette partie. Une photopile est fabriquée de manière à ce que cet électron libre, ne puisse se recombiner facilement avec un atome à charge positive, avant qu'il n'ait accompli un travail utile en passant dans un circuit extérieur. Comme une pile chimique, la cellule photovoltaïque produira de l'électricité à courant continu, mais son énergie produite sera principalement en fonction de la lumière reçue par la photopile[6], comme montre la figure (1.3) :



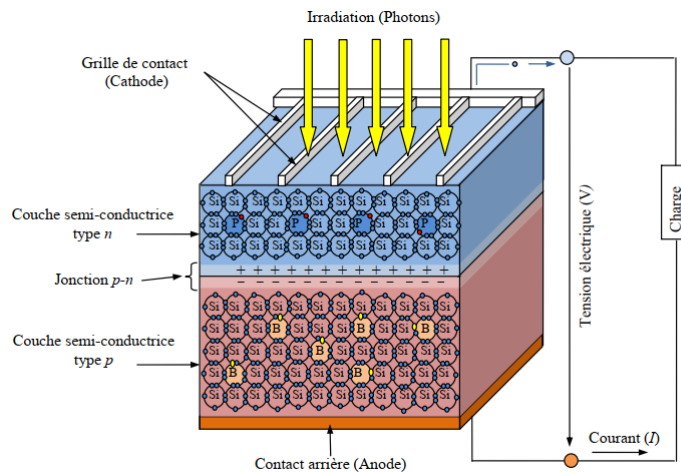


FIGURE 3 – Description d’une cellule photovoltaïque [11].

### 1.3.3 TECHNOLOGIES DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

a) **Cellules photovoltaïques au silicium cristallin** : Les cellules les plus utilisées sont encore aujourd’hui les cellules au silicium cristallin, dite de première génération (80% des panneaux sur le marché). Les cellules au silicium cristallin se divisent en deux catégories mono et poly-cristallin selon la structure, elles sont représentées dans la figure (1.4). La cellule au silicium monocristallin est constituée d’un seul cristal. Elle a un aspect uniforme, de couleur gris bleuté, ou noir. Il existe également des cellules composées de plusieurs cristaux assemblés, dites au silicium microcristallin (grains plus petits que  $1\ \mu\text{m}$ ), poly-cristallin (grains plus petits que  $1\ \text{mm}$ ). Le rendement des cellules monocristallines est actuellement de l’ordre de 15 à 19% en industrie et de 25% en laboratoire. Pour les cellules au silicium poly-cristallin, le rendement en industrie est de 12 à 16% et 20.4% en laboratoire [12].

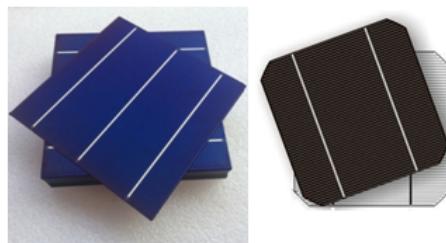


FIGURE 4 – Les cellules au silicium cristallin-poly-cristalline à gauche et monocristalline à droite.

Cependant, il existe de nos jours des solutions qui permettent d’augmenter significativement les rendements comme les cellules à hétérojonction qui consistent à déposer des couches de silicium amorphe sur une ou deux faces d’une plaquette cristalline. Un de ces procédés existant et actuellement mis sur le marché est le procédé HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin layer), qui se substitue au procédé standard de fabrication des cellules cristallines, en atteignant des rendements commerciaux de l’ordre

de 20%. Le silicium amorphe permet de réaliser l'hétérojonction ; l'absorbeur étant le silicium cristallin [11].

**b) Cellules photovoltaïques en couches minces :** Les couches minces consistent en un dépôt de matériaux semi-conducteurs sur un substrat rigide ou souple. Il existe plusieurs technologies de couches minces commercialisées dont trois voies qui semblent s'imposer, même si cela ne représente actuellement pas plus de 20% du marché PV : le silicium amorphe, le tellure de cadmium (CdTe) et les combinaisons à partir du diséléniure de cuivre et d'indium (CIS ou CIGS lorsque du gallium est ajouté) [12]. Elles ont un fort potentiel de réduction des coûts liés à des processus de fabrications peu onéreux (utilisation de verre de faible qualité ou de polymères comme substrat, sur lesquels on dépose une mince couche active) et une flexibilité de mise en œuvre des matériaux, notamment avec l'utilisation de substrats et aussi la possibilité d'obtenir des cellules semi-transparentes cependant ces cellules ont plusieurs inconvénients on peut citer les principaux parmi eux : le rendement reste encore faible par rapport au silicium cristallin et certains matériaux qui sont utilisés dans cette technologie sont très rares et d'autres très toxiques. Les couches minces nécessitent beaucoup moins de matières que le silicium cristallin (moins de 1µm contre 100µm pour le silicium cristallin) [12]. Lorsqu'on voit le rendement des couches minces on trouve premièrement pour le silicium amorphe a des rendements dans l'industrie de l'ordre de 6 à 8% et avec un record rendement de la cellule en laboratoire 13.4% puis la technologie à base de tellure de cadmium CdTe qui a des rendements inférieurs au cristallin de l'ordre de 7 à 9% en industrie (21.0%, record cellule en laboratoire) finalement Le diséléniure de cuivre et d'indium CIS présente haut rendement par rapport aux autres couches minces (13% pour certains modules commerciaux et 21.0% pour les cellules en laboratoire), la figure (1.5) montre des cellules en couches minces.



FIGURE 5 – Cellules en couches minces.

**c) Technologies prometteuses :** Il existe d'autres technologies qui restent nouvelles et prometteuses, On peut citer :

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

que dans les panneaux photovoltaïques à insolation directe [13]. Cette technologie devrait pénétrer le marché dans un avenir proche. Le rendement théorique maximum de la conversion photon-électron est de l'ordre de 85% (le rendement de Carnot est 95 %) [14]. Le rendement expérimental maximal obtenu avec cette technologie est pour le moment de 46% [15].

- **Les constituants organiques (polymères) :** L'utilisation de matériaux polymères vise à remplacer les matériaux minéraux par des semi-conducteurs organiques, autrement dit des plastiques, pour la fabrication de cellules photovoltaïques. Ceux-ci sont bon marché, ont des bonnes propriétés d'absorption et sont faciles à déposer. Leur coût de revient très faible se double de caractéristiques particulièrement attrayantes : plus légères et moins fragiles, leur nature flexible permet d'obtenir des matériaux souples en polymères organiques ou en silicone et même des encres photovoltaïques [13].

D'une durée de vie courte, elles n'offrent pour l'instant que des rendements dépassant légèrement 10% en laboratoire [16] mais pourraient servir de base au développement d'une filière industrielle.

- **Les cellules hybrides thermique et photovoltaïque :** Le rendement des cellules solaires photovoltaïques diminue lorsque les panneaux montent en température. Certains centres de recherche [17] ont eu l'idée de récupérer la chaleur captée et libérée par le photovoltaïque pour simultanément optimiser le rendement électrique et obtenir une source de chauffage. Ils développent ainsi des capteurs solaires hybrides mariant le photovoltaïque et le thermique.

## 1.4 LES AVANTAGES ET LES INCONVÉNIENTS DE L'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE

### 1.4.1 AVANTAGES

- Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au mégawatt ;
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé ;
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant (électricité propre), silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions ;
- Ils fonctionnent de façon rentable dans les régions éloignées et dans de nombreuses applications résidentielles et commerciales ;

- Ils sont flexibles et peuvent être élargis à n'importe quel moment pour répondre à vos besoins en matière d'électricité;
- Temps de réalisation d'une centrale PV minimum;
- Ils ont une longue durée de vie [18].

#### 1.4.2 INCONVÉNIENTS

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé;
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%;
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées;
- Tributaire des conditions météorologiques;
- Beaucoup d'appareils vendus dans le marché fonctionnent en alternatif. Or, l'énergie issue du générateur PV est continue et de faible voltage ( $< 30V$ ), elle doit donc être transformée par l'intermédiaire d'un onduleur [18].

---

## MODÉLISATION D'UN GÉNÉRATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

Le générateur photovoltaïque est constitué principalement de cellules PV ou cellules solaires. Ces cellules constituent l'élément de base de la conversion photovoltaïque. Dans cette section, nous allons modéliser la cellule photovoltaïque qui est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque.

### 2.1 PARAMÈTRES ÉLECTRIQUES DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE

#### 2.1.1 COURANT DE COURT-CIRCUIT, $I_{cc}$

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant  $V=0$  dans le schéma équivalent). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température [3].

#### 2.1.2 TENSION DE CIRCUIT OUVERT, $V_{co}$

La tension à circuit-ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse [3].

### 2.1.3 LA COURBE COURANT -TENSION

La tension à circuit-ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse [19] :

- Le point E c'est le point de fonctionnement optimal auquel la cellule fournit sa puissance maximale.
- Le point D où la tension est égale à zéro et le courant est maximum (courant de court-circuit  $I_{cc}$ ).
- Le point A où le courant est égal à zéro et la tension est maximale (tension de circuit ouvert,  $V_{oc}$ ).

Pratiquement la caractéristique I-V peut être divisée en trois zones :

- Une zone où la cellule est considérée comme une source de courant (D-C).
- Une zone où la cellule est considérée comme une source de tension (B-A).
- Une zone où ni la tension ni le courant sont constants, peut être une source de puissance (CB).

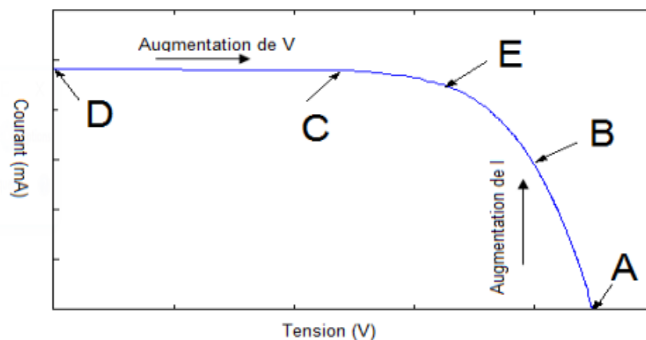


FIGURE 6 – Caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque.

### 2.1.4 LA COURBE PUISSANCE -TENSION

La courbe de la puissance est capable de donner la valeur de puissance maximale à des conditions d'ensoleillement et de température bien définies.

- **Puissance STC** : On appelle puissance crête aussi nommée puissance "catalogue" la puissance délivrée par une cellule est sous conditions standard STC, notée WC (Watt crête) ou WP (Watt peak).

— **Puissance NOCT** : La puissance NOCT (Nominal Operating Cell Temperature TUC en français) d'un module photovoltaïque s'exprime en Watt : c'est la puissance qu'il peut fournir s'il est fermé sur sa charge optimale et soumis à une irradiance de  $800\text{W}/\text{m}^2$  (spectre AM 1.5) alors que la température ambiante est de  $20^\circ\text{C}$ , son inclinaison de  $45^\circ$ , ses deux faces libres, un vent de face de  $1\text{ m/s}$  dans les conditions de circuit ouvert.

— **Normalisation**

Les conditions standard de qualification des modules photovoltaïques sont :

- Un spectre air masse AM1.5.
- Un éclairement de  $1000\text{W}/\text{m}^2$ .
- Une température de  $25^\circ\text{C}$

Les constructeurs de panneaux solaires spécifient les performances de leur matériel dans les conditions normalisées citées ci-dessus (S.T.C. : Standard Test Conditions), [19]

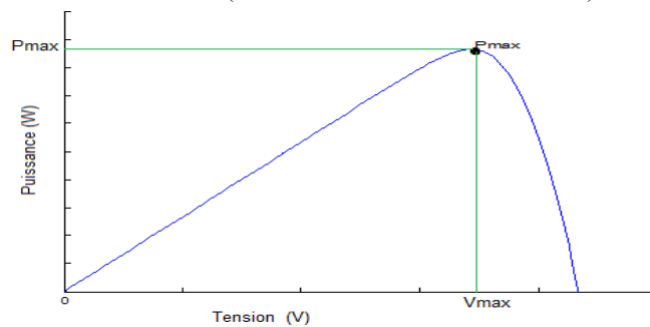


FIGURE 7 – Caractéristique P-V d'une cellule photovoltaïque.

**2.1.5** FACTEUR DE FORME, FF

On appelle facteur de forme FF (fill factor), le rapport entre la valeur maximale de la puissance pouvant être extraite ( $I_m, V_m$ ) On appelle facteur de forme FF (fill factor), le rapport entre la valeur maximale de la puissance pouvant être extraite ( $I_{cc}, V_{co}$ ) :

$$FF = \frac{V_M \cdot I_M}{V_{co} \cdot I_{cc}} \tag{2}$$

Pour une cellule de fabrication industrielle, le facteur de forme est de l'ordre de  $70\%$  [20].

### 2.1.6 RENDEMENT DE CONVERSION, $\eta$

Le rendement  $\eta$  des cellules PV, désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport de la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente  $P_{in}$  [21] :

$$\eta = \frac{FF \cdot V_{co} \cdot I_{cc}}{P_{in}} \quad (3)$$

$$P_{in} = p \cdot S$$

$P_{in}$  : Puissance incidente (W).

$p$  : Puissance d'éclairement reçue par unité de surface  $W/m^2$ .

$S$  : surface de la cellule photovoltaïque.

## 2.2 MODÉLISATION DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

La modélisation des cellules photovoltaïques passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents. Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément. Selon cette philosophie, plusieurs modèles mathématiques sont développés pour représenter un comportement fortement non linéaire, résultant de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations. Ces modèles se différencient entre eux par les procédures mathématiques et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et du courant du module photovoltaïque. On présentera deux modèles du GPV à savoir :

- Modèle à une diode (ou exponentielle simple) ;
- Modèle à deux diodes (ou double exponentielle).

Dans ce qui suit on va concentrer seulement sur le modèle à une diode.

### 2.2.1 MODÈLE À UNE DIODE

Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est décrit par le modèle « standard » à une diode établi par Shockley. Cette description simple est obtenue à partir du modèle à une exponentielle. Ce modèle comporte une diode de moins par rapport au modèle à deux exponentielles, ce qui donne une équation de la caractéristique courant- tension qui comporte une exponentielle de moins [22]-[23]. Le modèle présenté ici s'appelle Modèle à cinq paramètres qui prend en considération toutes les pertes existantes, La cellule photovoltaïque dans ce modèle est représentée par le circuit électrique de la figure (1.6) qui se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux qui produisent un photo-courant  $I_{ph}$  qui dépend de l'éclairement solaire,



les pertes sont modélisées par deux résistances, une résistance série qui modélise les pertes ohmiques des contacts et une résistance shunt qui sert à la modélisation des courants de fuite dans la jonction . Le modèle fait donc intervenir les cinq paramètres inconnus suivants :  $I_{ph}$ ,  $R_s$ ,  $R_{sh}$  et  $I_s, n$  qui sont respectivement le courant de saturation et le facteur d'idéalité de la diode. Il est connu sous le nom LSP (Lumped, 1 Mechanism, 5 Parameters ) [24].

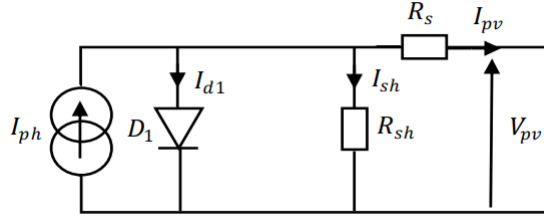


FIGURE 8 – Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, LSP.

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (4)$$

Avec :

$I_{ph}$  : courant photonique.

$I_d$  : courant de la diode.

$I_{sh}$  : courant de la résistance shunt.

D'autre part, le courant de la résistance shunt est exprimé par :

$$I_{sh} = \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}} \quad (5)$$

La diode est un élément non linéaire, leur caractéristique  $I_d(V_d)$  est donnée par la relation [25] :

$$I_d = I_s \left( \exp \left( \frac{V_d}{nV_t} \right) - 1 \right) \quad (6)$$

Le courant de saturation est donné par la relation suivante :

$$I_s = I_{s-ref} \cdot \left( \frac{T_c}{T_{c-ref}} \right)^3 \exp \left( \left( \frac{q \cdot E_{gap}}{n \cdot K} \right) \cdot \left( \frac{1}{T_{c-ref}} \right) - \left( \frac{1}{T_c} \right) \right) \quad (7)$$

L'énergie de gap  $E_{gap}$  dépend du matériau de la cellule photovoltaïque, elle vaut 1.12 eV pour le Silicium cristallin, 1.7 eV pour le Silicium amorphe, et 1.03 eV pour le CdTe.

Et le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_S \left( \exp \left( \frac{(V_{pv} + R_S I_{pv})}{nV_t} \right) - 1 \right) - \frac{V_{pv} + R_S I_{pv}}{R_{sh}} \quad (8)$$

Où :

$V_t = \frac{KT_c}{q}$  : représente le potentiel thermodynamique.

$T_c$  : est la température absolue.

$q$  : est la charge d'un électron,  $1.602 \times 10^{-19} \text{C}$

$K$  : est la constante de Boltzmann,  $1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ .

Le courant photonique lié à l'éclairement, à la température et au courant photonique mesuré aux conditions de référence est donné par [26], [27] :

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} \left( I_{phref} - \mu_c (T_c - T_{cref}) \right) \quad (9)$$

Avec :

$I_{ph}$  : Le courant de photonique.

$I_{phref}$  : Le courant de photonique. sous les conditions de référence (A).

$\mu_c$  : Le coefficient de sensibilité de l'intensité à la température (A/K).

$G, G_{ref}$  : l'éclairement réel et l'éclairement de référence ( $\text{W/m}^2$ ).

$T_c, T_{cref}$  : les températures de la cellule, réelle et de référence.

### 2.2.2 MODÈLE À DEUX DIODES

Plusieurs variantes ont été développées pour modéliser une cellule photovoltaïque. Cette famille de modèles à deux diodes est notée 2MNP (2 Mechanism model with N Parameters)[28]. Le nombre de paramètres N peut être égal à 7, 6 ou 5. Le modèle présenté ici s'appelle Modèle à sept paramètres, Ce modèle est connu sous le nom 2M7P (2 Mechanism model with 7 Parameters). Dans ce cas, le fonctionnement d'une cellule solaire est modélisé en considérant le schéma électrique équivalent de la figure (1.7). Il consiste en la description mathématique d'un circuit réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes ayant les courants de saturation  $I_{s1}$  et  $I_{s2}$ , les facteurs de diode  $n_1$  et  $n_2$ , une source de courant produisant le courant photonique  $I_{ph}$ [29], une résistance série  $R_s$  et une résistance parallèle (shunt)  $R_{sh}$ .

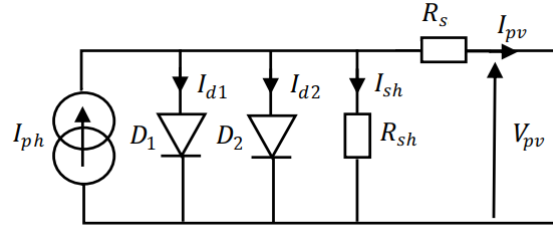


FIGURE 9 – Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles, 2M7P.

Le modèle à deux-diodes est représenté par une équation implicite du courant qui ne peut être résolue qu'à l'aide de méthodes itératives. Cette équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff [30] :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{sh} \quad (10)$$

Avec :

$I_{d1}$  : courant de la première diode.

$I_{d2}$  : courant de la deuxième diode.

Les caractéristiques I-V des diodes sont données par les relations :

$$I_{d1} = I_{s1} \left( \exp \left( \frac{V_d}{n_1 V_t} \right) - 1 \right) \quad (11)$$

$$I_{d2} = I_{s2} \left( \exp \left( \frac{V_d}{n_2 V_t} \right) - 1 \right) \quad (12)$$

$n_1$  et  $n_2$  sont des facteurs d'idéalité associés à un mécanisme de recombinaison, ils dépendent de la nature et la position des niveaux pièges. Pratiquement, ils varient entre 1 et 4

Alors, le courant électrique produit par la cellule est donné par l'expression suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{s1} \left( \exp \left( \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{n_1 V_t} \right) - 1 \right) - I_{s2} \left( \exp \left( \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{n_2 V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}} \quad (13)$$

Les courants de saturation  $I_{s1}$  et  $I_{s2}$  sont donnés par les relations suivantes [26] :

$$I_{s1} = I_{s1(T_{ref})} \left( \frac{T_c}{T_{ref}} \right)^{\frac{3}{n_1}} \exp \left( \left( \frac{-qE_{gap}}{n_1 K} \right) \times \left( \frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right) \quad (14)$$

$$I_{s2} = I_{s2(T_{cref})} \left( \frac{T_c}{T_{cref}} \right)^{\frac{3}{n_2}} \exp \left( \left( \frac{-qE_{gap}}{n_2K} \right) \times \left( \frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_{cref}} \right) \right) \quad (15)$$

## 2.3 SIMULATION D'UN GÉNÉRATEUR PV SOUS MATLAB-SIMULINK

### 2.3.1 PARAMÈTRES DU MODULE UTILISÉ

Le module utilisé dans ce travail est le module de KG 200GT le tableau ci-dessous contient les paramètres pour la modélisation, ces paramètres sont identifiés à partir des données de fabricant[31].

Paramètres	Valeurs
$I_{PPM}$	7.61
$V_{PPM}$	26,3
$P_{MAX,e}$	200.143
$I_{CC}$	8.21
$V_{OC}$	32.9
$n$	1.3
$R_p$	415.405
$R_s$	0.221

### 2.3.2 SCHÉMAS BLOC DE SIMULATION

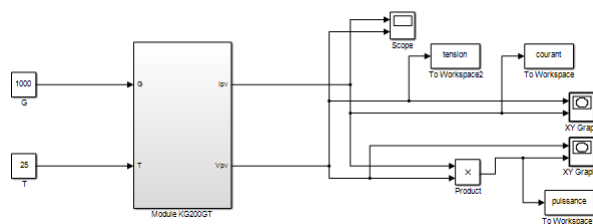


FIGURE 10 – Module PV.

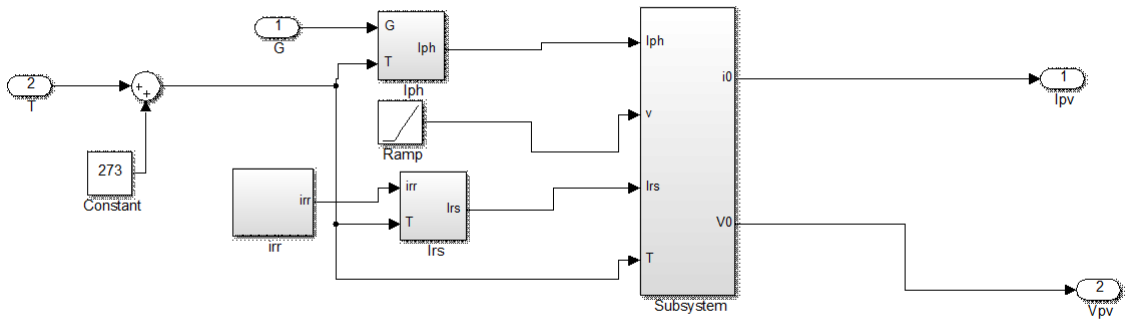


FIGURE 11 – Constitution interne du module PV.

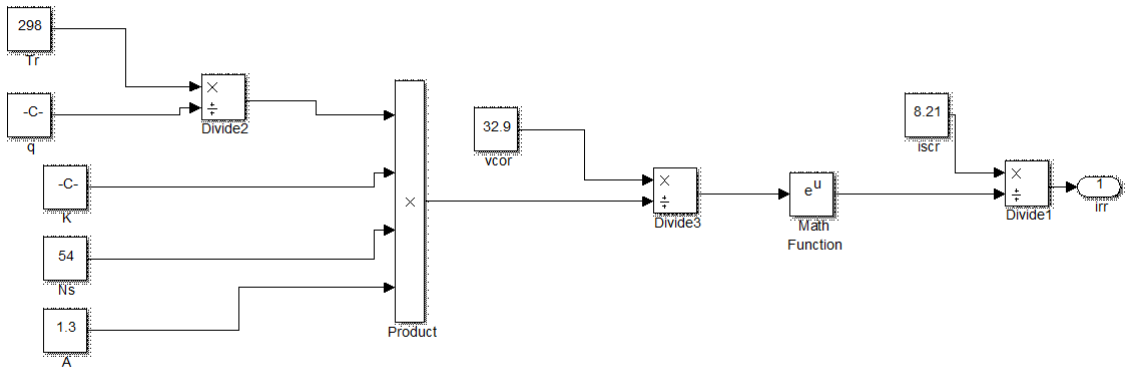


FIGURE 12 – Schéma bloc du courant saturation de référence.

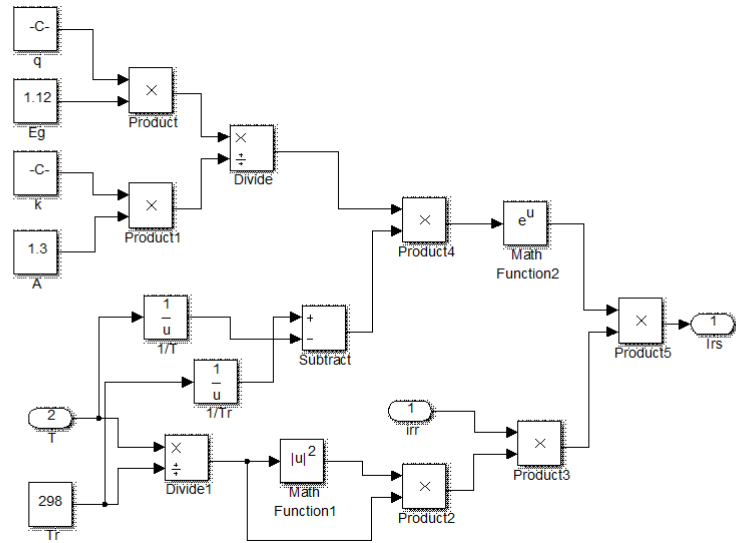


FIGURE 13 – Schéma bloc du courant de saturation.

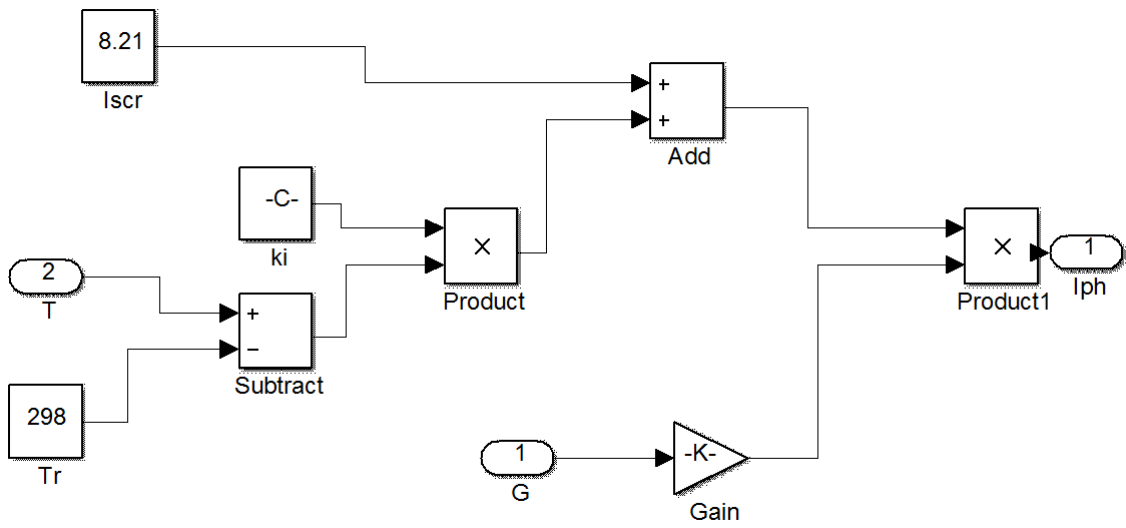


FIGURE 14 – Schéma bloc du courant photonique.

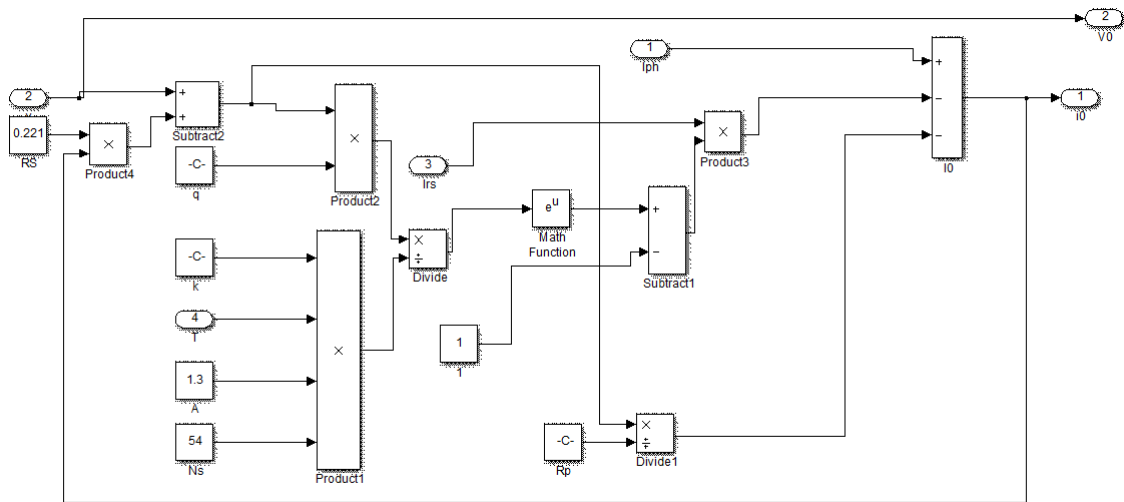


FIGURE 15 – Schéma bloc du courant photovoltaïque.

### 2.3.3 CARACTÉRISTIQUES DU MODULE PV

Les résultats de simulation obtenus des caractéristiques électriques de GPV courant-tension  $I(V)$  et puissance-tension  $P(V)$  dans les conditions standard de teste STC (l'éclairement égale  $1000 \text{ W/m}^2$  et la température égale  $25^\circ\text{C}$ ) sont représentés dans les figures 16 et 17.

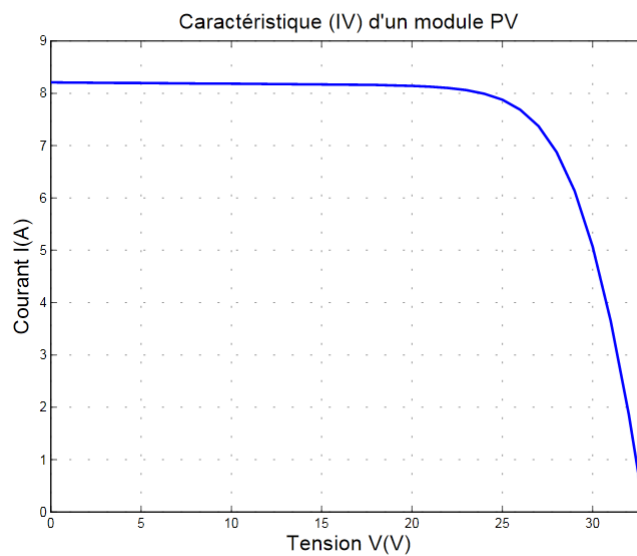


FIGURE 16 – Caractéristique  $I(V)$ .

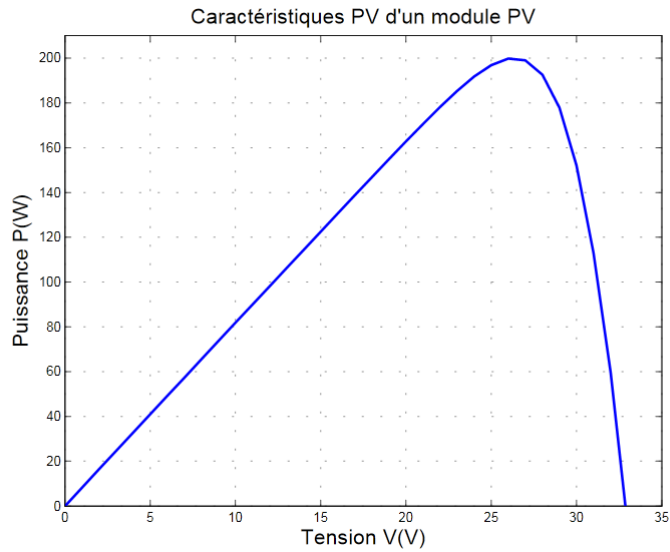


FIGURE 17 – Caractéristique P(V).

#### 2.3.4 LES EFFETS DES CONDITIONS CLIMATIQUES SUR LES CARACTÉRISTIQUES D'UN MODULE PHOTOVOLTAÏQUE

**a-Effet de la variation de l'éclairement :** On fait varier l'éclairement de module PV en prenant les valeurs suivant 600, 800, 1000 et 1200  $W/m^2$  sous température égale à  $25c^{\circ}$ , les résultats obtenus sont représentés dans les figures 18 et 19.

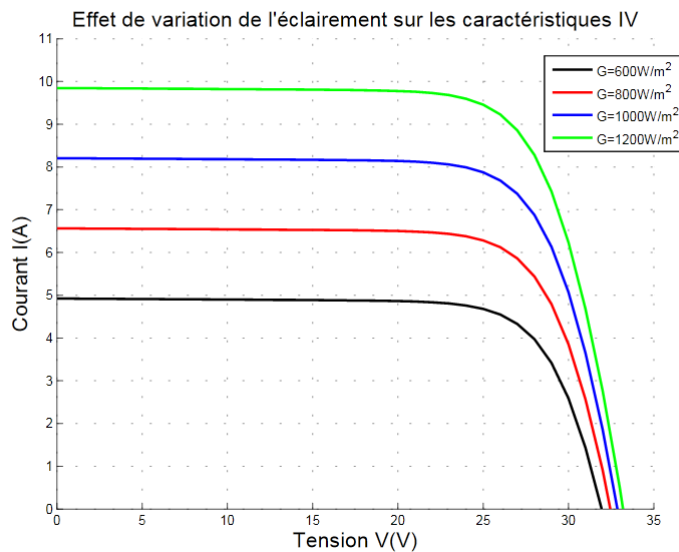


FIGURE 18 – Caractéristique I(V) sous variation d'éclairement.



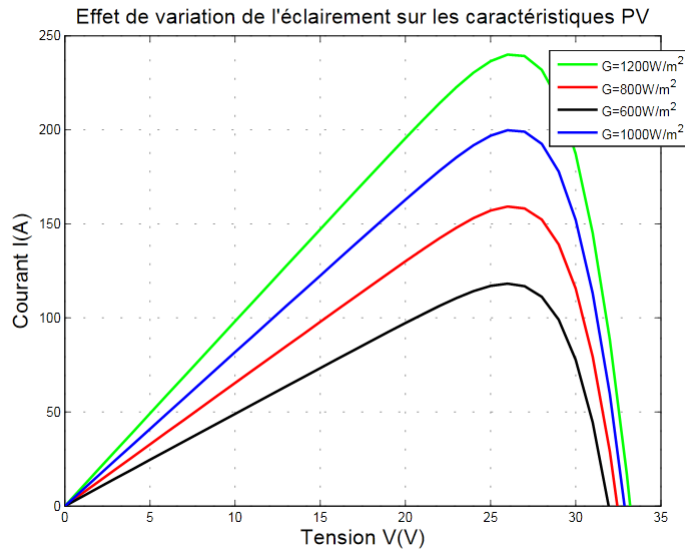


FIGURE 19 – Caractéristique  $P(V)$  sous variation d'éclairement.

La diminution de l'éclairement provoque une baisse du courant solaire  $I_{ph}$  ou bien  $I_{cc}$  de manière proportionnelle et provoque aussi une très légère diminution de la tension  $V_{co}$  et donc un décalage du point  $P_{max}$  du panneau solaire vers les puissances inférieures.

**b- Effet de la variation de la température :** On fait varier la température de module PV en prenant les valeurs suivant 15, 25, 35 et 45  $c^\circ$  sous éclairement égale à  $1000W/m^2$ , les résultats obtenus sont représentés dans les figures 20 et 21.

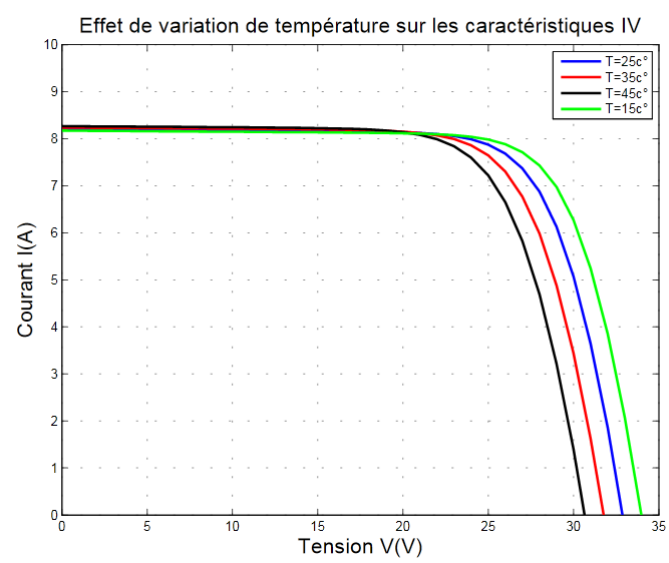


FIGURE 20 – Caractéristique  $I(V)$  sous variation de température.

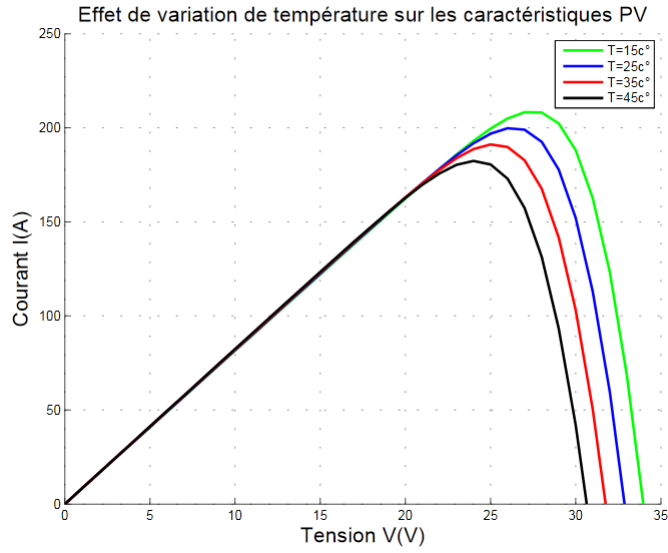


FIGURE 21 – Caractéristique  $P(V)$  sous variation de température.

L'augmentation de la température provoque une légère augmentation du courant  $I_{ph}$  ou bien  $I_{cc}$  et une forte diminution de la tension  $V_{co}$  et donc un décalage du point  $P_{max}$  vers les puissances inférieures.

## COMMANDE MPPT

### 3.1 COUPLAGE DIRECTE SOURCE PV-CHARGE

Couplage directe ou bien au fil de de soleil dans ce couplage la charge est alimentée directement par le champ de panneaux (voire la figure 10 ).ce choix est justifié par la simplicité de couplage et le très haut degré de fiabilité et le faible coût. La connexion est assurée à l'aide d'une diode anti retour placée entre le GPV et la charge pour éviter d'endommager le GPV Si cette charge était une batterie et le module n'est pas éclairé (il est considéré comme un récepteur)[32].

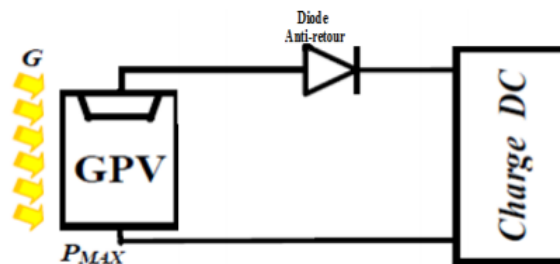


FIGURE 22 – Couplage directe GPV-charge[32].

Il existe plusieurs cas importants pour lesquels le stockage sous forme d'énergie électrique n'est pas nécessaire :

- L'électrolyse de l'eau avec stockage sous forme d'hydrogène.
- Les pompes de l'eau et on stocke dans des réservoirs.
- Les réfrigérateurs et le stockage du froid sous forme de glace.
- Le séchage des végétaux par ventilation, qui ne nécessite pas de stockage.

Comme il n'y a pas de batterie interposée pour fixer la tension de travail, c'est l'impédance de la charge qui fixe le point de fonctionnement donc Le transfert de  $P_{max}$  disponible aux bornes du GPV vers la charge n'est pas non plus garanti et c'est ça l'inconvénient de cette configuration. Le point de fonctionnement du GPV résulte de l'intersection entre la caractéristique  $I(V)$  du GPV et la caractéristique  $I(V)$  de la charge (voire la figure 11).

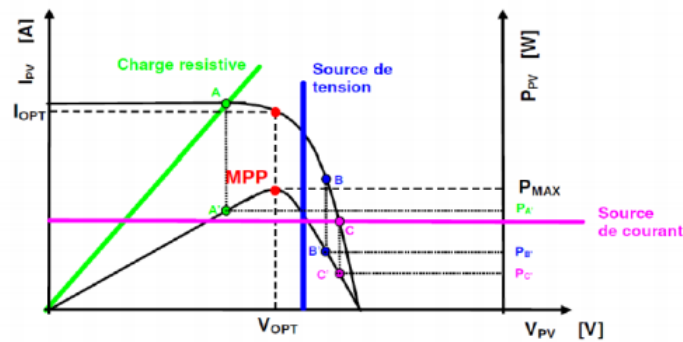


FIGURE 23 – Points de fonctionnement d'un GPV en fonction de la charge en couplage directe[32].

### 3.2 ADAPTATION DE LA CHARGE

L'utilisation d'un adaptateur de charge ou adaptateur d'impédance peut s'avérer utile lorsque la charge à alimenter présente une mauvaise adaptation. Un GPV présente des caractéristiques courant tension (IV) non linéaires avec un point de puissance maximale PPM. Ces caractéristiques dépendent du niveau d'éclairement et de la température de la cellule. De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge (voire la figure 11) en mode couplage directe.

La solution la plus répandue est l'utilisation d'un étage d'adaptation (voire la figure 12) qui joue le rôle d'interface entre le GPV et la charge pour assurer à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur vers la charge.

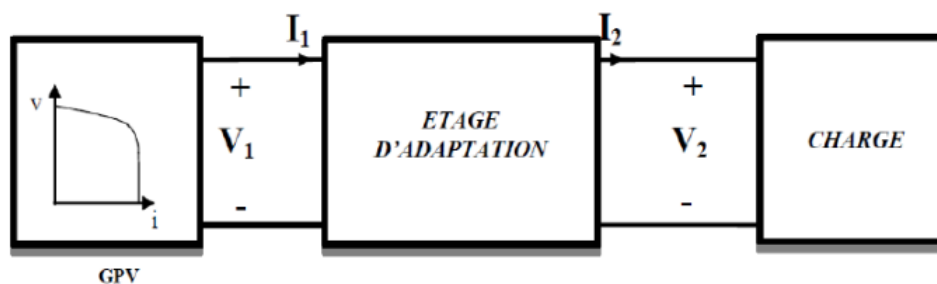


FIGURE 24 – Couplage d'un GPV à une charge à travers un étage d'adaptation[32].

Un convertisseur DC DC fait fonctionner les panneaux à leur point de puissance optimale quels que soient l'ensoleillement et la charge pour délivrer cette puissance à l'utilisation. Le convertisseur DC DC travaille à tension d'entrée pratiquement constante ( $V = V_{opt}$ ) alors que la tension de sortie est fonction de la caractéristique de charge générateur.

### 3.3 LES CONVERTISSEURS DC/DC (HACHEURS)

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques continu-continu permettant de générer une tension continue variable à partir d'une source de tension fixe en général. Ils se composent de condensateurs, d'inductances et de commutateurs électroniques. Tous ces dispositifs consomment peu de puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements. Le commutateur est réalisé avec un dispositif semi-conducteur, habituellement un transistor MOSFET ou un IGBT selon le niveau de puissance mise en jeu. Pendant le fonctionnement de l'hacheur, le transistor sera commuté à une fréquence constante  $f_{cc}$  avec un temps de fermeture égal à  $(\alpha T_{cc})$  et un temps d'ouverture égal à  $((1 - \alpha)T_{cc})$ , où  $T_{cc}$  est la période de commutation qui est égale à  $1/f_{cc}$ ; et  $\alpha$  est le rapport cyclique du commutateur ( $\alpha \in [0, 1]$ ) (voire figure)

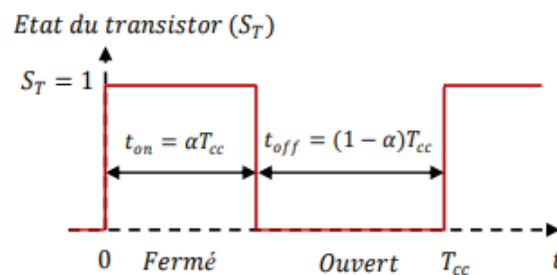


FIGURE 25 – Représentation de l'état d'un commutateur (ouverture/fermeture) sur une période de hachage[33].

Pratiquement, il existe différents types de convertisseurs DC-DC. Une première distinction est à faire entre le convertisseur à isolement galvanique entre la sortie et l'entrée et le convertisseur qui présente une borne commune entre l'entrée et la sortie (à noter que dans le cas d'une isolation galvanique, le rendement se verra affecté d'au moins 10%, ce qui est inadmissible dans le cas par exemple des applications de l'énergie photovoltaïque)[34].

Parmi les convertisseurs DC-DC à liaison directe ou à stockage d'énergie, on distingue :

- Les abaisseurs (buck) dans lesquels la tension de sortie  $U_s$  est inférieure à la tension d'entrée  $U_e$ ;
- Les élévateurs (boost) dans lesquels la tension de sortie  $U_s$  est supérieure à la tension d'entrée  $U_e$ ;
- Il y a aussi un type (buck-boost) qui permet de dévolter et survolter à la fois. Il peut être réversible en courant et peut être utilisé pour charger ou décharger les batteries.

### 3.3.1 HACHEUR SURVOLTEUR (BOOST)

Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie  $U_s$  est supérieure à celle de l'entrée  $U_e$ . Pour un rapport cyclique  $\alpha$  donné, et en régime de conduction continue, la tension moyenne à la sortie est donnée par la relation suivante :

$$U_s = \frac{1}{1-\alpha} U_e \quad (16)$$

La figure illustre la structure interne de ce type d'hacheur Boost.

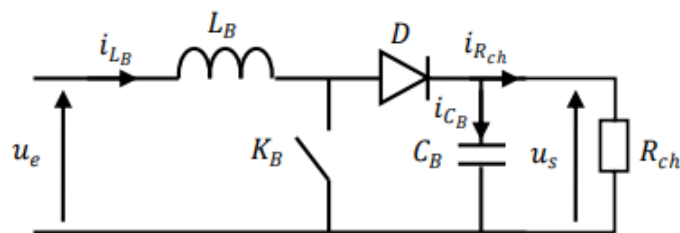


FIGURE 26 – Schéma de principe d'un hacheur « Boost ».

Le modèle dynamique de ce convertisseur sur une période de commutation est donné par :

$$\begin{cases} \frac{di_{L_B}}{dt} = (u_e - (1 - S_T) u_s) / L_B \\ \frac{du_s}{dt} = (i_{L_B} R_{ch} (1 - S_T) - u_s) / (R_{ch} C_B) \end{cases} \quad (17)$$

### 3.3.2 SIMULATION DU CONVERTISSEUR BOOST

Dans ce document on utilise l'hacheur élévateur (Boost converter) donc dans cette partie on va simuler seulement ce hacheur sur l'environnement MATLAB-SIMULINK. Les paramètres du hacheur utilisé est représenté dans le tableau ci-dessous.

Paramètres	Valeurs
$L$	0.011 H
$C$	60 F
$R$	50 ohm
<b>Fréquence de commutation <math>f</math></b>	<b>20 kHz</b>

Le schéma bloc de l'hacheur Boost sur SIMULINK en utilisant l'outil Simscape est représenté sur la figure 27

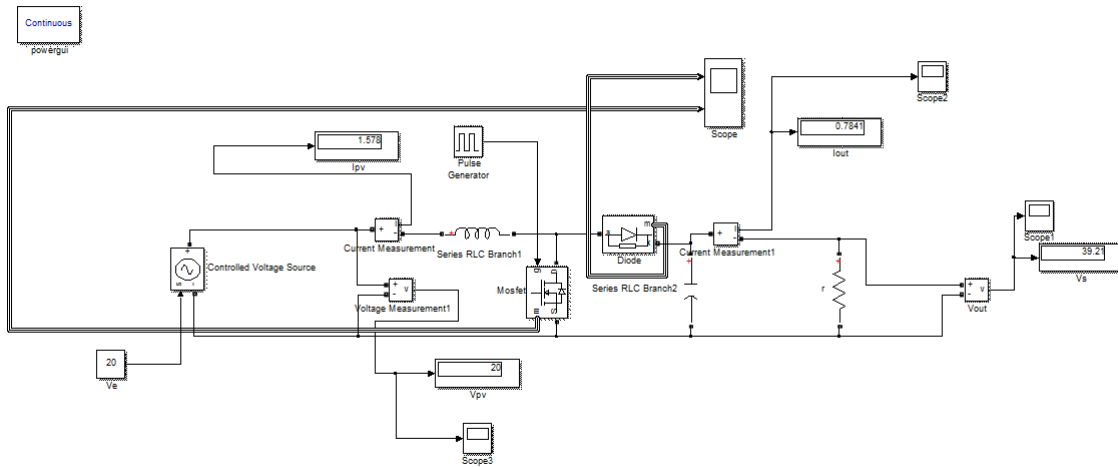


FIGURE 27 – Simulation de l'hacheur Boost .

On fixe la tension d'entrée sur 20V, la tension de sortie obtenu avec différentes valeurs de rapport cyclique  $\alpha$  (voire figure 28 et figure 29).

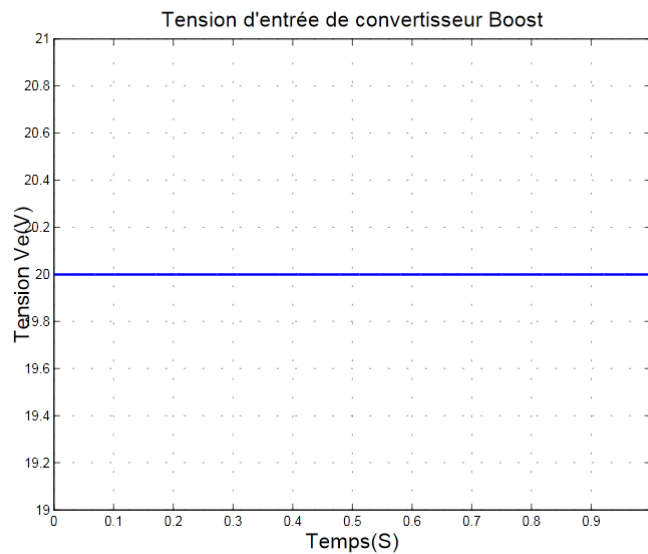


FIGURE 28 – Tension d'entrée.

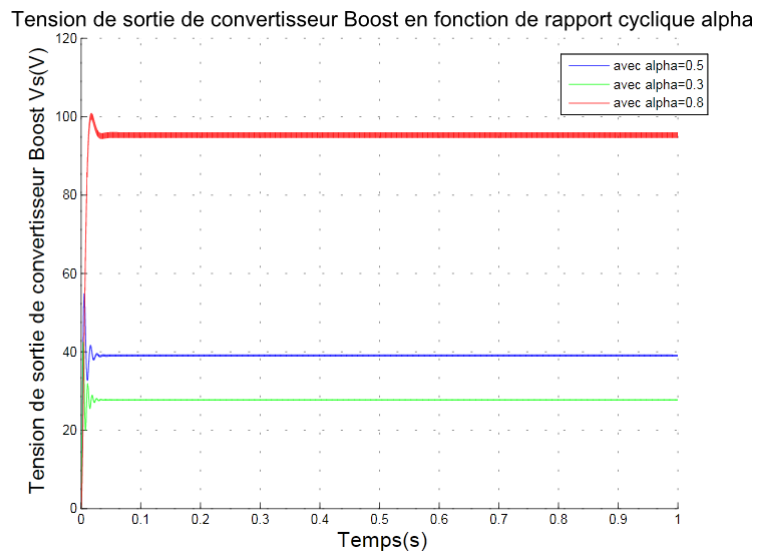


FIGURE 29 – Variation de la tension de sortie de l’hacheur Boost en fonction de la variation du rapport cyclique.

### 3.4 PRINCIPE DE LA COMMANDE MPPT

On peut représenter un système de conversion d’énergie par le schéma donné (voire la figure), ce système se compose d’un panneau PV, d’un convertisseur DC-DC, d’une commande de poursuite du point de puissance maximale et d’une charge. La commande MPPT fait varier le rapport cyclique d’une manier automatique lors d’une variation des caractéristiques électriques de GPV.



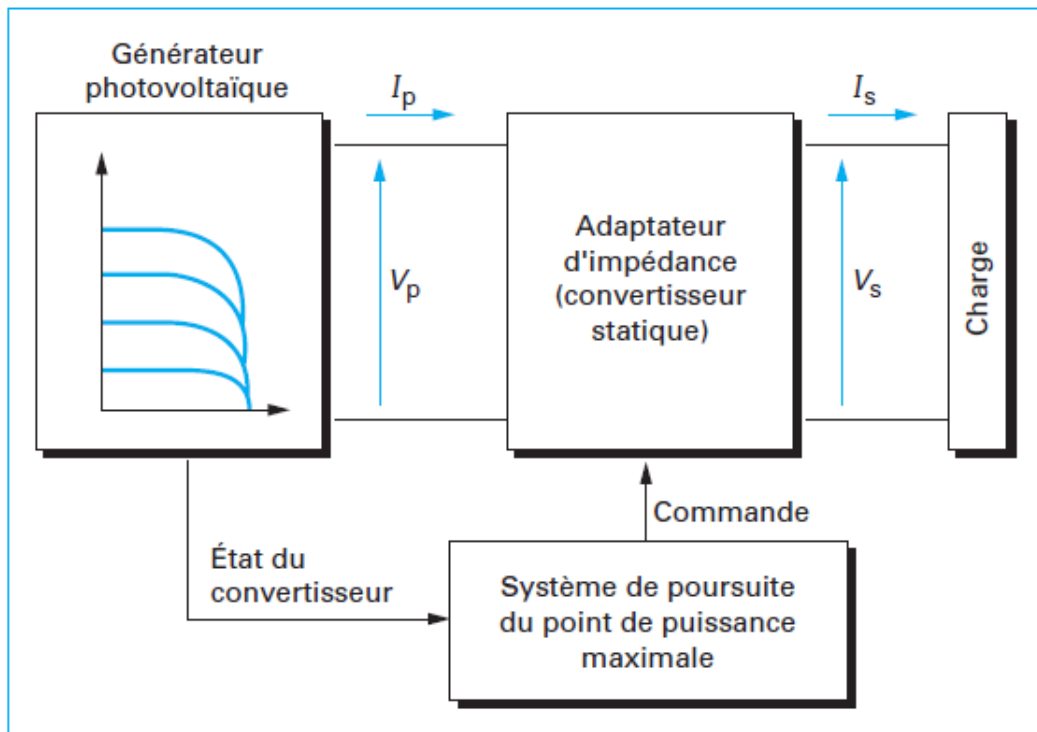


FIGURE 30 – Schéma de principe de la commande MPPT.

### 3.5 LES DIFFÉRENTES TECHNIQUES DE LA COMMANDE MPPT

On compte actuellement un nombre important de technique de commande MPPT, on distingue des méthodes MPPT directes comme les contrôleurs MPPT basée sur le courant de court-circuit et de la tension en circuit-ouvert et d'autres indirectes utilisant un algorithme pour atteindre le MPP. Parmi ces techniques, on peut citer :

- Perturbation et observation.
- Incrémentation de la Conductance.
- Méthodes basés sur l'intelligence artificielle.

#### 3.5.1 MÉTHODE PERTURBATION ET OBSERVATION P&O

C'est la méthode la plus utilisée, un peu de mesures est nécessaire. La tension du panneau est délibérément perturbée (augmentée ou diminuée) puis la puissance est comparée à la puissance obtenue avant la perturbation. Plus précisément, si le puissance de panneau est augmenté en raison de la perturbation, la perturbation suivante se produira dans le même sens. Et si la puissance diminue, la nouvelle perturbation se fait dans la direction opposée. L'organigramme de l'algorithme de cette méthode est représenté dans la figure 31.

Les avantages de cette méthode sont :

- La connaissance des caractéristiques du générateur photovoltaïque n'est pas nécessaire ;
- Méthode relativement simple.

Néanmoins, en régime permanent, le point de fonctionnement oscille autour de la MPP, qui provoque des pertes d'énergie[35].

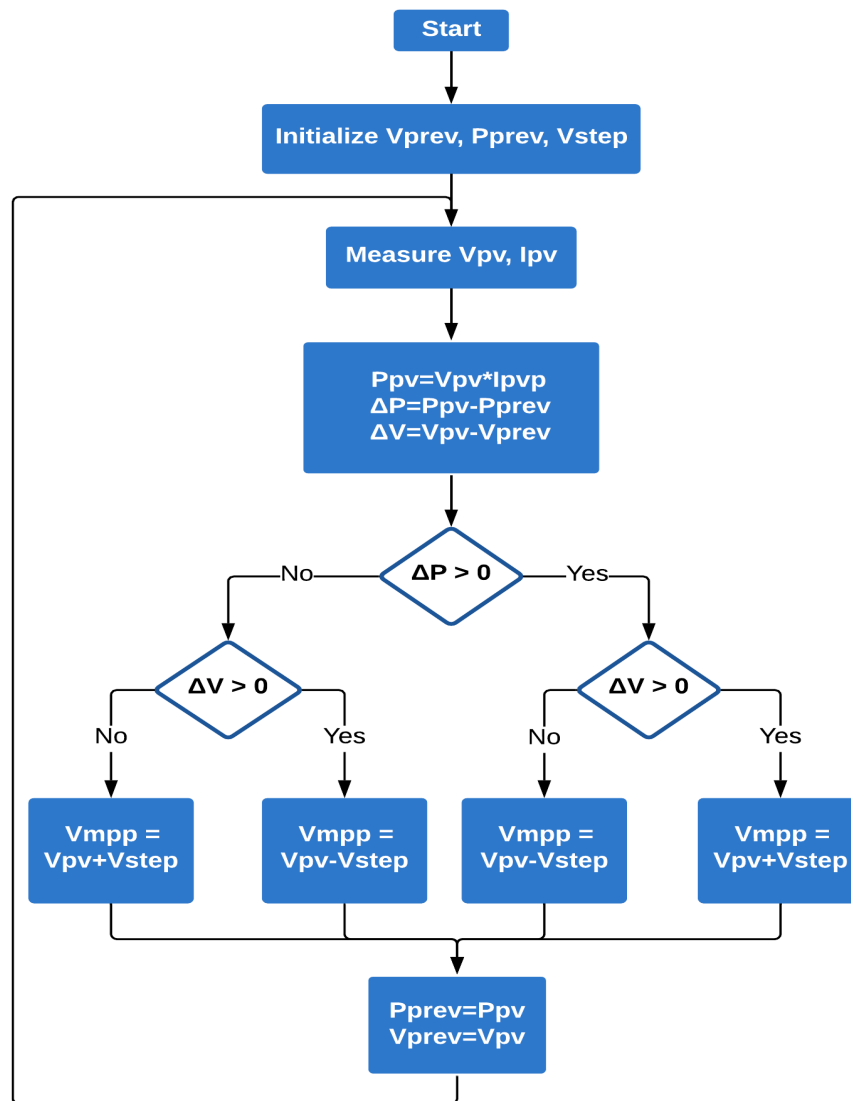


FIGURE 31 – Organigramme de l'algorithme P&O.

#### A. SIMULATION DE LA TECHNIQUE P&O

Le schéma bloc de la commande MPPT par la méthode de perturbation et observation est représenté dans les figures 32 et 33

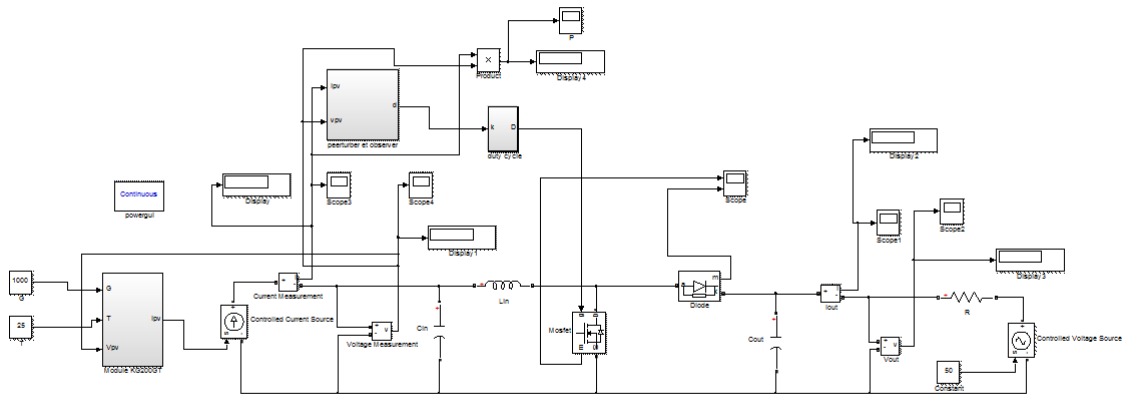


FIGURE 32 – Commande MPPT par la méthode perturbation et observation.

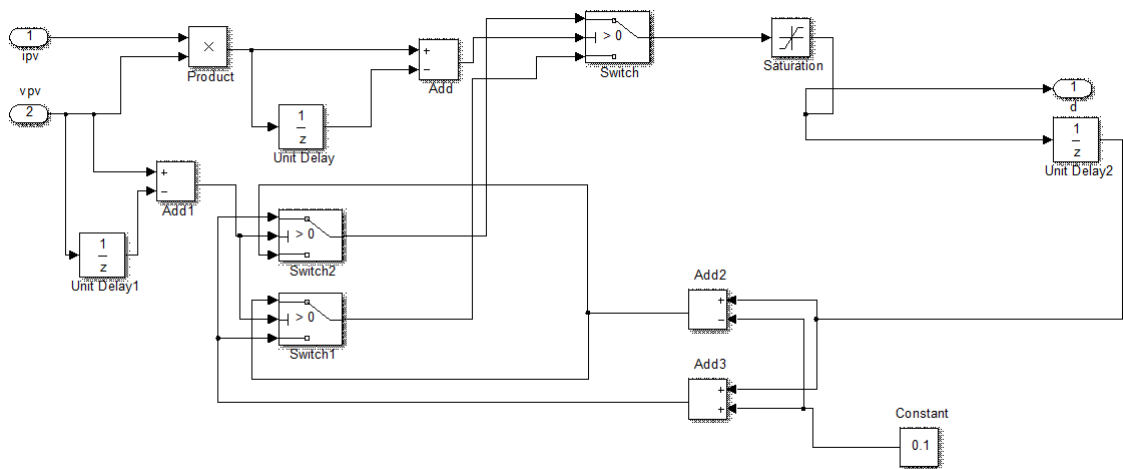


FIGURE 33 – Simulation de l’algorithme de la méthode perturbation et observation.

### A.1. TESTE DE PERFORMANCE DU GPV SOUS CONDUCTIONS STANDARDS

Pour vérifier les performances de cette méthode on a effectué un test où le GPV subisse les conditions climatiques standards (STC) pendant une période de 0.1s, les résultats sont représentés dans les figures 34 et 35.

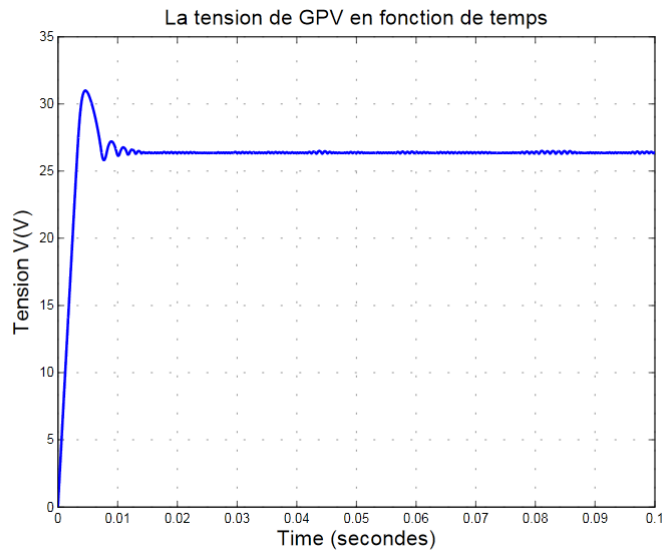


FIGURE 34 – La courbe de la tension PV.

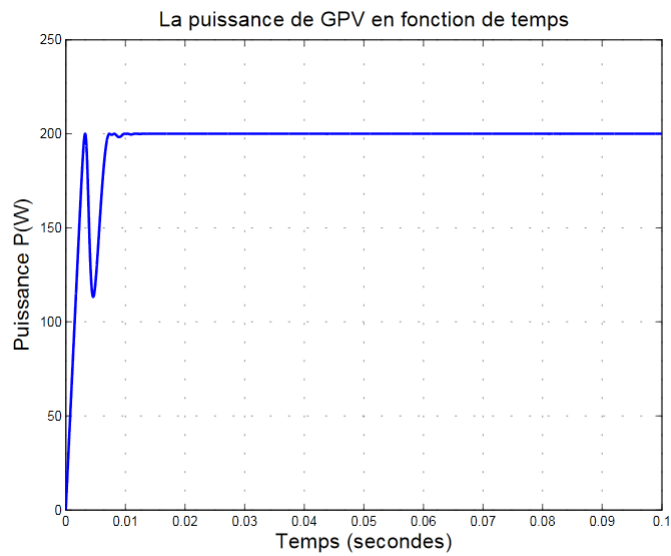


FIGURE 35 – La courbe de la puissance PV.

On voit que le GPV atteint sa tension maximale est sa puissance maximale 200W sur les conditions STC à l'instant 0.01s.

## A.2. TESTE DE ROBUSTESSE

Pour vérifier la robustesse de cette méthode on a effectué les tests suivants :

- on maintient une température constante ( $T=25c^{\circ}$ ) et on varie l'éclairement solaire.

- on maintient l'éclairement solaire à une valeur fixe ( $1000W/m^2$ ) et on varie la valeur de la température.

### A.2.1 VARIATION DE L'ÉCLAIREMENT

On fait varier l'éclairement de  $900W/m^2$  jusqu'à  $800W/m^2$  puis de  $800W/m^2$  jusqu'à  $1000W/m^2$  pendant une période de 1s (voire figures 36, 37 et 38).

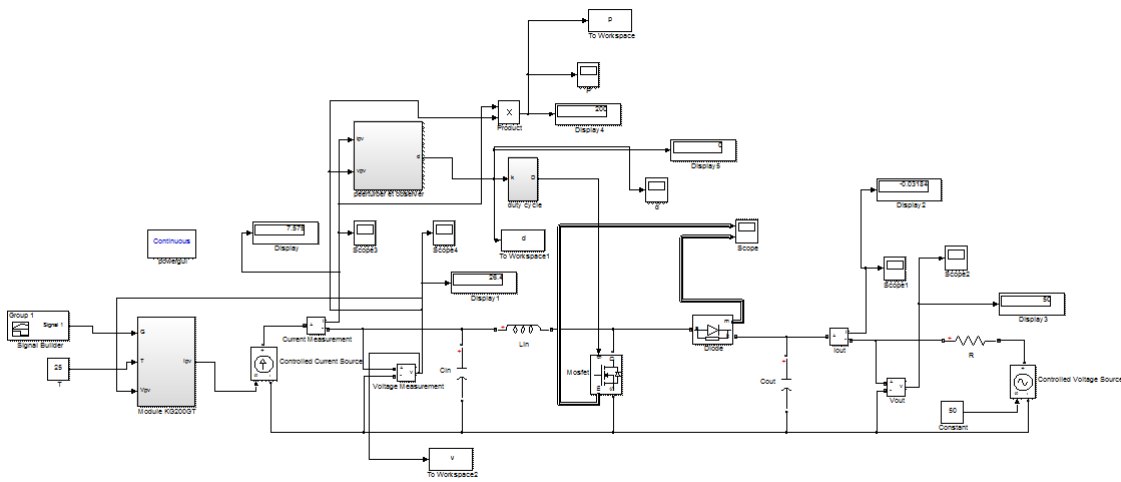


FIGURE 36 – Commande MPPT P&O avec variation de l'éclairement.

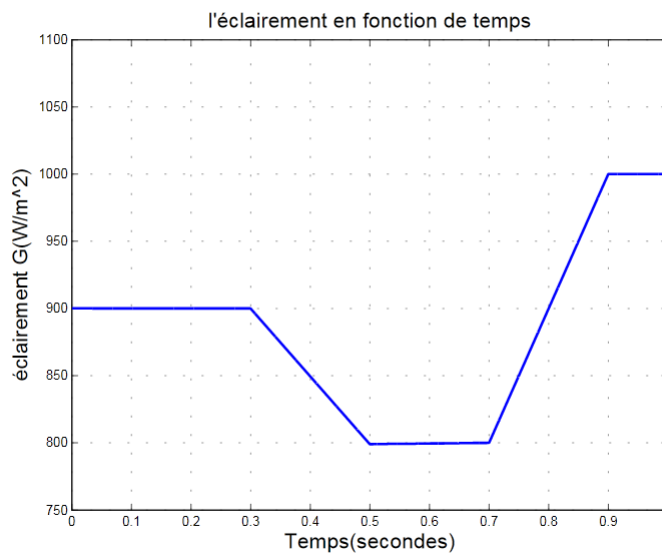


FIGURE 37 – Variation de l'éclairement.

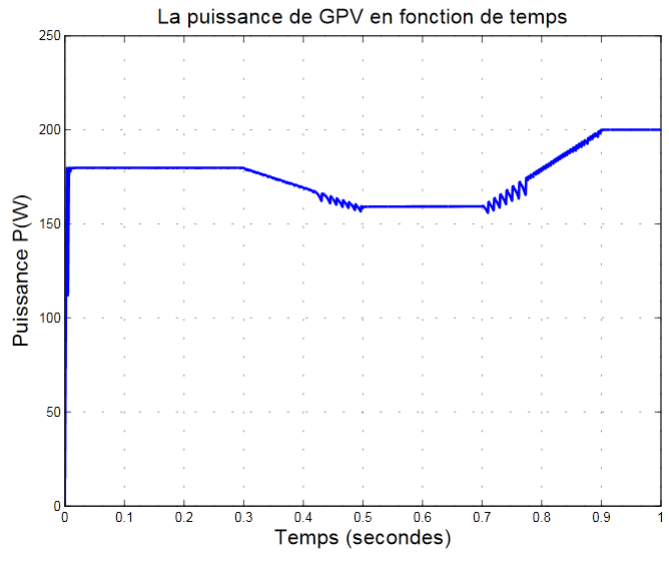


FIGURE 38 – La puissance PV produite.

### A.2.2 VARIATION DE LA TEMPÉRATURE

On fait varier la température de  $35c^{\circ}$  jusqu'à  $25c^{\circ}$  puis de  $25c^{\circ}$  jusqu'à  $45c^{\circ}$  pendant une période de 1s (voire figures 39, 40 et 41).

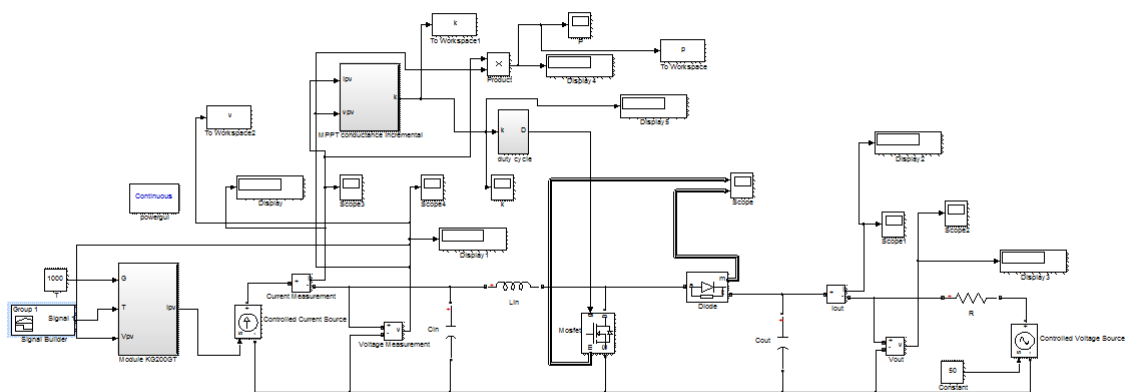


FIGURE 39 – Commande MPPT P&O avec variation de la température.

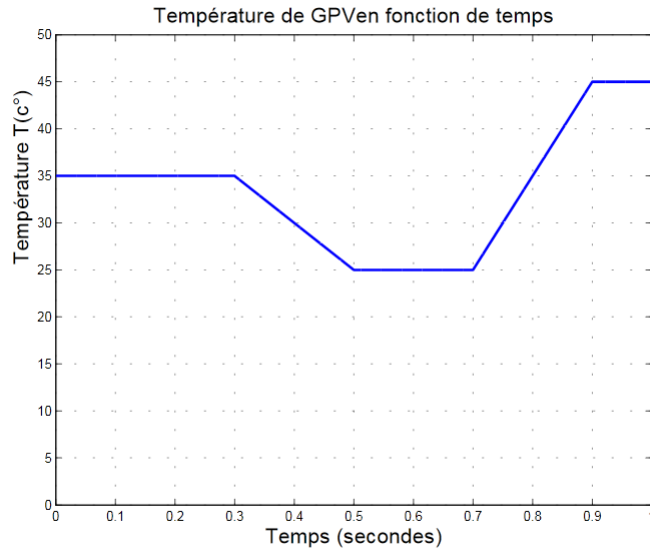


FIGURE 40 – La température de module PV en fonction de temps.

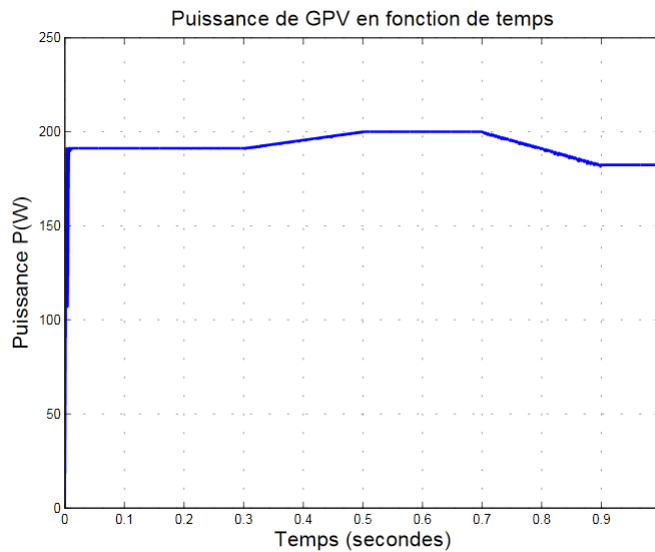


FIGURE 41 – La puissance de module PV en fonction de temps.

### 3.5.2 MÉTHODE INCRÉMENTATION DE LA CONDUCTANCE

Incrémentation de la conductance ou bien la conductance incrémentale cette méthode se concentre directement sur les variations de puissance. Le courant et la tension de sortie du panneau photovoltaïque sont utilisés pour calculer la conductance et la conductance incrémentale. Son principe est de comparer la conductance et la conductance incrémentale et de décider quand augmenter ou diminuer la tension PV pour atteindre le MPP où la dérivée de la puissance est égale à

zéro. L'organigramme de l'algorithme de cette méthode est représenté dans la figure.

La méthode de conductance incrémentale est souvent considérée efficace pour rechercher du point de puissance maximum.

Cependant, l'algorithme à mettre en œuvre est souvent complexe et nécessite une capacité de calcul élevée, ce qui augmente la période de contrôle du système [35].

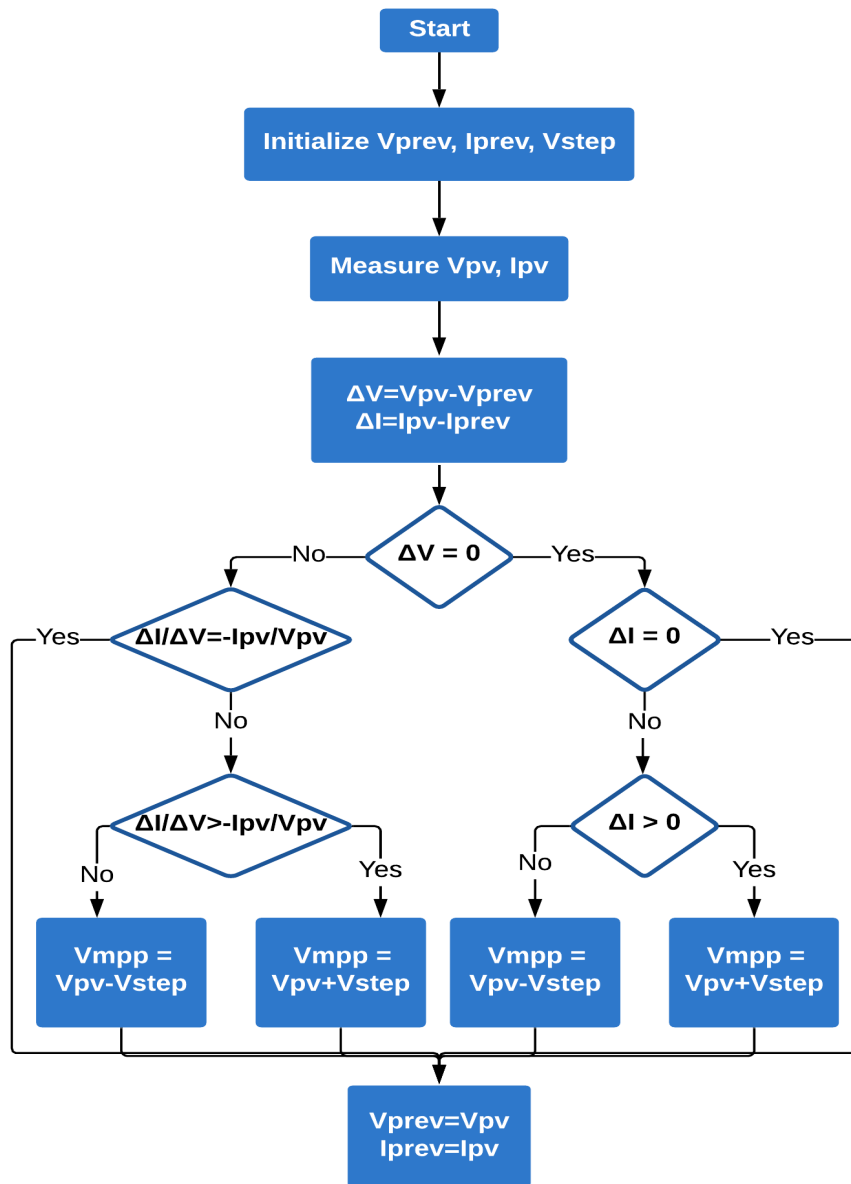


FIGURE 42 – Organigramme de l'algorithme de la technique MPPT conductance incrémentale.

#### A. SIMULATION DE LA TECHNIQUE CONDUCTANCE INCRÉMENTALE

Le schéma bloc de la commande MPPT par la méthode de conductance incrémentale est représenté dans les figures 43 et 44.



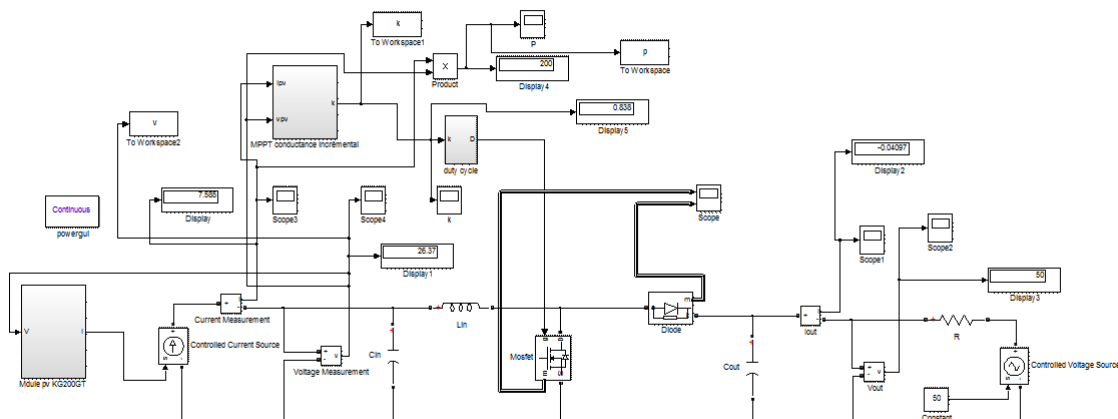


FIGURE 43 – Commande MPPT par la méthode conductance incrémentale.

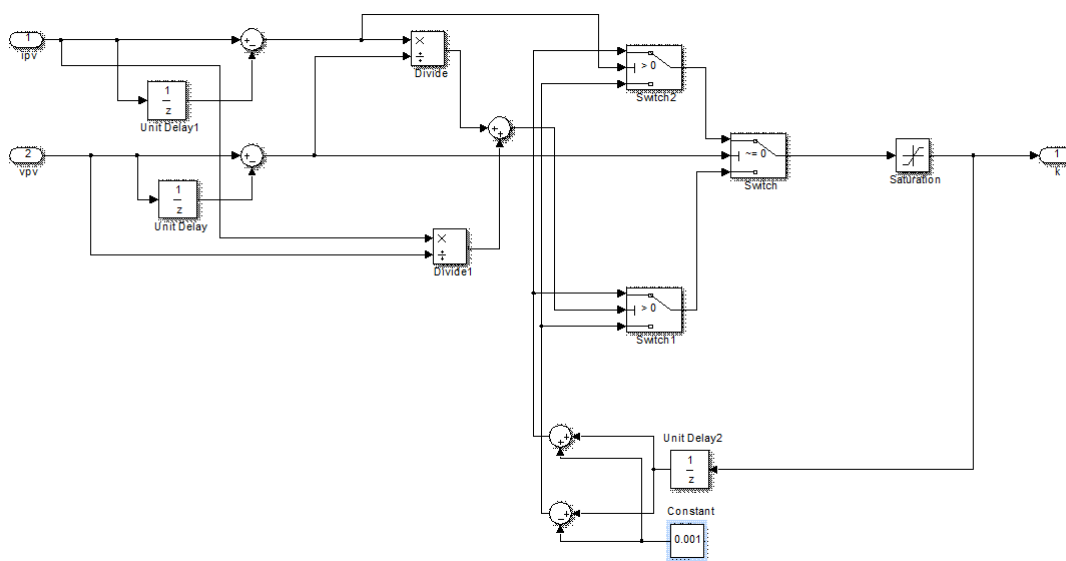


FIGURE 44 – Simulation de l’algorithme de la méthode conductance incrémentale.

Pour vérifier les performances de cette méthode on a effectué un test où le GPV subisse les conditions climatiques standards (STC) pendant une période de 0.1s, les résultats sont représentés dans les figures 45 et 46.

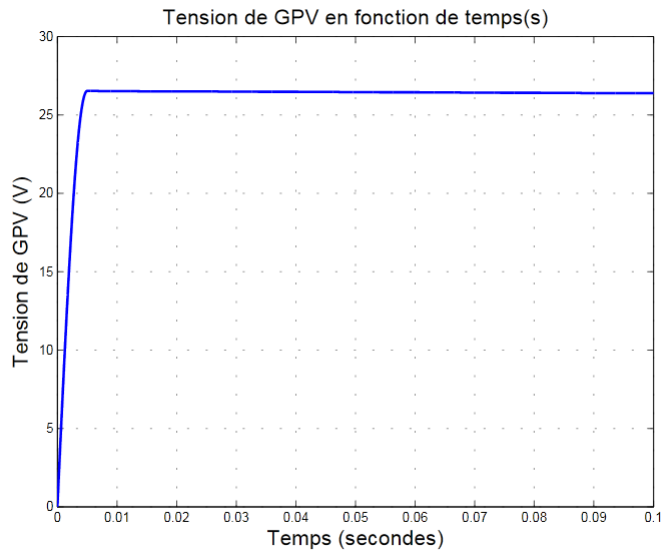


FIGURE 45 – La tension PV.

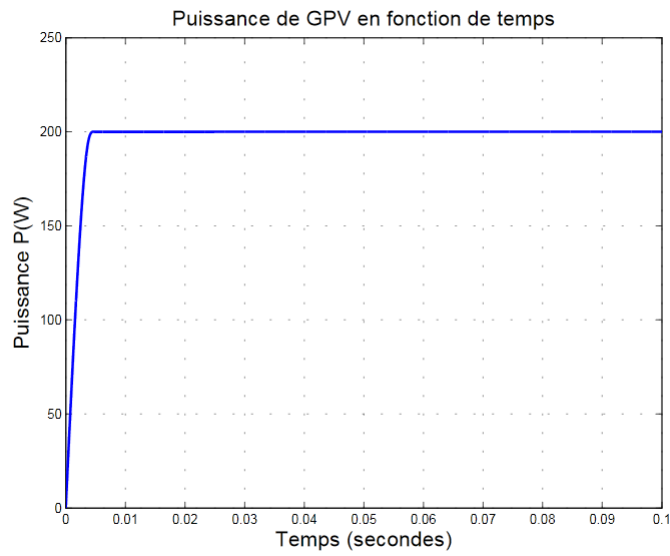


FIGURE 46 – La puissance PV produite.

On voit que le GPV atteint sa tension maximale est sa puissance maximale 200W sur les conditions STC à l'instant 0.005s.

# 4

## DIMENSIONNEMENT DES SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES

### 4.1 COURS PAR PROBLÈME

Eclairage et usage domestique					
Désignation des équipements	Puissance absorbée (W)	Type	Nombre	Heures/jours	Consommation (Wh/jour)
Eclairage habitation	18	DC	6	3	CJE1
Ordinateur	100	AC	3	4	CJE2
Machine à laver	500	AC	1	2	CJE3
Téléphone	60	DC	2	1	CJE4
Réfrigérateur	250	DC	2	5	CJE5
Suppresseur	530	AC	1	3	CJE6
Eclairage salon	36	DC	2	5	CJE7
Télévision	110	AC	3	3	CJE8
Pompage de l'eau potable					
Puissance hydraulique	Hauteur de pompage		Rendement moto-pompe		
1000 W	50 m		Crête	Moyen journalier	
			70%	30%	

Cette table présente la consommation d'un hébergement qui l'on doit l'alimenter par un système photovoltaïque.

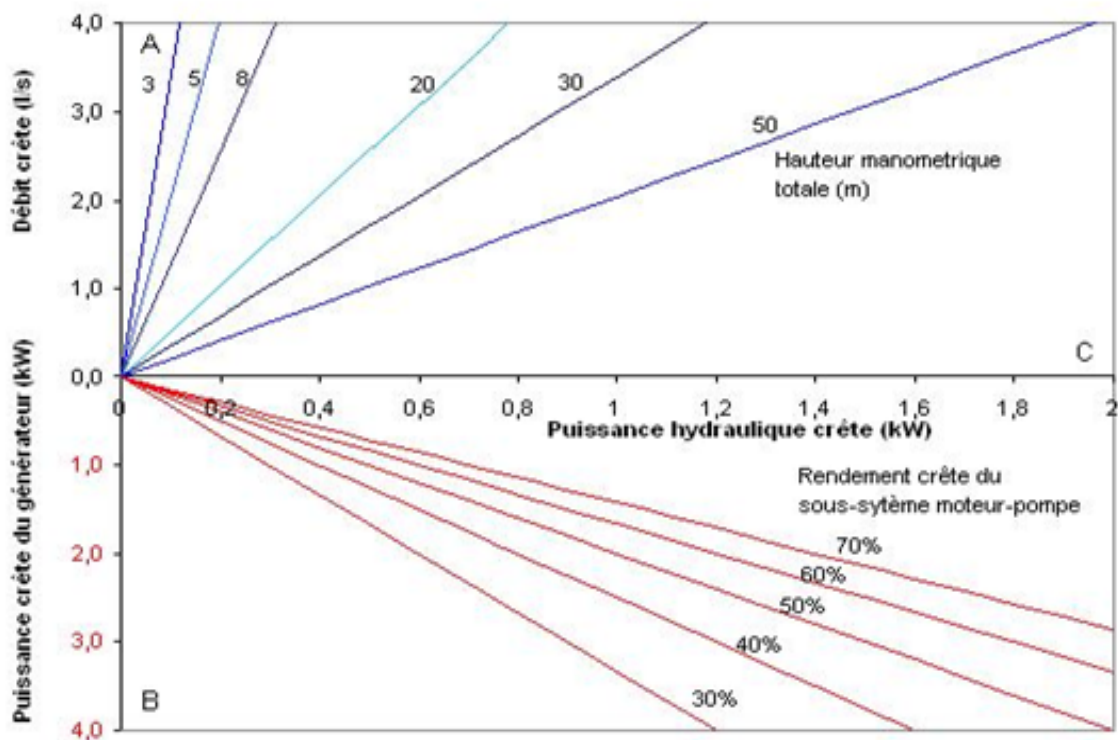
— Calculer la consommation journalière de chaque élément du tableau : CJE1, CJE2, ...

— Sachant que le rendement de la liaison hacheur batteries est :

$\eta_{bat} = 95\%$  et le rendement de l'onduleur pour les charges alternative est  $\eta_{ond} = 90\%$ ;

calculer l'énergie totale consommée par cette maison.

- Sachant que l'éclairement journalière globale sur la zone étudié est :  
 $G = 5000 \text{ Wh/m}^2/\text{j}$  et le facteur de correction globale de la production des panneaux photovoltaïque est  $F_{CG} = 0.75$ ; calculer la puissance crête de la station photovoltaïque qu'on a besoin.
- Déduire le nombre total des panneaux photovoltaïque si on utilise des modules de puissance crête de 150 W et de tension optimale de 24 V.
- Avec autonomie (AUT) de 3 jours et profondeur de décharge de batteries (Pd) de 70%, dimensionner la station de stockage par batteries de 12 V et de 100 Ah en nombre et en couplage (série-parallèle).
- Par la méthode graphique à base de l'abaque de la figure 16. , déduire toutes les autres grandeurs du système PV de pompage d'eau et dimensionner à la suite le générateur photo voltaïque alimentant ce système.



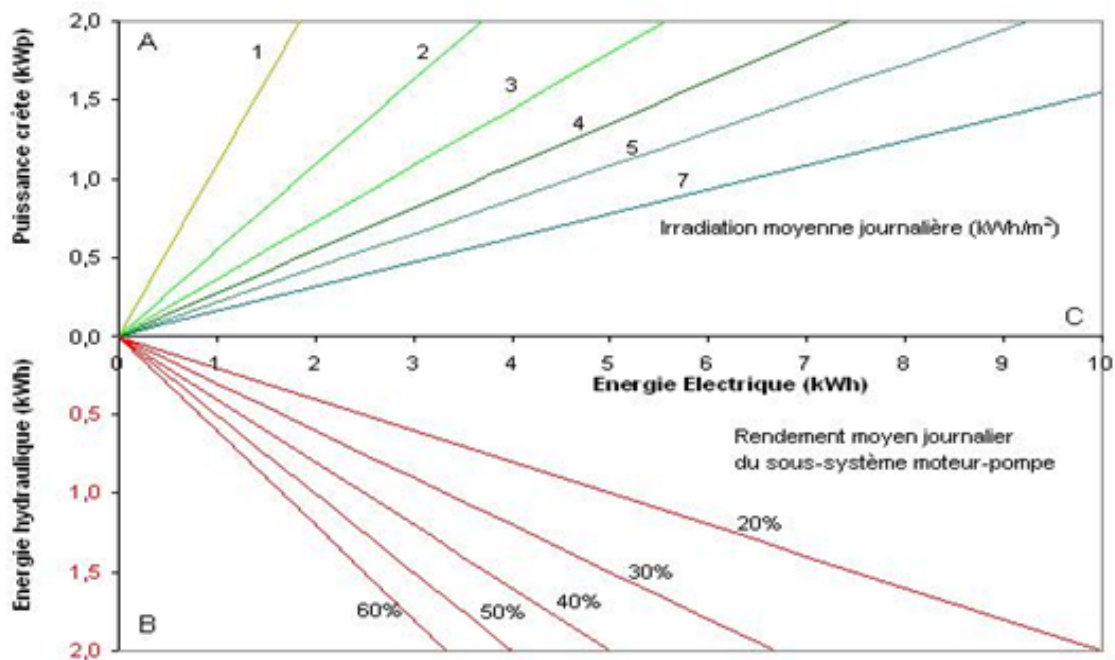


FIGURE 47 – Abaque de dimensionnement des systèmes de pompage photovoltaïque.

#### 4.1.1 L'ÉCLAIRAGE ET L'USAGE DOMESTIQUE

##### A. CALCUL DE LA CONSOMMATION JOURNALIÈRE DES DIFFÉRENTS ÉLÉMENTS

<b>Eclairage habitation</b>	$CJE1=18 \times 6 \times 3=324 \text{ Wh/j}$
<b>Ordinateur</b>	$CJE2=100 \times 3 \times 4=1200 \text{ Wh/j}$
<b>Machine à laver</b>	$CJE3=500 \times 1 \times 2=1000 \text{ Wh/j}$
<b>Téléphone</b>	$CJE4=60 \times 2 \times 1=120 \text{ Wh/j}$
<b>Réfrigérateur</b>	$CJE5=250 \times 2 \times 5=2500 \text{ Wh/jour}$
<b>Suppresseur</b>	$CJE6=530 \times 1 \times 3=1590 \text{ Wh/jour}$
<b>Eclairage salon</b>	$CJE7=36 \times 2 \times 5=360 \text{ Wh/jour}$
<b>Télévision</b>	$CJE8=110 \times 3 \times 3=990 \text{ Wh/jour}$

##### B. CALCUL DE LA CONSOMMATION TOTALE DE L'HABITAT

$$E_T = \sum E_{DC} + \sum E_{AC} \quad (18)$$

$$E_{DC} = \frac{\sum CJE_{DC}}{\eta_{bat}} = \frac{CJE1 + CJE4 + CJE5 + CJE7}{\eta_{bat}} + \frac{324 + 120 + 2500 + 360}{0.95} \quad (19)$$

$$E_{DC} = 3477.89(Wh/j)$$

$$E_{AC} = \frac{\sum CJE_{AC}}{\eta_{bat} \cdot \eta_{ond}} = \frac{CJE2 + CJE3 + CJE6 + CJE8}{\eta_{bat} \times \eta_{ond}} + \frac{1200 + 1000 + 1590 + 990}{0.95 \times 0.9} \quad (20)$$

$$E_{AC} = 5590.64(Wh/j)$$

$$E_T = 3477.89 + 5590.64 = 9068.53(Wh/j) \quad (21)$$

### C. CALCUL DE LA PUISSANCE CRÊTE DE LA STATION PHOTO-VOLTAÏQUE

$$P_c = \frac{G_{STC} \cdot E_T}{G \cdot F_{CG}} = \frac{1000 \times 5590.64}{5000 \times 0.75} = 1490.83(Wc) \quad (22)$$

$G_{STC}$  est l'éclairement aux conditions standards de test (STC).

### D. CALCUL DU NOMBRE TOTAL DES MODULES PHOTO-VOLTAÏQUES

$$N_m = \frac{P_c}{P_m} = \frac{1490.83}{150} = 9.93 \approx 10 \quad (23)$$

### E. DIMENSIONNEMENT DE LA STATION DE STOCKAGE PAR BATTERIES

Calcul de la capacité globale de la station de stockage

$$C_s = \frac{AUT \times E_T}{Pd \times V_{bat}} = \frac{3 \times 9068.53}{0.7 \times 12} = 3238.76(Ah) \quad (24)$$

Nombre total des batteries

$$N_{tb} = \frac{C_s}{C_b} = \frac{3238.76}{100} = 32.3876 \quad (25)$$

Le nombre total des batteries sera donc 32 ou bien 34, puisque leur couplage est sous forme de plusieurs branches de deux batteries en série à cause de la tension des modules photovoltaïques (24 V). Nombre des branches parallèles

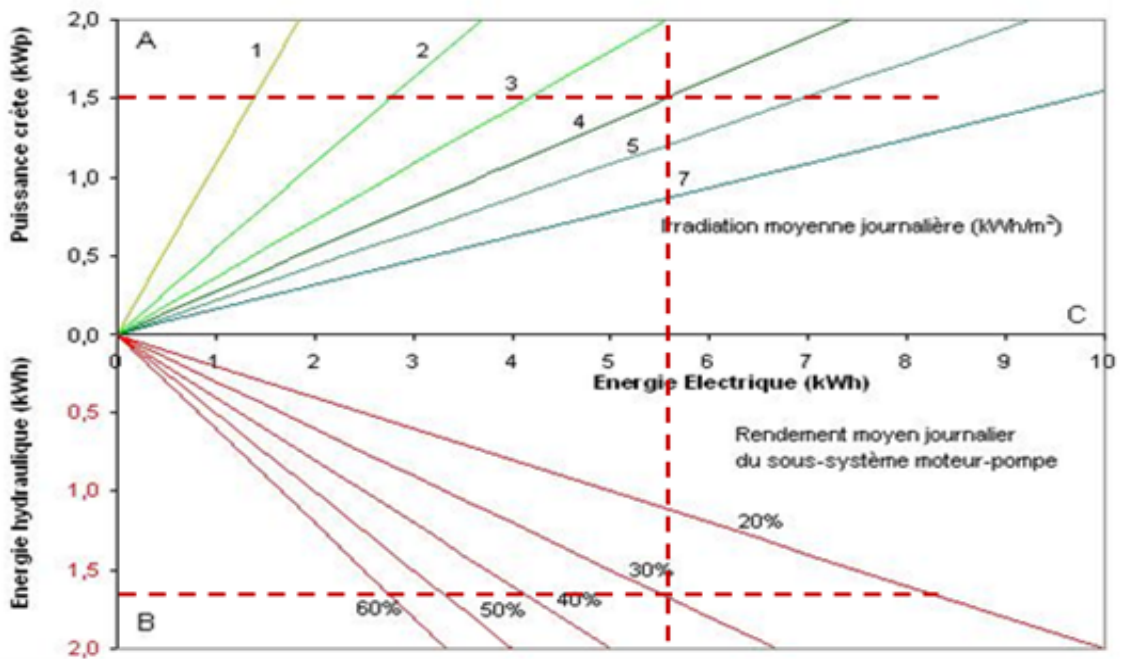
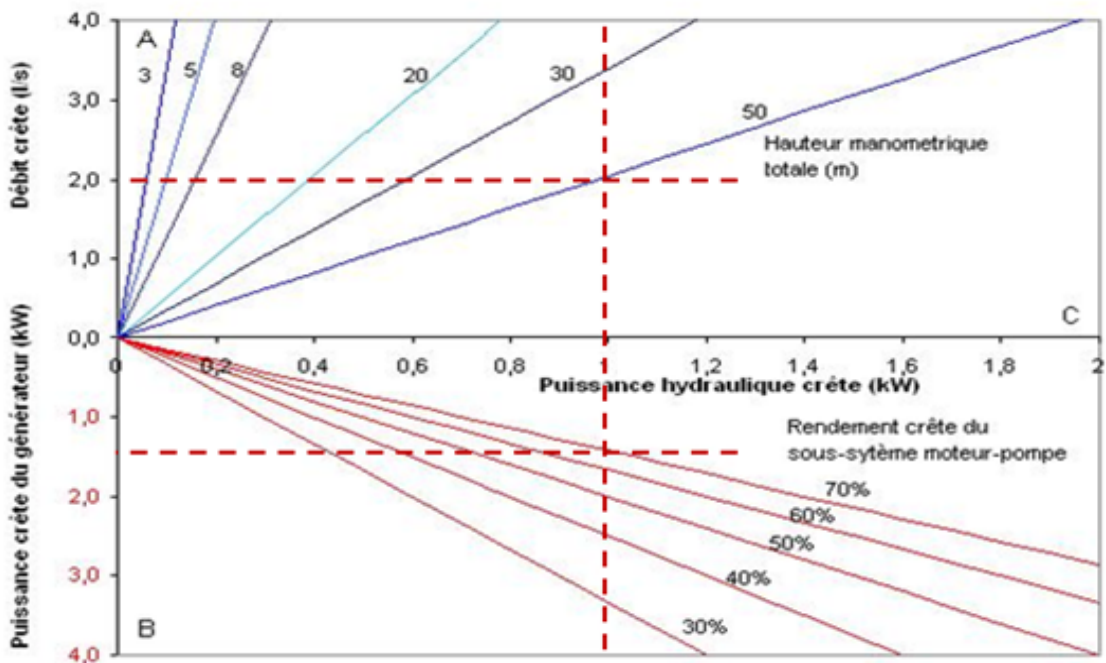
$$N_p = \frac{N_{tb}}{2} = \frac{32}{2} = 16 \quad (26)$$

Nombre des batteries en série

$$N_s = \frac{N_{tb}}{N_p} = \frac{32}{16} = 2 \quad (27)$$

#### 4.1.2 LE POMPAGE DE L'EAU POTABLE

Déduction des grandeurs du système PV de pompage d'eau et dimensionnement du générateur photo-voltaïque



<b>Débit crête de la pompe</b>	2 (l/s)
<b>Puissance crête du générateur PV</b>	1500 (Wc)
<b>Énergie électrique</b>	5600 (Wh)
<b>Énergie hydraulique</b>	1650 (Wh)
<b>Nombre total des modules PV de 150 Wc</b>	10



---

## RÉFÉRENCES

- [1] A. Youcef, "Contribution à l'Optimisation des Performances d'un Générateur Photovoltaïque en Présence d'Ombre Partiel", Thèse de Doctorat, UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES, Algérie, 2017.
- [2] B. Sedik, B.Djaber "Développement des modèles mathématiques d'un générateur photovoltaïque défectueux", Mémoire de Magister, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Algérie, 2015.
- [3] Z. Idir, A. Adrar "Etude et simulation du comportement d'un générateur photovoltaïque en présence de problème de désadaptation", Mémoire de Master, Université A.MIRA-BEJAIA, Algérie, 2016.
- [4] A. Ndiaye, "Étude de la dégradation et de la fiabilité des modules photovoltaïques - Impact de la poussière sur les caractéristiques électriques de performance", Thèse de Doctorat, Université Cheikh ANTA DIOP – DAKAR, 2013.
- [5] V. Da Costa Marques, "Modelagem de Painel Fotovoltaico Submetido a Sombreamento e Conectado à Rede Elétrica Monofásica", Bachelor en génie électrique, UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES, Portugais, 2017.
- [6] E.Schiller. "Le pompage photovoltaïque, manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens". Université d'Ottawa, 1998.
- [7] Riordan C., Hulstron R "What is an air mass 1.5 spectrum? (Solar cell performance calculations)". Photovoltaic Specialists Conference, Conference Record of the Twenty First IEEE; 21-25 May 1990 Page(s) :1085 - 1088 vol.2. DOI : 10.1109/PVSC.1990.111784.
- [8] Roy J.N., Gariki G.R., Nagalakshmi V. "Reference module selection criteria for accurate testing of photovoltaic (PV) panels". Solar Energy 84, 32–36, 2010.
- [9] A.Zerga. "Optimisation du rendement d'une cellule solaire à base de silicium monocristallin de type n+p". Mémoire de Magister. Université de Tlemcen, 1998.
- [10] J.P.Joly."Focus Technique Photovoltaïque Un Nouvel Éclairage". L'Institut National de l'Energie Solaire (INES) Paris, mars 2011.
- [11] B BENDIB, "Une nouvelle approche de modélisation et de commande des systèmes photovoltaïques autonomes", Thèse de Doctorat, UNIVERSITE FERHAT ABBAS — SETIF 1, Algérie, 2017.
- [12] Thomas Mambrini- Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies.

- [13] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solairephotovoltaïque#notes>.
- [14] Electricité solaire photovoltaïque, CNRS le lien <http://www.edfenr.com/lephotovoltaïque/types-de-panneaux-solaires-n798-1.aspx>.
- [15] New world record for solar cell efficiency at 46 % », Fraunhofer ISE le lien <https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2014/new-world-record-for-solar-cell-efficiency-at-46-percent.html>.
- [16] Organic Photovoltaics Research, Energy.gov le lien <https://www.energy.gov/eere/solar/organic-photovoltaics-research>.
- [17] Centre thermique de Lyon (CETHIL), LMSC — LEEVAM université de Cergy, Laboratoire d'optimisation de la conception et ingénierie de l'environnement (LOCIE), Centre d'énergétique (CENERG), Laboratoire systèmes physiques de l'environnement (SPE), université de Corse.
- [18] N AOUN, " Etude et modélisation des différents modèles de la cellule photovoltaïque établis sur base de valeurs nominales", Mémoire de Magister, Université MENTOURI CONSTANTINE, Algérie, 2010.
- [19] M Saad Saoud Merwan, "Optimisation de la gestion de l'énergie photovoltaïque utilisée dans une zone agricole ", Thèse de Doctorat, Université BADJI MOKHTAR – ANNABA, Algérie, 2015.
- [20] M.Boukhli, O.Hacen. "Conception et réalisation un Générateur PV Muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleur gestion énergétique". Mémoire de Magister. Université Aboubaker Bel Kaid Telemcen 2011.
- [21] M. Belhadj. "Modélisation d'un système de captage photovoltaïque". Mémoire de Magister. Université de Béchar, 2008.
- [22] B. Flèche, D. Delagnes."Énergie solaire photovoltaïque". Académie de Toulouse, juin 2007.
- [23] W. De Soto, S.A. Klein and W.A. Beckman, "Improvement and Validation of a Model for Photovoltaic Array Performance", Solar Energy, Vol. 80, pp. 78-88, 2006.
- [24] G. Notton, I. Caluianu, I. Colda et S. Caluianu, "Influence d'un Ombrage Partiel sur la Production Electrique d'un Module Photovoltaïque en Silicium Monocristallin", Revue des Energies Renouvelables, Vol. 13, N°. 1, pp. 49-62, 2010.
- [25] S. Belakehal, "Conception et Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables", Thèse de Doctorat, Université de Constantine, Algérie, 2010.
- [26] M. A. Cheikh, B. H. Aïssa, A. Malek et M. Becherif, "Mise au Point d'une Régulation Floue pour Serre Agricole à Energie Solaire", Revue des Energies Renouvelables, Vol. 13, N°. 3, pp. 421-443, 2010.

- [27] H. Bouzeria, "Modélisation et Commande d'une Chaîne de Conversion Photo-voltaïque", Thèse de Doctorat, Université de Batna 2, Algérie, 2016.
- [28] O. Feddaoui, "Contribution à l'Etude des Systèmes Hybrides de Génération : Application aux Energies Renouvelables", Mémoire de Magister, Université de Souk-Ahras, Algérie, 2014.
- [29] J.A. Gow and C.D. Manning, "Development of a Photovoltaic Array Model for Use in Power Electronics Simulation Studies", IEE Proceedings on Electric Power Applications, Vol. 146, N°. 2, pp. 193-200, 1999.
- [30] M. L. Louazene, "Contribution à l'Optimisation des Systèmes Photo-voltaïques Utilisés pour l'Irrigation dans les Zones Sahariennes : Application à la Zone de Ouargla", Thèse de Doctorat, Université de Batna 2, Algérie, 2015.
- [31] S. Sumathi, L. Ashok Kumar, P. Surekha, "Solar PV and Wind Energy Conversion Systems", livre, 2015.
- [32] Y. Yahiaoui, "Commande MPPT à base la logique floue et les algorithmes génétiques", Mémoire de Master, Université A.MIRA-BEJAIA, 2013.
- [33] B. Toual, L. Mokrani, A. Kouzou and M. Machmoum, "Control and Management of a Solar-Wind Hybrid System for Power Quality Improvement", Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 13, N°. 6, pp. 1420-1439, 2018.
- [34] H. Sahraoui, "Modélisation et Commande des Convertisseurs DC-DC Utilisés dans les Systèmes Photovoltaïques (Théorie et Expérimentation)", Thèse de Doctorat, Université de Batna 2, Algérie, 2017.
- [35] Djamila Rekioua, Ernest Matagne, "Optimization of Photovoltaic Power Systems Modelization, Simulation and Control", livre, 2012.