

1.1 Introduction

Le chapitre porte sur les notions fondamentales de la conversion photovoltaïque. On commence par un aperçu sur les énergies renouvelables, suivi par un bref historique sur la conversion photovoltaïque. Ensuite l'effet PV sera discuté. La technologie des cellules solaires et leur fabrication sont aussi évoquées.

1.2 Sources de production de l'électricité

Les sources de la production de l'électricité, appelées sources primaires, peuvent être classées en trois catégories:

- Sources fossiles : gaz (méthane), pétrole (mélange d'hydrocarbure), charbon.
- Sources Fissiles : Nucléaire
- Sources renouvelables: Solaire, Eolien, etc.

1.2.1. Les Energies Fossiles

1.2.1.1 Définition

L'énergie fossile est celle qui est tirée principalement du charbon, pétrole et du gaz naturel. Elles sont appelées fossiles car elles proviennent de la décomposition très lente d'éléments vivants (surtout des plantes) il y a plusieurs millions d'années. Leur quantité est limitée sur terre, leur extraction provoque leur épuisement. Ces matières sont utilisées en les brûlant.

1.2.1.2 Inconvénients

A) La rupture et la sécurité d'approvisionnement

- Les ressources en combustibles fossiles sont finies et face à une demande constamment croissante.
- L'offre ne pourrait plus suivre la demande.
- Ce risque est aggravé par des facteurs géopolitiques (les réserves sont concentrées dans certaines régions du monde politiquement instables).

B) Une catastrophe environnementale

Les énergies fossiles créent du dioxyde de carbone (CO₂) lors de leur combustion. Ces émissions ont un effet néfaste sur l'environnement et contribuent au réchauffement planétaire et du changement climatique à cause d'un effet de serre excessif. A titre d'exemple le taux d'émission introduit par une centrale à gaz est de 386g de CO₂/kWh.

1.2.2 Les Energies Fissiles

1.2.2.1 Fonctionnement

Le fonctionnement d'une centrale nucléaire est basé sur les réactions de fission. Elle repose sur les quatre étapes principales suivantes:

- La source de chaleur
- L'extraction de la chaleur
- L'entraînement de la turbine
- La transformation en électricité

1.2.2.2 Inconvénients

A) Pollution (déchets)

- les déchets radioactifs;
- les émissions de rayons ionisants;
- la décontamination finale des réacteurs radioactifs (très néfastes à l'environnement et peuvent causer des conséquences très dangereuses à l'être vivant).

B) Problèmes de sûreté

- La catastrophe nucléaire de Tchernobyl: c'est un accident nucléaire (1986), Ukraine (URSS à l'époque).
- La catastrophe de Fukushima : C'est un accident industriel (2011) au Japon.

1.2.3 Les Energies Renouvelables

1.2.3.1 Définition de l'énergie renouvelable

Les énergies renouvelables sont des énergies qui se produisent de manière continue et inépuisable. Contrairement aux combustibles fossiles qui se trouvent en quantité limitée et seulement dans un nombre très limité des pays. Les énergies renouvelables sont sécurisées et non polluantes.

1.2.3.2 Avantages

- la non émission des gaz polluants de la combustion des fossiles (CO₂, SO₂ et NO_x);
- elles ne produisent pas de résidus dangereux, comme les énergies nucléaires;
- durables (prévenir une pénurie énergétique majeure);
- alimentations décentralisées (un nombre important de personnes qui ne sont pas reliés à un réseau électrique (question de rentabilité liée à l'éloignement, faible densité de population, pauvreté, peu de besoins).

1.2.3.3 Exemples des énergies renouvelables

On peut citer :

- Energie solaire

L'énergie solaire sous ces deux formes photovoltaïque et thermique dont la source est le soleil.

- Energie éolienne

L'éolien dont la source est le vent; elle est tirée de la force du vent qui circule des hautes vers les basses pressions dans l'atmosphère terrestre.

- Source hydraulique gravitaire

Elle est tirée de la force mécanique des chutes d'eau

- La géothermie

L'exploitation du flux de chaleur qui provient des couches profondes de la terre.

- La biomasse (carburant renouvelable)

la biomasse dont la source est les matières organiques d'origine végétale (algues incluses), animale ou fongique (champignons) pouvant devenir source d'énergie par combustion (ex : bois énergie), après méthanisation (biogaz) ou après de nouvelles transformations chimiques (agro carburant).

...

1.3 Energie solaire et ses types

On distingue trois types : le solaire passif, le solaire photovoltaïque et le solaire thermique.

1.3.1 Solaire passif

Le solaire passif consiste en utilisation directe du rayonnement solaire ; c'est la plus ancienne technique connue. Son exploitation est bien sentie sur la conception des maisons ou des bâtiments (chauffage et éclairage).

1.3.2 Solaire thermique

L'énergie solaire thermique consiste à utiliser la chaleur issue du rayonnement solaire. Ce rayonnement se présente sous différentes façons :

- en usage direct de la chaleur : chauffe-eau, fours solaires, cuisinières et sécheuses solaires;
- en usage indirect, la chaleur servant pour un autre usage: exemple centrales solaires thermodynamiques.

Exemple d'Énergie solaire pour la cuisson des aliments

Apparue dans les années 1970, la cuisine solaire consiste à préparer des plats à l'aide d'un cuiseur ou d'un four solaire. Les petits fours solaires permettent des températures de cuisson de l'ordre de 150 C, les paraboles solaires permettent de faire les mêmes plats qu'une cuisinière classique à gaz ou électrique. L'utilisation de l'énergie solaire pour la cuisson des aliments, au-delà d'être gratuite et abondante sur certaines zones géographiques, permet également de réduire la déforestation dans certains pays où la cuisine au bois et au charbon est la norme. Elle permet par la même occasion la diminution des émissions de CO₂ dans l'atmosphère, d'environ 4 tonnes de CO₂ par an pour une famille africaine cuisinant au bois par exemple.

1.3.3 Solaire photovoltaïque

1.3.3.1 Définition

L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire par certains matériaux quand ils sont exposés à la lumière (grâce à l'effet photovoltaïque). Les matériaux les plus répandus sont constitués de semi conducteurs, principalement à base de silicium (Si) dont l'élément de base est la cellule photovoltaïque.

Après le choc pétrolier des années soixante, le solaire photovoltaïque s'est imposé comme une source alternative d'énergie.

1.3.3.2 Avantages

- Les systèmes photovoltaïques sont simples et rapides à installer ;
- la production électrique photovoltaïque est robuste, tolérante aux pannes et nécessite peu de maintenance (aucune partie en mouvement);
- La production électrique est réalisée, hors processus de fabrication, sans combustion et à un niveau de température peu élevée. Donc pas d'usure thermique des composants ;
- Longue durée des générateurs photovoltaïques ;
- Les modules photovoltaïques sont recyclables.

1.3.3.3 Inconvénients

- aspect intermittent (l'alimentation dépend de la présence du soleil);
- rendement faible;
- cout initial élevé (nécessité de stockage pour le passage des ombres et les nuits)

1.3.3.4 Historique Conversion photovoltaïque

Le mot photovoltaïque vient du Grec « photôs » qui signifie lumière et de « Volta » du nom physicien italien qui, en 1800, découvrit la pile électrique. Son historique est comme suit :

- L'effet photoélectrique

1839 : Découvert par Antoine César Becquerel et son fils Edmond, France

1875 : Werner Von Siemens (1816-1892) expose devant l'académie des sciences de Berlin un article sur l'effet PV dans les semi conducteurs. Mais jusqu'à la seconde Guerre mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.

1886 : Étudié par Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894, Allemagne)

1905 : Expliqué par Albert Einstein (1879-1955), Fig. 1.2. Il a découvert, en travaillant sur l'effet photoélectrique, que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie était portée par des particules : les photons.

1954 : Trois chercheurs américains (Chapin, Pearson et Prince) mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement (9 %) et les Laboratoires Bell construisent le premier module solaire mais il était trop coûteux pour être produit en série (application pour les satellites).

1958 : Premier satellite artificiel équipé de cellules solaires (Vanguard I), suivi du lancement de plusieurs satellites équipés de systèmes photovoltaïques. Le rendement a connu un progrès très rapide de 8% en 1957 à 14% en 1960.

1960 : Les années 60 voient un ralentissement de l'évolution du rendement des cellules au silicium. A cause du prix élevé des cellules solaires, la seule application a été dans le domaine spatial et cela jusqu'aux années 70.

1973 : Crise pétrolière. Développement des systèmes solaires (la première maison alimentée par des cellules PV est construite à l'Université de Delaware, Etats-Unis).

1983 : La première voiture alimentée par énergie solaire PV parcourt une distance de 4000km en Australie.

1985 : Université de Nouvelle-Galles du Sud (Australie) : Piles de rendement 20%

1994 : National Renewable Energy Laboratory (NREL): pile de rendement 30%.

Fin 2014 Empire Valley Project, avec une puissance de 890 mégawatts (Amérique).

- Aujourd'hui

- Gros travail de recherche partout dans le monde.
- Plusieurs stations solaires PV (1MWc et plus) à injection au réseau sont implantées à l'échelle nationale.
- Technologie qui commence à approcher de la viabilité économique.
- Les prix en baisse pour le Watt produit par l'énergie photovoltaïque.

1.4 Notion de la Conversion Photovoltaïque

1.4.1 L'effet photovoltaïque : définition

La conversion photovoltaïque est l'opération que subissent certains matériaux quand ils sont soumis au rayonnement solaire pour produire de l'électricité.

Dans la conversion photovoltaïque trois phénomènes physiques sont mis en jeu :

- L'Absorption de la lumière dans le matériau ;
- le Transfert d'énergie des photons aux charges électriques ;
- la collecte des charges.

Le matériau doit avoir des propriétés optiques et électriques spécifiques pour permettre la conversion photovoltaïque.

1.4.1.1 Absorption de la lumière dans le matériau

La lumière se compose de photons « grains de lumière » chacun porteur d'une énergie dépendant de sa longueur d'onde (couleur du rayon). Ces photons peuvent pénétrer dans certains matériaux. Par exemple les objets transparents pour notre œil laissent passer la lumière visible.

Quand la lumière atteint la surface d'un matériau, elle va subir trois événements optiques comme le montre la fig. 1.1. Ce sont les propriétés optiques des matériaux rencontrés qui conditionnent la répartition de ces diverses contributions.

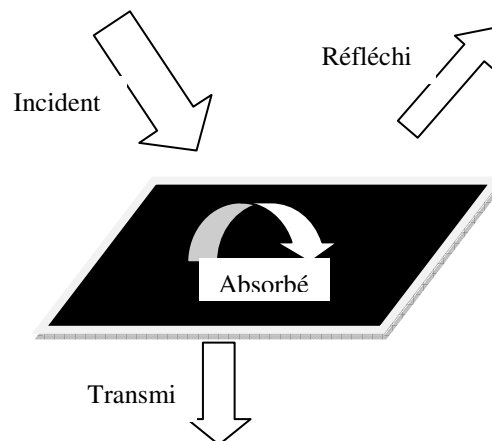


Fig. 1.1 Événements subis par un flux lumineux

1.4.1.2 Transfert d'énergie des photons aux charges électriques

Les photons absorbés vont transférer leurs énergies aux électrons périphériques (les plus éloignés du noyau). Ce qui leur permet de se libérer de l'attraction de leur noyau. Ces électrons libérés sont susceptibles de produire un courant électrique si on les attire ensuite vers l'extérieur.

La figure 1.2 montre le comportement du matériau semi-conducteur pour les deux cas : cas d'obscurité et le cas de l'exposition à la lumière. Dans le premier cas la bande de conduction est vide. Par contre dans le deuxième cas où le matériau est exposé à la lumière, les électrons vont être libérés grâce aux photons d'énergie supérieure à la bande interdite du matériau. L'excès d'énergie est dissipé sous forme de chaleur dans le matériau. Cette propriété dite photoconductivité est spécifique aux semi-conducteurs ; ils comportent des électrons libérables ; contrairement aux isolants où tous les électrons sont fortement liés et aux conducteurs électriques dans lesquels il y a une forte densité d'électrons totalement libres.

On appelle Gap optique (bande interdite) un seuil minimal d'énergie nécessaire à cette libération des électrons par les photons. Ce seuil dépend du matériau utilisé.

Pour un photon l'énergie est :

$$E = \frac{hC}{\lambda}$$

La valeur de cette énergie en électron volt est :

$$E = \frac{1.24}{\lambda(\mu m)}$$

C'est des longueurs d'ondes qui sont proches d'infrarouge pour le silicium
 Pour une puissance de 1350W/m² hors atmosphère (AM0) et pour le silicium:

E_g= 1.1 eV, Courant (mA/cm²): 53.5, Puissance (mW/cm²): 58.8 et le Rendement(%): 44

Remarque

Les deux mécanismes de perte les plus importants dans les cellules solaires à simple bande interdite sont l'impossibilité de convertir des photons d'énergies inférieures à la bande interdite en électricité et la thermalisation des énergies de photons dépassant la bande interdite. Ces deux mécanismes représentent à eux seuls la perte d'environ la moitié de l'énergie solaire incidente processus de conversion. Ainsi, le rendement de conversion énergétique maximal d'une cellule solaire à simple jonction est considérablement inférieur à la limite thermodynamique.

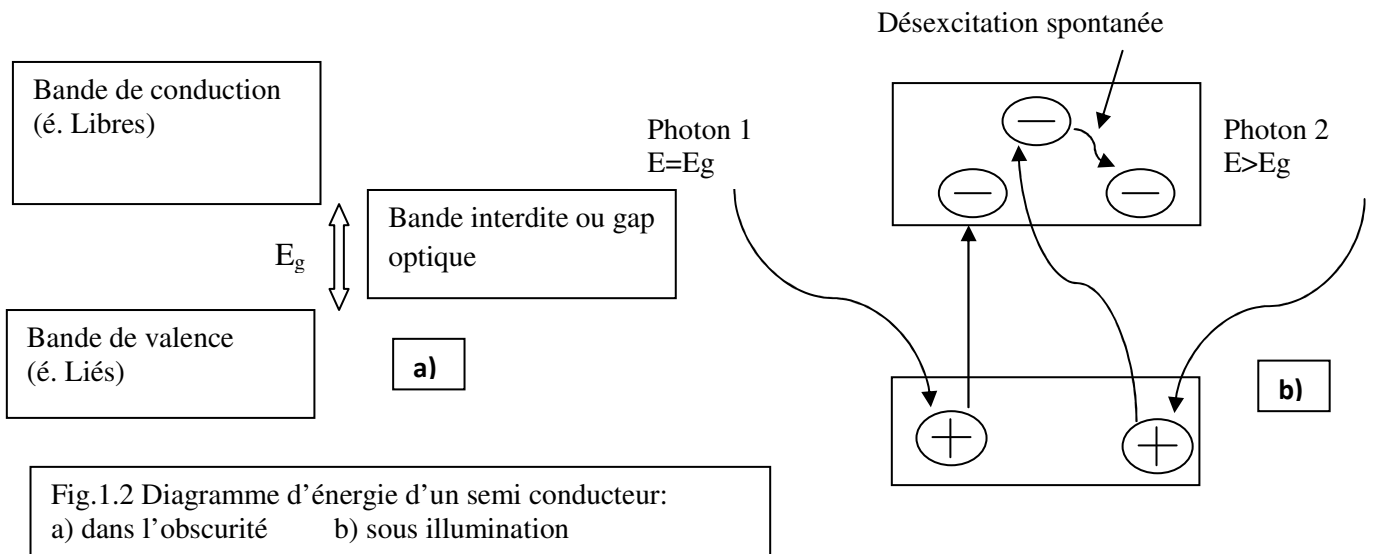
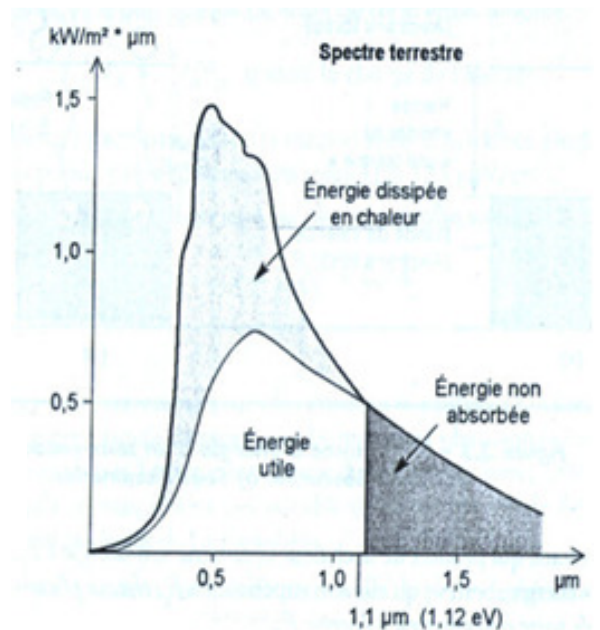


Fig.1.2 Diagramme d'énergie d'un semi conducteur:
 a) dans l'obscurité b) sous illumination

La figure 1.3 montre le Comportement du silicium envers le spectre solaire terrestre. Le spectre est divisé en trois zones: l'une représente l'énergie dissipée en chaleur (E_{ph}>E_g), la deuxième l'énergie utile (E_{ph}=E_g) et la dernière l'énergie non absorbée par le silicium (E_{ph}<E_g).

Fig. 1.3 Spectre solaire AM0
 Portions exploitables par le Si



1.4.1.3 Collecte des charges

A) Nécessité de création d'un champ intérieur du matériau

Pour que les charges libérées par l'illumination soient génératrices d'énergie, il faut qu'elles circulent. Il faut donc les attirer hors du matériau semi-conducteur dans un circuit électrique sinon elles se recombinent. Alors d'où la création d'une Jonction volontairement dans le semi-conducteur pour engendrer un champ électrique à l'intérieur du matériau qui va entraîner les charges négatives d'un côté et les charges positives d'autre côté.

B) Notion du dopage

Le dopage est une opération qui permet d'introduire des atomes étrangers dans le matériau semi-conducteur afin d'améliorer la conductivité du matériau en créant un champ électrique au sein du matériau. Deux types de dopage : dopage de type n et le dopage de type p (voir fig. 1.4).

- Dopage type n

Dans ce cas c'est les éléments de 5 électrons (exemple phosphore) dans la couche externe (valence). Dans le réseau cristallin de Si, l'un de ces cinq électrons est de trop. C'est le dopage N. Cet électron reste libre dans la bande de conduction. A température ambiante, le Si dopé au phosphore à 1ppm présente 5×10^{16} électrons de conduction / cm^3 chose qui est très supérieure au nombre de porteurs intrinsèques (c-a-d. du Si pur à T ambiante qui est 1.6×10^{10} électrons de conduction / cm^3).

Dopage type p

Dans ce cas c'est les éléments de 3 électrons (exemple du bore) dans la couche externe (valence). Dans le réseau cristallin de Si, l'une des liaisons est déficitaire en électrons. Il s'agit d'un trou positif. C'est le dopage P. un électron de la bande de valence peut le combler, ce qui libère un autre trou.

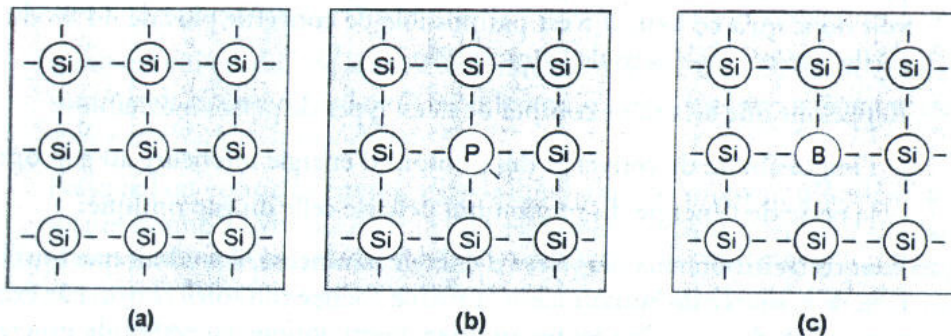


Fig. 1.4 Dopage de Si : a) Si pur (intrinsèque) b) Si type n (donneur) , c) Si type p (accepteur)

C) Jonction PN: diode

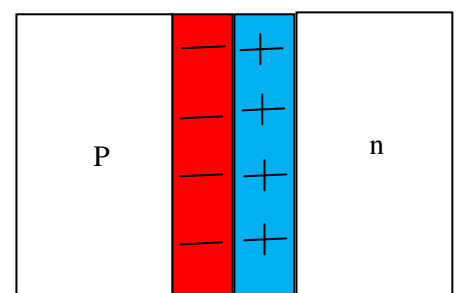
On accole deux semi conducteurs de même bande interdite E_g et de type N et P. Au point de contact, à l'équilibre, il y a recombinaison des paires électron-trou. Alors les porteurs ne peuvent plus se déplacer. Il y a création d'une barrière de potentiel au niveau de la zone de déplétion : création d'une différence de potentiel électrostatique (fig. 1.5). C'est la création d'une cellule solaire.

Lorsque la cellule est éclairée, des paires électron/trou sont créés. Le champ électrostatique au niveau de la jonction, pousse les électrons vers la zone N et les trous vers la zone P. Une différence de potentiel apparaît alors.

Remarque

Elle est préférable pour le silicium cristallin et non pour le Si amorphe

Fig. 1.5 Création d'une jonction PN



1.5 Cellule solaire de silicium

1.5.1 Constitution

La cellule photovoltaïque est fabriquée à partir de deux couches de silicium (matériau semiconducteur), voir fig. 1.6a : une couche dopée avec du bore qui possède moins d'électrons que le silicium, cette zone est donc dopée positivement (zone P), - une couche dopée avec du phosphore qui possède plus d'électrons que le silicium, cette zone est donc dopée négativement (zone N).

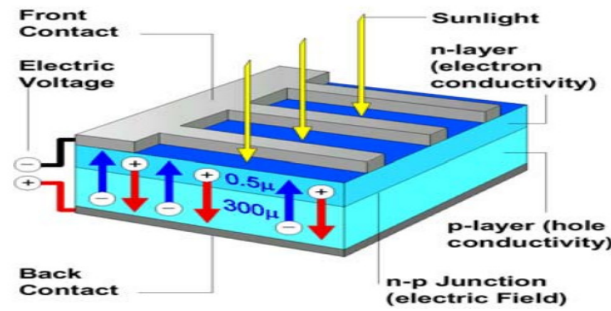


Fig. 1.6a Constitution d'une cellule solaire de silicium

1.5.2 Principe

La conversion de l'énergie solaire en énergie électrique se déroule en 3 étapes:

- absorption de la lumière avec génération de paires électron-trou dans la base p;
- séparation des paires électron-trou dans la zone avec charge d'espace (SCR);
- recombinaison, après que le courant I_{photo} ait parcouru le consommateur;

La figure 1.6b montre la constitution d'une cellule solaire d'après le document du Prof. Wagmann de la TU Berlin, RFA.

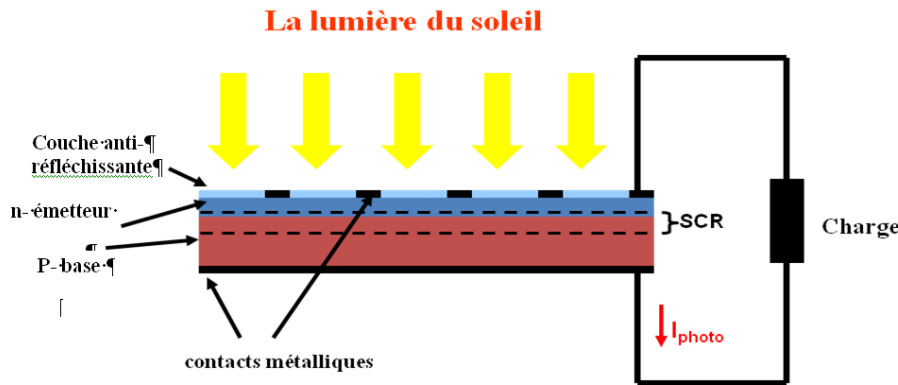
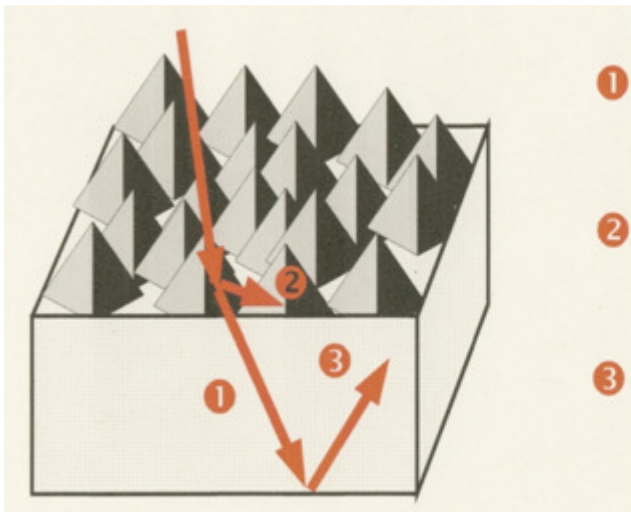


Fig.1.6b Constitution d'une cellule solaire

1.5.3 Réduction des pertes de réflexion par attaque chimique anisotrope de Si

Pour exploiter mieux les rayons incidents, la surface avant du Si doit être bien traitée afin d'exploiter le maximum des rayons incidents. La figure 1.7 donne la configuration de la surface traitée par l'attaque chimique par KOH.



- ① Entrée oblique des rayons de lumière par les cotés des pyramides structurés par attaque chimique
- ② Deuxième chance d'entrée pour les rayons après une réflexion au coté d'une pyramide
- ③ Plusieurs transitions des rayons à travers du Si et réflexions internes de la lumière

Fig. 1.7 Surface du Si après l'attaque chimique

1.5.4 Schéma équivalent d'une cellule solaire

Les figures 1.8 et 1.9 représentent le schéma équivalent d'une cellule solaire à une seule diode et deux diodes respectivement.

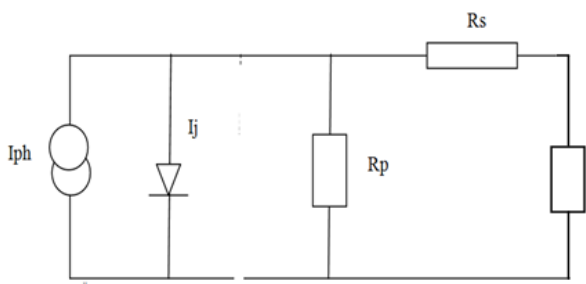


Fig. 1.8 schéma équivalent d'une cellule solaire à une diode

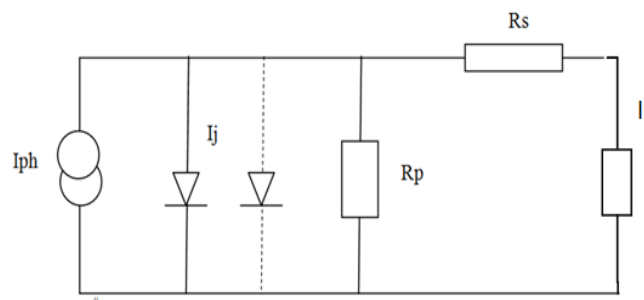


Fig. 1.9 schéma équivalent d'une cellule solaire à deux diodes

1.5.5 Caractéristique I-V

Cas d'une seule diode

L'équation est donnée par :

$$I = I_{ph} - I_D - I_p$$

Avec

$$I_D = I_s \left(e^{\frac{q(U+RsI)}{aKT}} - 1 \right)$$

Et

$$I_p = \frac{U + RsI}{R_p}$$

D'où

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{q(U+RsI)}{aKT}} - 1 \right) - \frac{U+RsI}{R_p}$$

Où

I_{ph} est le photocourant, I_D courant de la diode, I_s courant de saturation de la diode, K constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$), a facteur d'idéalité de la diode (compris entre 1 et 2), T température absolue en Kelvin, q charge de l'électron ($1,602 \times 10^{-19}$), U la tension aux bornes de la cellule, I le courant traversant la charge, R_s est la résistance série, elle tient compte des pertes ohmiques du matériau des

métallisations et du contact métal/semi-conducteur, R_p est la résistance parallèle ; c'est la résistance de fuite provenant des courants parasites entre le dessus et le dessous de la cellule, par le bord en particulier et à l'intérieur du matériau par des irrégularités ou impuretés.

Cas de deux diodes

Le courant devient

$$I = I_{ph} - I_{D1} - I_{D2} - I_p$$

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left(e^{\frac{q(U+R_s I)}{a_1 K T}} - 1 \right) - I_{s2} \left(e^{\frac{q(U+R_s I)}{a_2 K T}} - 1 \right) - \frac{U+R_s I}{R_p}$$

Où

I_{s1} et I_{s2} sont les courants de saturation des diodes D1 et D2 respectivement. a_1 a_2 sont les facteurs d'idéalité des diodes D1 et D2 respectivement.

1.5.6 Puissance et rendement

La figure 1.10 montre la courbe I-V d'une cellule solaire. Elle est caractérisée par trois zones ; la première est la zone du courant de court circuit qui se caractérise par un courant pratiquement constant, la deuxième est la zone proche de la tension du circuit ouvert, elle a pratiquement une tension constante et la troisième zone contient le point de puissance maximale; c'est la zone qu'on cherche dans le fonctionnement. Donc les trois points remarquables dans la courbe sont : le courant de court circuit (I_{cc}), la tension de circuit ouvert (V_{c0}) et le point de puissance maximale (P_m).

Le rendement est défini comme suit :

$$\tau = \frac{P_m}{E \cdot S}$$

Où E est l'éclairement en (W/m^2) et S la surface effective de la cellule (m^2) .

Le rendement est souvent mesuré dans les conditions de référence (STC) : $1000W/m^2$ et $T_c = 25^\circ C$ sous un spectre AM1.5.

Le facteur de forme est défini comme suit :

$$FF = \frac{P_m}{I_{cc} \cdot U_{c0}}$$

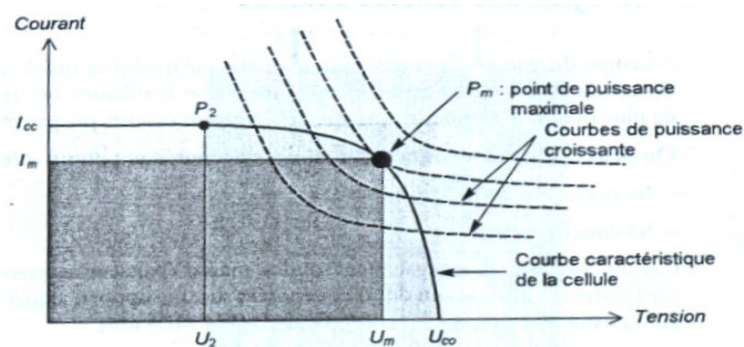


Fig.1.10 Courbe I-V d'une cellule solaire

1.5.7 Effets de l'éclairement et la température sur la caractéristique I-V

La figure 1.11 montre les variations de la caractéristique I-V pour différentes valeurs d'éclairement pour une température constante. Le courant d'une cellule est proportionnel à l'éclairement. La tension en circuit ouvert varie de manière logarithmique avec l'éclairement.

La figure 1.12 montre les variations de la caractéristique I-V pour différentes valeurs de la température pour un éclairement constant. Le courant augmente peu avec l'élévation de la température, par contre la tension baisse avec l'augmentation de la température.

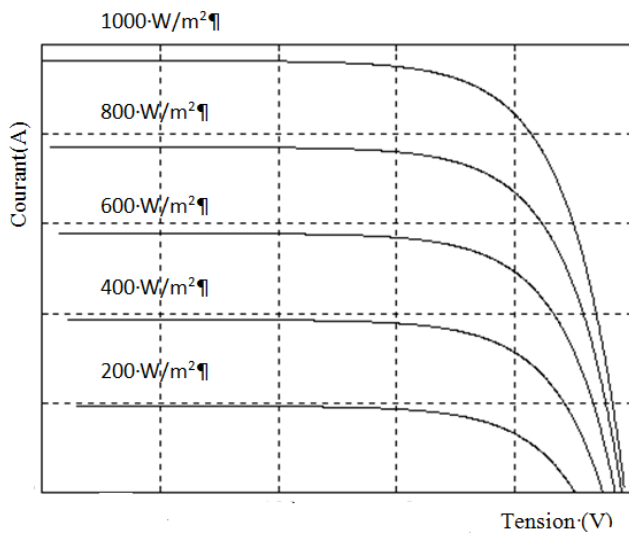


Fig. 1.11 Effet de l'éclairement sur les caractéristiques I-V à température constante

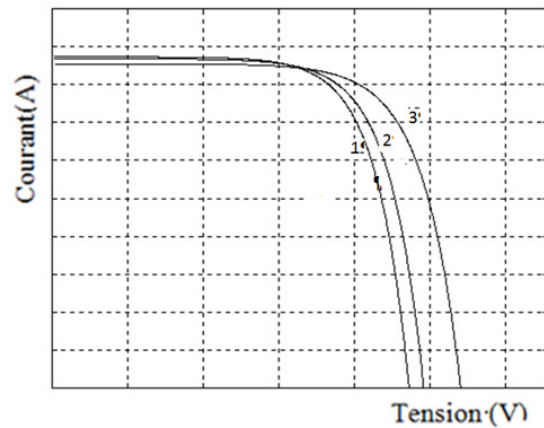


Fig. 1.12 Effet de la température sur les Caractéristiques I-V ($T_1 > T_2 > T_3$) à éclairement constant

1.5.8 Effets des résistances série et shunt

1.5.8.1 Effet de la résistance série

La figure 1.13 montre l'effet de la résistance série sur la caractéristique I-V. On remarque que la partie du code de la caractéristique I-V vers la tension de circuit ouvert est modifiée ; il y a une perte de puissance. L'effet touche beaucoup plus la tension.

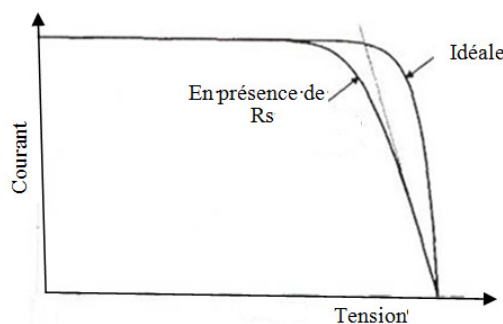


Fig. 1.13 Effet de la résistance série sur la caractéristique I-V

1.5.8.2 Effet de la résistance shunt

La figure 1.14 montre l'effet de la résistance shunt sur la caractéristique I-V. On remarque que la partie du code de la caractéristique I-V vers le courant de court circuit est modifiée ; il y a une perte de puissance. L'effet touche beaucoup plus le courant.

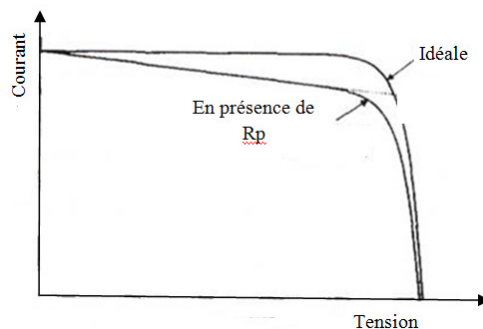


Fig. 1.14 Effet de la résistance shunt sur la caractéristique I-V

