

GÉNÉRALITÉS SUR LE PHOTOVOLTAÏQUE

Chapitre I: GÉNÉRALITÉS SUR LE PHOTOVOLTAÏQUE

I.1. Introduction

L'énergie solaire est à l'origine de la formation des réserves d'énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel) et des flux d'énergie renouvelable (bois, vent, énergie hydraulique). La conversion de cette énergie en électricité peut être effectuée de manière directe ou indirecte (figure I.1).

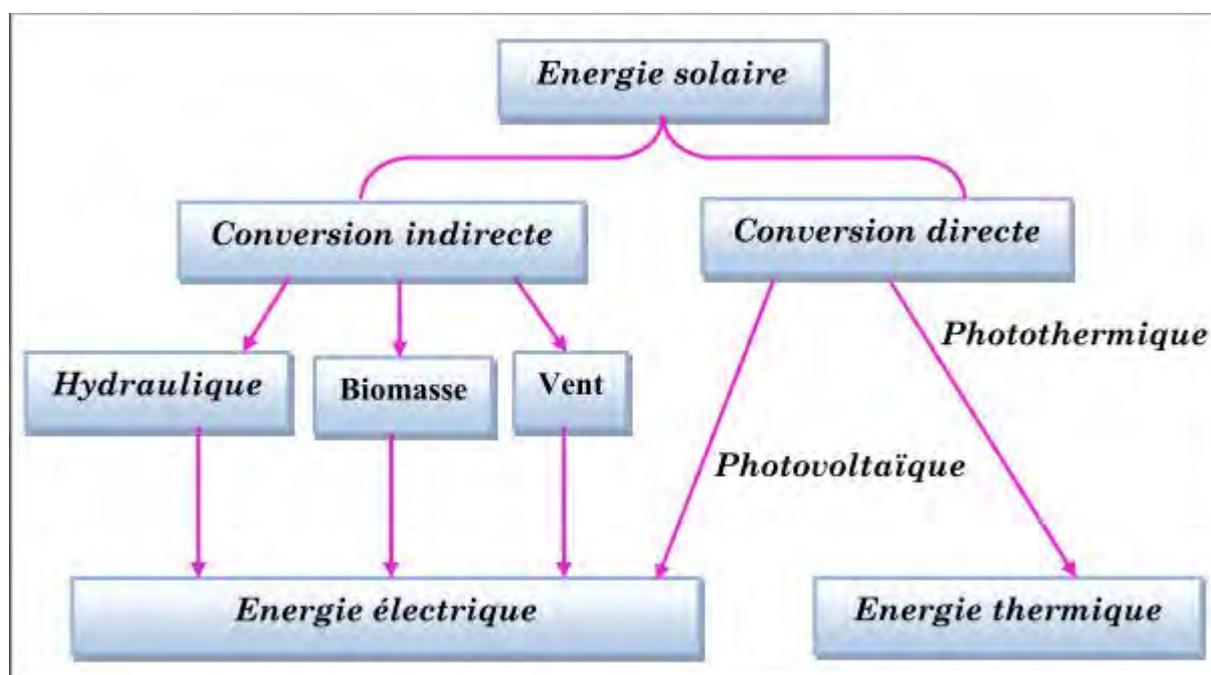


Figure I.1. Conversion de l'énergie solaire

I.2. Le solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie électrique renouvelable produite à partir du rayonnement solaire. Elle est à distinguer de l'énergie solaire thermique, visant à produire de la chaleur pour l'eau chaude sanitaire ou le chauffage. Elle se distingue également des centrales solaires thermodynamiques, qui emploient des miroirs pour chauffer des fluides alimentant un générateur électrique. L'énergie solaire est l'avenir et la solution la plus prometteuse pour le futur énergétique, de l'humanité.

I.2.1. Histoire de l'énergie photovoltaïque

L'énergie solaire est une alternative intéressante pour les besoins énergétiques du monde. Cette énergie est propre, accessible et inépuisable, donc c'est la source d'énergie idéale.

L'énergie solaire photovoltaïque transforme le rayonnement solaire en électricité grâce à des cellules photovoltaïques intégrées à des panneaux qui peuvent être installés sur des bâtiments ou posés sur le sol.

Le terme «photovoltaïque» souvent abrégé par les lettres PV, a été formé par deux mots (photo) qui est un mot grec signifiant lumière et (volta) qui est le nom du Physicien Italien Alessandro VOLTA qui a inventé la pile électrochimique en 1800.

L'histoire du PV débute en 1839 lorsque le physicien français Edmond BECQUEREL découvre **l'effet photovoltaïque** par l'apparition d'un potentiel entre deux électrodes lorsqu'elles sont illuminées.

Les Ukrainiens, Willoughby Smith découvre la photoconductivité du sélénium en 1873, W.G.ADAMS et R.E.DAY développent une jonction solide à base de sélénium en 1877. L'Américain Charles FRITTS est le premier à établir un développement des cellules au sélénium en 1883.

La communauté scientifique de l'époque, n'ayant pas les connaissances nécessaires en physique, n'a pas reconnu les travaux de FRITTS. C'est en 1904, que Albert EINSTEIN, le premier, a pu expliquer l'effet photoélectrique (l'émission d'électrons sous l'effet de la lumière, phénomène à la base du fonctionnement des cellules photovoltaïques), il émet une hypothèse audacieuse: la structure de la lumière elle-même est discrète, c'est-à-dire formée de corpuscules appelés photons.

En 1954, les premières cellules photovoltaïques au Si à haut rendement de 6% [1], ont été développées par les chercheurs américains (Chapin, Fuller, Pearson et Prince) travaillant pour les laboratoires Bell Téléphone (devenus aujourd'hui Alcatel-Lucent Bell Labs) et des chercheurs de Air Force (USA) développent des cellules en couches minces de $\text{Cu}_2\text{S}/\text{CdS}$.

La NASA lance en 1958 le satellite Vanguard qui est alimenté par des piles photovoltaïques au Si.

La première maison avec une installation photovoltaïque voit le jour en 1973 à l'université de Delaware aux Etats-Unis d'Amérique.

Chapitre I: GÉNÉRALITÉS SUR LE PHOTOVOLTAÏQUE

L'étude des cellules solaires en couches minces à base de CuInSe_2 et à base de silicium amorphe débute entre 1973 et 1976.

En 1995 des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon, aux Etats Unis et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001.

Le CuInSe_2 a évolué par ajout de gallium en Cu(In,Ga)Se_2 avec des meilleurs propriétés, avec un rendement record en laboratoire égale à 20,3% [2], et 15,5% en module [3]. Cette technologie est en pleine phase d'industrialisation, et le coût des modules devraient continuer de baisser.

I.2.2. Le soleil

On ne peut pas étudier le PV sans comprendre notre système solaire avec son étoile qui est le soleil.

La lumière nécessaire à la production d'électricité photovoltaïque provient du **soleil**. Le soleil est l'étoile centrale de notre système solaire. Le soleil se compose essentiellement d'hydrogène et d'hélium et dispose de réserves d'hydrogènes pour encore plusieurs milliards d'années.

I.2.3. Le bilan radiatif de la Terre

Le rayonnement est un mode d'échange d'énergie par émission et absorption de radiations électromagnétiques. Le rayonnement solaire qui n'est pas réfléchi (70%, soit en moyenne 240 W/m^2) est absorbé par les gaz de l'atmosphère, par les nuages, par les océans et par la surface des continents. L'absorption de rayonnement se traduit par une élévation de la température de ces différents milieux. Cependant, une partie du rayonnement solaire est réfléchi par la surface terrestre. En moyenne l'albédo terrestre est de 30%, soit de 102 W/m^2 . La Terre reçoit l'énergie solaire sous forme de radiations de courtes longueurs d'onde (0.2 à 4 micromètres) (U.V jusqu'au visible et proche infrarouge). En retour, la Terre perd de l'énergie sous forme d'un rayonnement infrarouge émis vers l'espace (qui refroidit la Terre).

I.2.4. Principe de base de la conversion photovoltaïque

L'**effet photovoltaïque** est le phénomène par lequel on utilise la **lumière** afin de produire de l'électricité. Cette transformation est réalisée grâce à des cellules photovoltaïques qui, regroupées entre elles, constituent des modules photovoltaïques (aussi appelés panneaux photovoltaïques).

Chapitre I: GÉNÉRALITÉS SUR LE PHOTOVOLTAÏQUE

Plus concrètement, l'effet photovoltaïque est obtenu par absorption des photons dans un matériau semi-conducteur par exemple le silicium (Si) qui génère alors une tension électrique.

I.2.4.1. Fonctionnement du panneau photovoltaïque

Un module photovoltaïque plus communément appelé **panneau photovoltaïque** ou encore **panneau solaire** est composé d'un ensemble de **cellules photovoltaïques** qui sont reliées entre elles (soient en séries ou en parallèles). Un ensemble de panneaux constitue une **installation photovoltaïque**. Ainsi une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants:

- absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif ;
- conversion du photon en énergie électrique (les photons transfèrent leur énergie aux électrons présents dans la matière), ce qui correspond à la création de paires électron/trou dans le matériau semiconducteur ;
- collecte des particules générées dans le dispositif.

I.2.4.2. L'installation photovoltaïque

Pour une installation photovoltaïque idéale il faut faire un dimensionnement exact. Le dimensionnement tient en compte de tous les paramètres mis en jeu dans le maintien et le bon fonctionnement du système PV.

Une installation photovoltaïque regroupe l'ensemble des composants nécessaires à la production d'électricité dans le cadre d'un projet (produire de l'électricité dans la maison d'un particulier, par exemple). L'installation photovoltaïque se compose donc des panneaux solaires, du ou des onduleurs et du câblage. En général, une installation photovoltaïque produira plusieurs milliers de watts-crête ; on parlera alors de production en kilowatts-crête (KWc).

Une installation sera dite **en réseau** lorsqu'elle revend au réseau ce qu'elle ne consomme pas, tandis qu'elle sera dite **autonome** lorsqu'elle stocke dans des batteries ce qu'elle n'utilise pas.

Chapitre I: GÉNÉRALITÉS SUR LE PHOTOVOLTAÏQUE

Ainsi on distingue deux types de systèmes photovoltaïques: les systèmes photovoltaïques connectés au réseau et les systèmes photovoltaïques indépendants. Ces derniers peuvent être hybrides.

I.2.4.3. Les composants d'un système solaire photovoltaïque

Les composants d'un système photovoltaïque dépendent de l'application considérée: habitation isolée ou proximité d'un réseau, utilisation de batterie ou «au fil du soleil», convertisseurs de puissance.

Il existe plusieurs composants d'un système photovoltaïque:

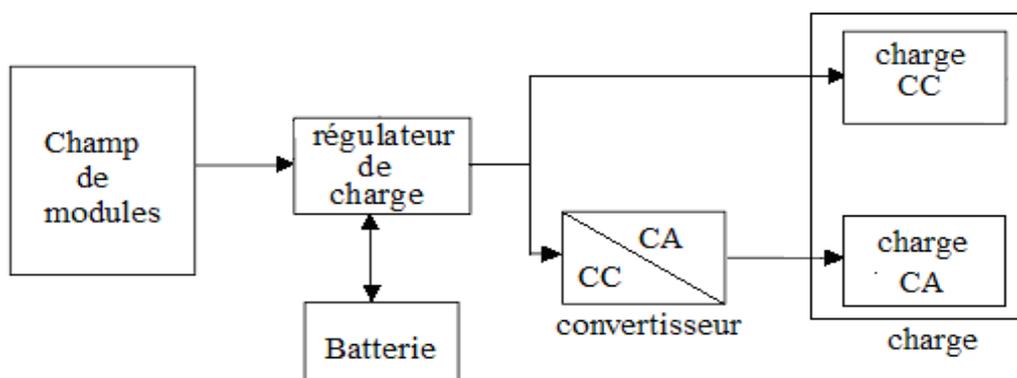


Figure I.2. Représentation du système photovoltaïque autonome

I.2.4.3.1. Le panneau photovoltaïque

Le panneau photovoltaïque aussi appelé panneau solaire ou encore module photovoltaïque est composé d'un ensemble de cellules photovoltaïques qui sont reliées entre elles en série ou en parallèle. La puissance d'un panneau exprimée en watts dépend donc du nombre de cellules qui le composent ainsi que de la puissance de chaque cellule.

I.2.4.3.2. La cellule photovoltaïque et les différents types de cellules solaires

La cellule photovoltaïque est donc la composante du système qui va réellement se charger de produire de l'électricité. Dans le marché industriel, ils existent quatre principaux types de cellules solaires.

I.2.4.3.2.1. Le silicium

Les cellules les plus répandues sont constituées de silicium (Si) qui est un semiconducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant

Chapitre I: GÉNÉRALITÉS SUR LE PHOTOVOLTAÏQUE

électrique continu. Le silicium est l'élément le plus abondant sur terre après l'oxygène, il est parfaitement stable et non toxique. On trouve plusieurs technologies pour le photovoltaïque à base du silicium détaillées ci-après ; d'une part les cellules à base de silicium massif (monocristallin, polycristallin, rubans) dites de premières génération, et qui constituent à l'heure actuelle l'essentiel des modules photovoltaïques et d'autre part la technologie à base de silicium en couche mince.

a) Les cellules monocristallines

Elles sont composées d'un seul cristal et offrent les meilleurs rendements qui varient entre 14 et 18%. Elles ont également de bonnes durées de vie (de l'ordre de 25 ans). Les inconvénients de cette technologie sont les rendements faibles obtenus sous un faible éclairage et surtout le coût prohibitif de production des matériaux.

b) Les cellules polycristallines ou multicristallines

Elles sont composées de plusieurs cristaux. Il s'agit de la technologie la plus représentée sur le marché du photovoltaïque car elle allie à la fois des rendements de conversion élevés avec un coût de production faible par rapport à la filière silicium monocristallin.

c) Les cellules amorphes

Elles sont produites par projection de silicium en couche fine sur du verre ou du plastique (le substrat) par exemple. Elles coûtent moins cher que les autres cellules mais elles ont de moins bons rendements (7 à 10%) et leur durée de vie est plus courte (de l'ordre de 10 ans). C'est le silicium amorphe que l'on trouve le plus souvent dans les produits de consommation comme les calculatrices, les montres etc.... Toutefois, ils réagissent mieux à des températures élevées ou à une lumière diffuse.

Tableau I. 1. Rendement des différentes technologies

Techniques de fabrication	Monocristallin	Polycristallin	Amorphe
Rendement typique (%)	12-16	11-13	5-10
Rendement théorique (%)	24	18,6	12,7

d) **Le silicium en ruban**

Sur le plan technologique, les techniques de production de silicium cristallin en rubans autosupportés ont été très séduisantes. Ces rubans ont connu de nombreux développements au niveau de la recherche et, pour certains d'entre eux, jusqu'à la conception de chaînes de production préindustrielles. Cependant, la vitesse de croissance linéaire extrêmement lente (quelques cm/min) pousse les industriels à abandonner progressivement cette technologie. Les meilleurs rendements obtenus sont néanmoins de l'ordre de 15%.

I.2.4.3.2.2. Les cellules en couches minces

a) **La filière tellure de cadmium/sulfure de cadmium (CdTe/CdS)**

Les cellules au CdTe sont à base de tellure de cadmium, matériau intéressant du fait de sa forte absorption. Cependant, les composés CdS et CdTe ne sont pas solubles dans l'organisme ; CdTe en particulier est un composé extrêmement stable qui ne présente pas de toxicité sous cette forme. Le produit fini en tant que module encapsulé ne présente donc aucun danger, même en cas d'incendie.

b) **La filière chalcopyrite basée sur le Cu^{III}VI₂ (CIS)**

Les cellules au CIS (CuInSe₂) sont à base de cuivre, d'indium et de sélénium. Le semi-conducteur CuInSe₂ appartient au groupe I-III-VI₂ qui est un matériau composé de structure chalcopyrite et qui présente un grand intérêt pour la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire. Ce matériau a la particularité d'être stable sous rayonnement. Elles ont d'excellentes propriétés d'absorption. L'introduction d'atomes de Ga en substitution partielle de l'In, permet d'obtenir de meilleures propriétés. L'étude des couches minces à base de CuInSe₂ a commencé vers les années 1974 et s'est très vite développées à cause de leurs propriétés physicochimiques très remarquables.

I.2.4.3.2.3. Les cellules photovoltaïques organiques

Outre l'utilisation de matériaux semiconducteurs inorganique, il existe de nouvelles approches dans la réalisation de cellules solaires c'est le cas des cellules solaires organiques et des cellules solaires à colorant. La cellule solaire organique est une autre alternative aux matériaux plus conventionnels utilisés pour fabriquer des panneaux photovoltaïques. Bien

Chapitre I: GÉNÉRALITÉS SUR LE PHOTOVOLTAÏQUE

qu'il s'agisse d'une technologie très nouvelle, elle s'avère prometteuse du fait qu'elle constitue une solution à très bas coût.

I.2.4.3.3. Les régulateurs de charge

Plusieurs types de régulateurs peuvent être utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Le régulateur contrôle les flux d'énergie, c'est un système ou un appareil électronique fonctionnant de façon complètement automatique auquel sont raccordés le générateur (panneaux solaires, éolienne, etc.) la batterie ainsi que d'éventuels équipements ou composants de l'installation. Il doit protéger la batterie contre les surcharges et décharges profondes. Il doit assurer la surveillance et la sécurité de l'installation.

I.2.4.3.4. Les convertisseurs

Suivant l'application, on devra souvent utiliser un convertisseur pour adapter la puissance générée à la charge. Il existe principalement deux types de convertisseurs: les convertisseurs DC/DC et les convertisseurs DC/AC.

a) Les convertisseurs DC/DC

Ces convertisseurs fournissent à la charge une tension DC différente de la tension générée par les panneaux. Ils sont également utilisés pour transformer la tension des batteries en une tension DC différente pour alimenter un téléviseur ou autres.

b) Les convertisseurs DC/AC ou onduleurs

Les panneaux photovoltaïques produisent du courant continu. Dans la pratique, nous utilisons principalement du courant alternatif, et plus rarement du continu. La raison principale est qu'il faut pouvoir diminuer et augmenter la tension de l'électricité comme on veut et cela n'est possible qu'avec du courant alternatif (et l'utilisation d'un transformateur). Une installation photovoltaïque devra être équipée d'un ou de plusieurs onduleur, qui est l'appareil qui va se charger de transformer le courant continu en courant alternatif qui pourra alors alimenter une charge isolée mais aussi pour raccorder un générateur photovoltaïque au réseau.

I.2.4.3.5. Les batteries

Généralement les batteries assurent le stockage d'énergie dans les systèmes photovoltaïques autonomes. Le fonctionnement de la batterie est limité dans sa durée de vie par un nombre de cycles de charge et décharge. Il faut donc éviter les décharges trop profondes de la batterie.

I.2.4.3.6. Les autres composants

Les autres composants sont les derniers éléments indispensables au bon fonctionnement d'un système photovoltaïque, par exemple, les protections contre la foudre, les disjoncteurs et les fusibles.

I.2.4.4. Les paramètres physiques d'une cellule solaire

I.2.4.4.1. Modèle équivalent de la cellule photovoltaïque

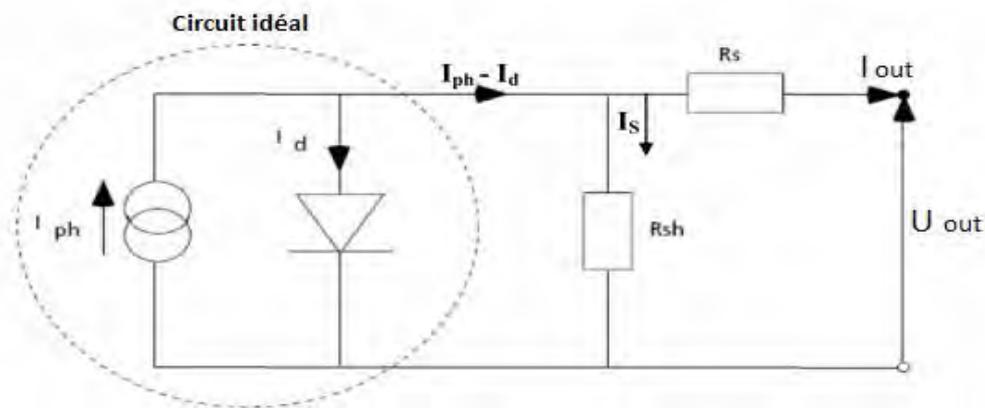


Figure I.3. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

La diode modélise le comportement de la cellule dans l'obscurité. Le générateur de courant modélise le courant I_{ph} généré par un éclairage. Les deux résistances modélisent les pertes internes: la résistance série R_s (modélise les pertes ohmiques du matériau) et la résistance shunt R_{sh} (modélise les courants parasites qui traversent la cellule).

Le courant I issu de la cellule s'écrit alors:

$$I = I_{ph} - I_{od} \left[\exp\left(\frac{q(U + R_s I)}{nkT}\right) - 1 \right] - \frac{U + R_s I}{R_{sh}} \tag{I.1}$$

$$I_d = I_{od} \left[\exp\left(\frac{q(U + R_s I)}{nkT}\right) - 1 \right] \tag{I.2}$$

Chapitre I: GÉNÉRALITÉS SUR LE PHOTOVOLTAÏQUE

I_{ph} : Photocourant, ou courant généré par l'éclairement (A) ;

I_{od} : Courant de saturation de la diode (A) ;

n : Facteur d'idéalité de la diode, égal à 0 ou 1 ;

R_S : Résistance série (Ω) ;

R_{Sh} : Résistance shunt (Ω) ;

k : Constante de Boltzmann ($k = 1,38.10^{-23} SI$) ;

q : Charge de l'électron ($q = 1,602.10^{-19} C$) ;

T : Température de la cellule ($^{\circ}K$).

Dans le cas idéal, nous avons $R_s \approx 0$ et $R_{sh} \rightarrow \infty$ et en supposant que $R_s \ll R_{sh}$ l'équation est simplifiée et devient celle du circuit équivalent d'une cellule idéale sans pertes

$$I = I_{ph} - I_{od} \left[\exp \left(\frac{q(U + R_S I)}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (I.3)$$

Les caractéristiques physiques de la cellule sont largement influencées par la température, ce qui conduit à l'expression suivante :

$$T_c = T_a + \frac{E_m}{800} (TUC - 20) \quad (I.4)$$

T_a : température ambiante ($^{\circ}C$).

TUC : Température d'utilisation de cellule ($^{\circ}C$).

E_m : éclairement moyen (en W/m^2).

I.2.4.4.2. La caractéristique courant tension I(V) d'une cellule solaire

La caractéristique électrique d'une cellule est donnée par sa courbe courant/tension $I = f(V)$. La courbe représente tous les points de fonctionnement possibles que peut fournir la cellule. En voici l'allure générale:

Chapitre I: GÉNÉRALITÉS SUR LE PHOTOVOLTAÏQUE

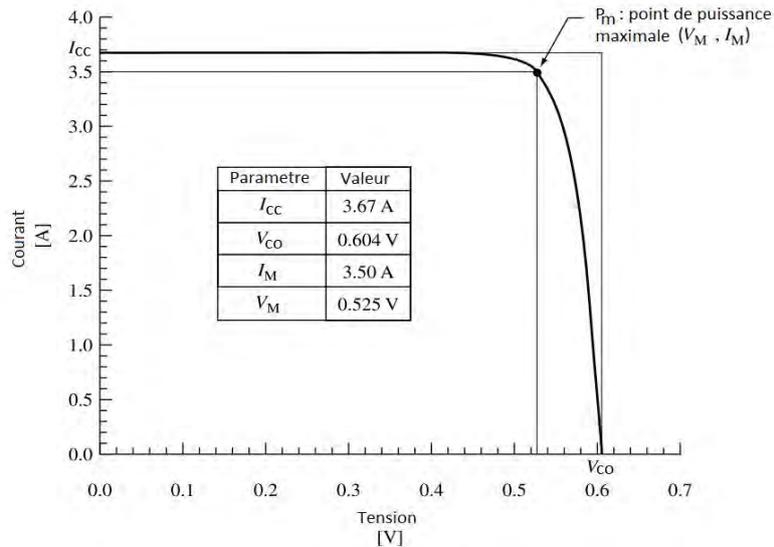


Figure I.4. Caractéristique courant tension I(V) [1]

A partir de cette caractéristique **I-V** de la cellule photovoltaïque, on peut déterminer ses paramètres physiques à savoir:

I_{cc} : courant de court-circuit (obtenu pour $V = 0$) ;

V_{co} : tension en circuit ouvert (obtenu pour $I = 0$).

Ces deux premiers points sont des cas extrêmes où l'on ne peut pas délivrer de puissance.

I_m : courant à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque ;

V_m : tension à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.

Ces deux derniers points définissent le point de puissance maximale.

P: la puissance caractéristique d'une cellule en Watt (disponible aux bornes d'une cellule photovoltaïque est égale au produit du courant continu fourni **I** en Ampère par une tension continue **V** en Volt).

$$P = V \times I \quad (I.5)$$

P_c : la puissance crête d'une photopile, notée P_c (Watt crête) ou W_p (Watt peak), représente la puissance électrique maximale délivrée dans les conditions standards (STC), éclairement de 1000 W/m^2 , une température extérieure de 25°C et facteur de masse d'air de 1,5.

FF: le facteur de forme est le rapport de la puissance maximale au produit $I_{cc}V_{co}$. Le facteur de forme indique la qualité de cellule, il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites R_s (en série, résistance de contact des grilles collectrices) et R_{sh} (en parallèle, mauvaise conductance au niveau de la jonction P-N).

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{cc} V_{co}} = \frac{P_m}{I_{cc} V_{co}} \quad (I.6)$$

η : Le rendement de conversion d'une cellule solaire est le rapport de la puissance maximale pouvant être extraite à la puissance lumineuse incidente.

$$\eta = \frac{I_m V_m}{\phi S} \quad (I.7)$$

I.2.4.4.3. La réponse spectrale

On appelle réponse spectrale d'une cellule photovoltaïque, l'efficacité avec laquelle elle transforme l'énergie d'un rayonnement d'une certaine longueur d'onde en énergie électrique. C'est-à-dire qu'elle permet de mesurer le rendement quantique d'une cellule en fonction de la longueur d'onde de la lumière incidente. Cette efficacité dépend essentiellement des caractéristiques du matériau constituant la cellule photovoltaïque.

I.2.5. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

Les avantages et inconvénients de l'énergie solaire sont nombreux. Nous en citons que quelques uns:

a) Avantages

- Bénéfices environnementaux ;
- Bénéfices énergétiques ;
- Modularité des systèmes photovoltaïques ;
- Intégration dans l'enveloppe du bâtiment ;
- Investissement local dans les énergies renouvelables et mobilisation citoyenne ;
- Le déploiement du photovoltaïque crée de la valeur et des emplois.

b) Inconvénients

- Caractère fluctuant de la production photovoltaïque et impact sur le réseau ;
- L'occupation des sols des centrales photovoltaïques au sol ;
- Une technologie encore trop coûteuse ;
- Des précautions à prendre ;
- Une industrie responsable de certains impacts environnementaux.

I.2.6. Les applications du PV

L'effet photovoltaïque peut être utilisé pour diverses applications, qui se distinguent notamment par leur raccordement ou non au réseau électrique: les produits grand public à usage intérieur, les produits grand public à usage extérieur, applications professionnelles, habitat isolé, bâtiments connectés au réseau, les centrales solaires etc.

I.2.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un aperçu sur l'historique de l'énergie photovoltaïque, le principe de base de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, l'exploitation de la caractéristique courant tension de la cellule pour calculer ses différents paramètres physiques ainsi que les différents types de cellules solaires commercialisées.

Cette étude bibliographique nous a permis de spécifier un domaine en pleine ébullition tant au niveau industriel qu'au niveau de la recherche, la fabrication des semi-conducteurs, composants les cellules solaires en couches minces, le diséléniure de cuivre et d'indium CuInSe_2 noté CIS ou CISE sous sa forme chalcopyrite. Afin d'obtenir de meilleures propriétés, la substitution de l'indium au gallium(CIGS) est obtenu.

Dans le chapitre qui suit, nous décrirons la cellule solaire à base de CIS.