
Généralités sur la conversion photovoltaïque et technologie de la cellule

1.1. Introduction

La terre reçoit, chaque année l'équivalent de 10 000 fois la consommation mondiale en énergie, grâce à l'irradiation du soleil. Cette ressource est donc inépuisable et à l'heure où le recours aux énergies fossiles est remis en cause, le photovoltaïque se développe de plus en plus.

La méthode la plus simple pour la production d'énergie solaire est celle de la conversion photovoltaïque, qui consiste à transformer l'énergie solaire en énergie électrique au moyen de capteurs solaires. Ces cellules sont élaborées sur base de silicium pur avec addition d'impuretés de certains éléments chimiques, ils sont capables de produire chacun de 2 à 4 Ampères, à un voltage de de 0.46 à 0.48 V, utilisant le rayonnement solaire comme source d'énergie. Ces cellules ont la particularité de pouvoir transformer autant le rayonnement solaire directe que diffus ce qui permet leurs utilisation les jours nuageux. Les cellules sont montées en série sur les modules solaires pour obtenir un voltage adéquat aux applications électriques ; les modules recueillent l'énergie solaire en la transformant directement en énergie électrique sous forme de courant continu, qu'il sera nécessaire de stocker dans des accumulateurs, si l'on souhaite, pour pouvoir l'utiliser pendant la nuit.

1.2. Le soleil

L'intérieur solaire est composé de trois régions :

- Le noyau
- La zone radiative
- La zone de convection

L'atmosphère est elle aussi composée de trois zones :

- La photosphère
- La chromosphère
- La couronne

1.2.1. Le noyau

Le noyau est la région la plus centrale du Soleil. C'est de là que provient toute l'énergie solaire, traversant toutes les couches jusqu'à la surface, puis l'espace interplanétaire. Le noyau est une zone particulièrement importante puisqu'il est le siège des réactions thermonucléaires donnant lieu à l'énergie dégagée par le Soleil sous forme de rayonnement.

1.2.2. La zone radiative

La zone radiative entoure le noyau de 0.3 à 0.8 du rayon solaire. Comme son nom l'indique, l'énergie émise par le noyau est transférée vers la surface sous forme de radiations électromagnétiques, c'est à dire sous forme de photons. Ces photons rentrent en collision avec les particules (atomes ionisés) du milieu. Ces collisions successives ont deux effets :

- Ralentir la sortie des photons (au lieu de 2.5 secondes, les photons mettent plus d'un million d'années pour atteindre la surface du soleil),
- Changer l'énergie des photons (ils perdent peu à peu de l'énergie).

1.2.3. La zone convective

La zone de convection est la dernière couche de ce que l'on appelle l'intérieur du soleil. La température décroît suffisamment (de $2 \cdot 10^6$ à $6 \cdot 10^3$ Kelvin) pour que des atomes se forment. La densité aussi décroît considérablement. L'énergie n'est plus transportée par rayonnement mais par convection vers la surface: le rayonnement chauffe la matière qui monte, se refroidit à proximité de la surface et se renforce alors. Cette convection est visible au niveau de la photosphère sous forme de granulation [2].

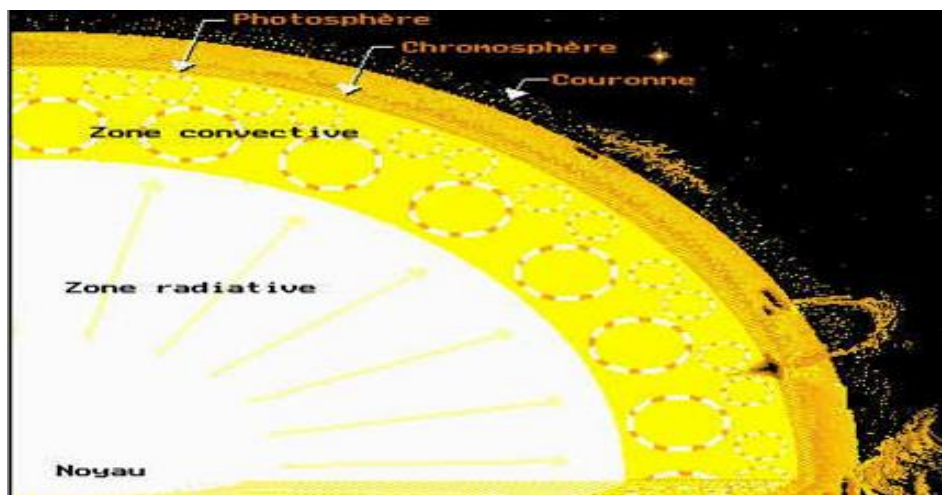


Figure 1.1. Vue en écorché de l'intérieur solaire.

1.2.4. La photosphère

La photosphère est la première couche de l'atmosphère solaire. C'est la partie "visible à l'œil nu" du Soleil. C'est une zone d'environ 500 km d'épaisseur où la température décroît avec l'altitude de 5800K à 4200K. 99% de la lumière émise par le Soleil provient de la photosphère.

1.2.5. La chromosphère

La chromosphère s'étend de 500 à 200km d'altitude. Visible comme un fin liseré rougeâtre autour du Soleil lors des éclipses totales de Soleil, la chromosphère peut être observée au-dessus du disque solaire grâce à des filtres spéciaux qui coupent l'intense lumière de la photosphère.

1.2.6. La zone de transition

C'est dans cette région que commencent à être visibles les trous coronaux. Il s'agit de régions, parfois de très grande taille (avoisinant 50% de la surface solaire pour les plus grands), où les lignes de champ magnétique, au lieu de se refermer sur le Soleil, s'ouvrent vers l'espace, favorisant l'émission rapide de particules dans le milieu interplanétaire. La densité et la température y étant plus faibles, ces régions paraissent sombres.

1.2.7. La couronne

La couronne est le nom que l'on donne à l'ensemble de l'atmosphère extérieure du Soleil qui s'étend jusque dans le milieu interplanétaire. Du fait de sa très faible densité, la couronne solaire n'est observable en longueur d'onde visible qu'au cours d'une éclipse naturelle (le disque solaire est caché par la lune) ou artificielle (le disque solaire est caché par un masque mis devant un télescope) [2].

1.3. Rayonnement solaire

Le rayonnement émis par le soleil est constitué d'ondes électromagnétiques dont une partie parvient constamment à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre.

En raison de la température superficielle du soleil (environ 5800 K), ce rayonnement électromagnétique se situe dans la gamme de longueur d'onde de la lumière visible (entre 0,4 et 0,75 μm) et dans le proche infrarouge (au-delà de 0,75 et jusqu'à 4 μm environ). L'énergie véhiculée par ce rayonnement, moyennée sur une année et sur l'ensemble de la limite supérieure de l'atmosphère, correspond à un éclairement de 1367 W.m^{-2} (Fig1.2). Un bilan énergétique montre que, sur cette quantité d'éclairement qu'apporte le soleil au système terre+atmosphère, environ 410 W.m^{-2} sont réfléchis vers l'espace ; seul le reste est absorbé, pour un tiers par l'atmosphère et pour les deux tiers par la surface de la terre.

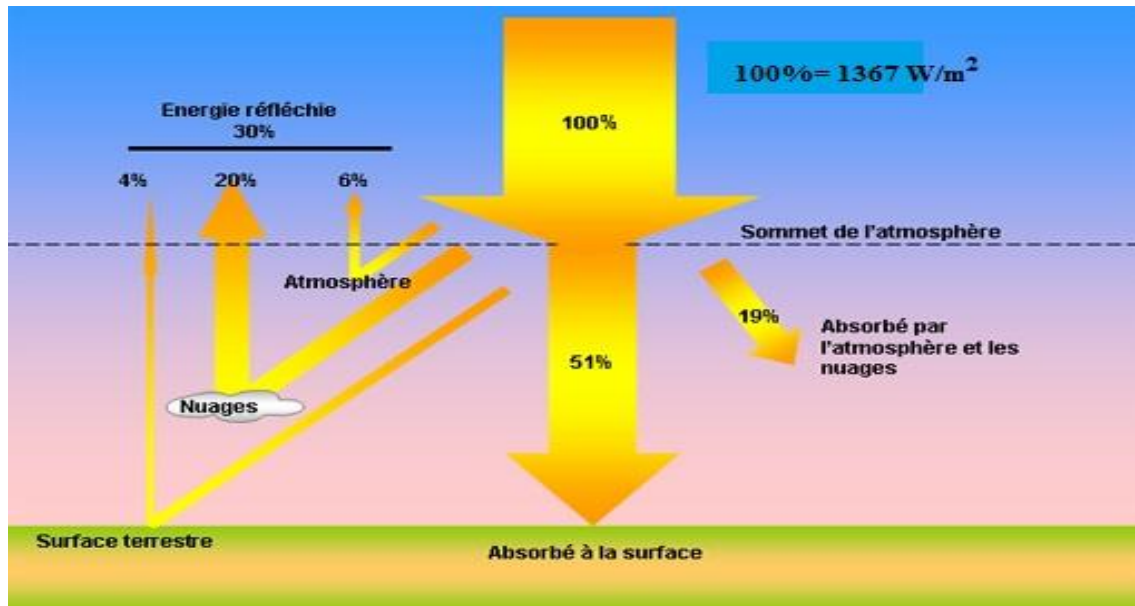


Figure 1.2. Répartition de rayonnement solaire

La figure 1.2 montre que près du quart de cet éclairement incident est réfléchi dans l'espace par l'atmosphère: pareille réflexion est essentiellement le fait des nuages (264 W.m^{-2}), le reste (80 W.m^{-2}) étant dû aux autres constituants atmosphériques comme les gaz et aérosols. Il reste donc 603 W.m^{-2} qui parviennent à la surface terrestre au terme d'une transmission dont les deux tiers (120 W.m^{-2}) se font directement, le reste (60 W.m^{-2}) s'effectuant par diffusion vers le bas. Intervient alors un processus complexe d'interaction entre la diffusion vers le bas et la réflexion. Sur les 180 W.m^{-2} incidents, la surface terrestre, qui possède un albédo* moyen élevé, devrait renvoyer dans l'atmosphère environ 50 W.m^{-2} .

En fait, la majeure partie de l'éclairement qu'elle réfléchit ainsi lui revient tôt ou tard et s'ajoute partiellement aux $180 - 50 = 130 \text{ W.m}^{-2}$ de rayonnement solaire non réfléchis à son contact. Bien que l'absorption du rayonnement solaire soit un phénomène continu, on peut simplifier la compréhension du processus précédent en supposant que les 50 W.m^{-2} réfléchis par la surface du globe se répartissent entre 20 W.m^{-2} .

Albédo: rapport de l'énergie solaire réfléchie sur l'énergie solaire incidente par une surface définitivement renvoyés vers l'espace interplanétaire et 30 W.m^{-2} qui reviennent à la surface terrestre après diffusion différée vers le bas. Cette énergie s'ajoute aux 130 W.m^{-2} initialement non réfléchis pour constituer approximativement les 160 W.m^{-2} qu'absorbe la surface terrestre[3].

Pour tenir compte de la distance traversée par les rayons lumineux, on introduit la notion du nombre de masse d'air AMx, x étant défini par :

$$x = \frac{1}{\sin(\theta)} \quad (1.1)$$

θ Représentant l'élévation du soleil sur l'horizon (figure 1.3)

On définit ainsi les conditions AM1 quand le soleil est au zénith et AM2 quand le soleil est à 30° au-dessus de l'horizon. La condition hors atmosphère est représentée par la notation AM0.

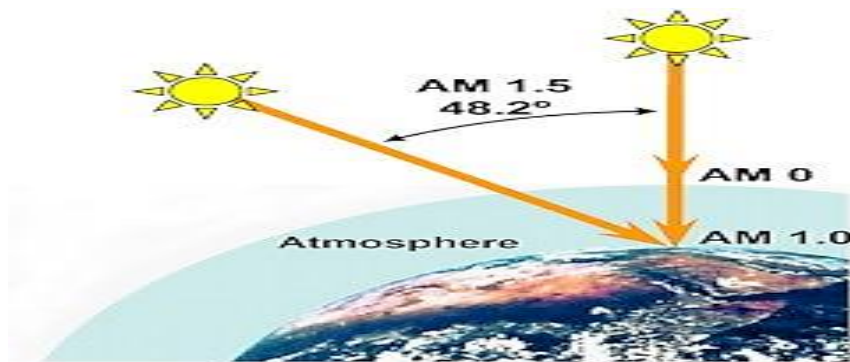


Figure 1.3. Schéma indiquant le nombre d'air masse AMx en fonction de la position géographique

La condition AM1.5 est satisfaite lorsque le soleil est à 48.2° au-dessus de l'horizon. Elle est caractérisée par la distribution spectrale représentée sur la figure 1.3 avec un éclairement de 1000 W.m^{-2} . La norme internationale choisie correspond à un éclairement de 1000 W/m^2 pour une traversée d'atmosphère AM1.5 [4].

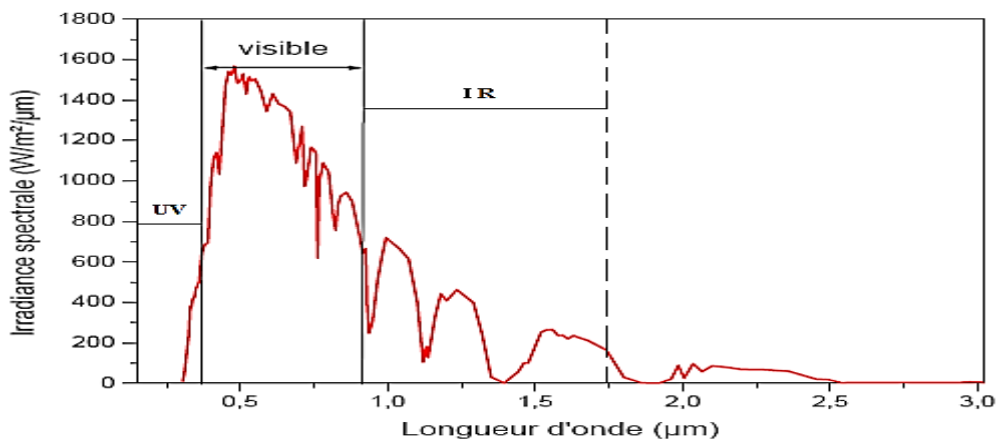


Figure 1.4. Spectre AM 1.5 du rayonnement solaire.

1.4. Cellules solaires

1.4.1. Fonctionnement d'une cellule solaire

Pour obtenir une conversion photovoltaïque efficace, les matériaux choisis doivent satisfaire les conditions suivantes :

- En premier lieu, ils doivent absorber les photons issus du rayonnement solaire incident.
- Des charges libres doivent être créées à l'intérieur de ces matériaux.
- Ces charges doivent ensuite rejoindre les électrodes ce qui suppose des mobilités de porteurs suffisamment élevées associées à une collection de charges efficace.

2.4.1.1. Absorption optique des semi-conducteurs

Lorsque le flux solaire pénètre dans un semi-conducteur, une partie de ce rayonnement est réfléchi, une autre est absorbée et une dernière composante traverse la couche de matériau sans être absorbée. Les propriétés optiques d'un solide sont conditionnées par son schéma de bandes conventionnel tracé dans l'espace réciproque k . Pour une incidence quasi normale sur une surface de séparation entre deux milieux 1 et 2, le coefficient de réflexion, ou la fraction de l'intensité lumineuse réfléchi, est donné par la formule de Fresnel (Si le premier milieu est le vide)[5].

$$R = \left[\frac{n - 1}{n + 1} \right]^{-2} = \left[\frac{\sqrt{\epsilon_r} - 1}{\sqrt{\epsilon_r} + 1} \right]^{-2} \quad (1.2)$$

n étant l'indice de réfraction et ϵ_r la constante diélectrique relative

L'absorption d'un photon dans un solide présentant un gap direct (figure 1.5.a) est très probable du fait que cette transition électronique est seulement associée à deux particules : électron photon. Le photon assure la conservation de l'énergie lors de la transition entre la bande de valence et la bande de conduction. Cette structure de bande directe correspond à des matériaux tels que de GaAs, CdTe, etc...

Dans le cas d'un diagramme à gap indirect (figure 1.5.b), une troisième particule entre en jeu. Elle est associée aux vibrations du réseau cristallin et est désignée sous le terme de « phonon » d'énergie . Son intervention dans le processus d'absorption conduit à une probabilité d'absorption réduite près du seuil, et donc à un « front d'absorption » qui est moins rapide que celui qui caractérise les transitions directes. Cette

structure de bande indirecte s'applique à des matériaux comme le silicium, le germanium, le GaP, etc...

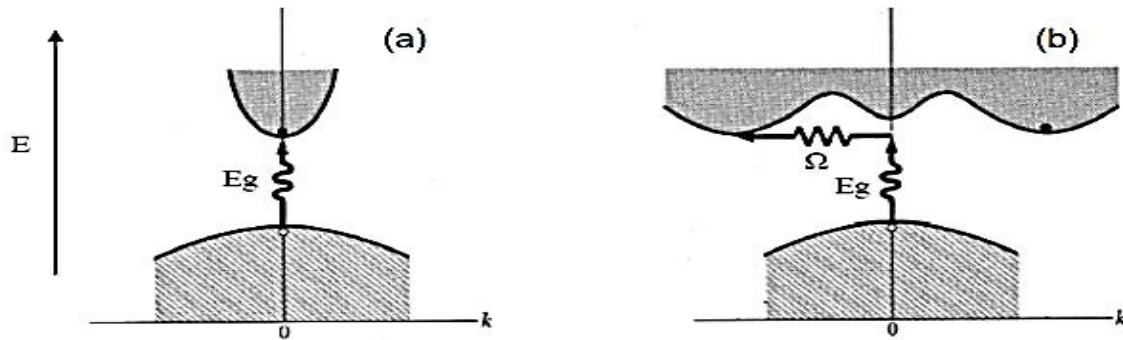


Figure 1.5. Diagramme de bandes d'énergie dans l'espace des k d'un semi-conducteur à gap direct (a) et à gap indirect (b).

Le passage d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction nécessite l'énergie E_g dans le premier cas et l'énergie E_g^+ pour les transitions indirectes [3].

On définit le taux de génération de paires électrons-trous G créées dans un cristal à une distance x de la surface par la relation:

$$G(X) = \alpha(\lambda)N_0 \exp - (\alpha(\lambda))X \quad (1.3)$$

Ou

α est le coefficient d'absorption, λ est la longueur d'onde (en μm) et N_0 est le nombre de photons incidents.

Ce modèle de génération considère une décroissance exponentielle de l'absorption avec l'épaisseur du film.

1.4.1.2. Créations des charges. Les excitons

Lorsqu'un photon d'énergie supérieure à E_g (pour les semi-conducteurs ayant un gap direct) ou à E_g^+ (pour les semi-conducteurs ayant un gap indirect), est absorbé par le semi-conducteur, une paire électron-trou est créée. Les charges (a) (b) (Figure 1.5) : Diagramme de bandes d'énergie dans l'espace des k d'un semi-conducteur à gap direct (a) et à gap indirect (b). Le passage d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction nécessite l'énergie E_g dans le premier cas et l'énergie E_g^+ pour les transitions indirectes. Électriques (électron et trou) restent liées par une force coulombienne et forment un ensemble appelé « exciton ». Pour générer un courant électrique les excitons doivent se dissocier en électrons et trous libres avant que ces deux éléments ne se recombinent. Il existe

principalement deux types de recombinaison. Le premier est dû à un processus physique d'émission spontanée (recombinaison radiative).

Le deuxième mécanisme est celui qui résulte de la recombinaison par pièges qui peuvent être des impuretés et des défauts présents dans le matériau. Ces impuretés introduisent des niveaux d'énergie dans la bande interdite et créent ainsi des centres de recombinaison [6].

1.4.1.3. Mobilité et collecte des porteurs de charges

Lorsque les paires électrons-trous se sont dissociées, les charges libres doivent diffuser jusqu'aux électrodes. La mobilité des porteurs de charges définit l'aptitude de ces électrons ou de ces trous à se déplacer à l'intérieur d'un matériau. Elle s'exprime en $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$. Son expression générale est donnée par la relation :

$$\mu = \left| \frac{qt_c}{2m} \right| \quad (1.4)$$

Où

t_c est Le temps entre deux collisions du porteur avec les atomes du cristal ou des impuretés et m est la masse effective du porteur de charge (électron ou trou).

Le dispositif de collecte nécessite un champ électrique important pour séparer les paires électron-trou. Il peut être créé en juxtaposant le semi-conducteur en contact intime avec un métal (barrière Schottky) ou avec un autre semi-conducteur. Dans ce dernier cas, les semi-conducteurs peuvent être de même matériau mais dopés différemment (homojonction) ou de matériaux différents (hétérojonction).

- **Barrière Schottky**

Le contact Schottky est typiquement réalisé entre un semi-conducteur de type P et un métal ayant un faible travail de sortie (aluminium, magnésium...) ou un semi-conducteur de type N et un métal ayant au contraire un grand travail de sortie. Ce dernier cas est représenté par le diagramme énergétique suivant:

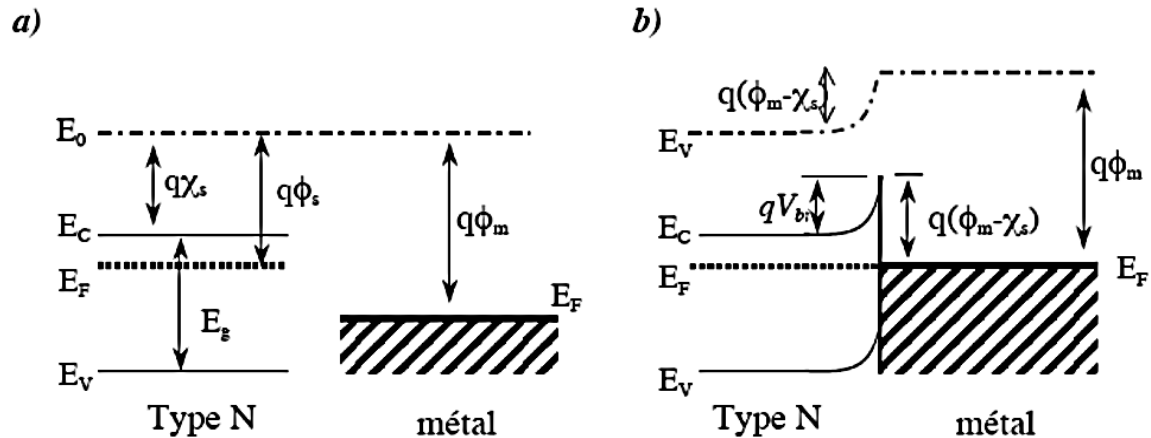


Figure 1.6. Diagramme énergétique de: a) semi-conducteur et métal isolés b) semi-conducteur et métal en contact et à l'équilibre.

Lors de la mise en contact des deux matériaux, en raison de la différence des travaux de sortie, les électrons se diffusent du semi-conducteur vers le métal. Ce phénomène entraîne l'apparition d'une zone de charge d'espace. La tension de diffusion augmente progressivement pour atteindre la valeur d'équilibre V_{bi} (Figure 1.6.b) qui arrête la diffusion et définit l'état d'équilibre (V_{bi} est donnée par la différence des travaux de sortie des deux matériaux)[3].

• Homojonction

Elle résulte de la juxtaposition dans un même matériau semi-conducteur de deux zones: une de type P et l'autre de type N. La figure 1.7 montre la formation de la jonction.

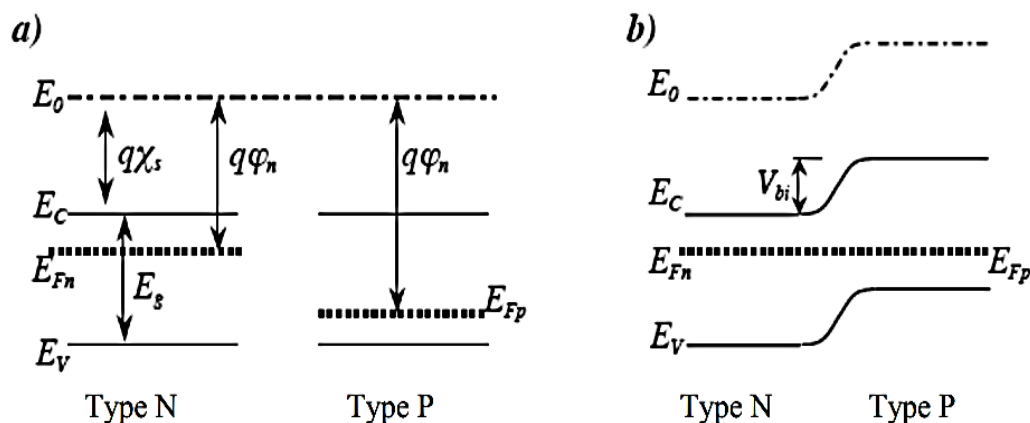


Figure 1.7. Diagramme énergétique montrant la formation de l'homojonction

a) régions p et n isolées. b) régions p et n en contact à l'équilibre

Cette juxtaposition entraîne des courants de diffusion d'électrons et de trous au voisinage de la jonction. Une barrière de potentiel est alors créée. Elle s'oppose aux courants de diffusion des porteurs majoritaires de chaque zone. Cette barrière ne dépend que des travaux de sortie des deux régions (V_{bi} est déterminée par la différence entre les niveaux de Fermi).

• Heterojonction

Elle se forme au contact de deux matériaux semi-conducteurs ayant des valeurs de gaps différentes. On remarque sur la (figure 1.8.b), contrairement à l'homojonction, l'apparition d'un pic qui peut également apparaître dans la bande de valence selon la nature et le dopage des deux semi-conducteurs.

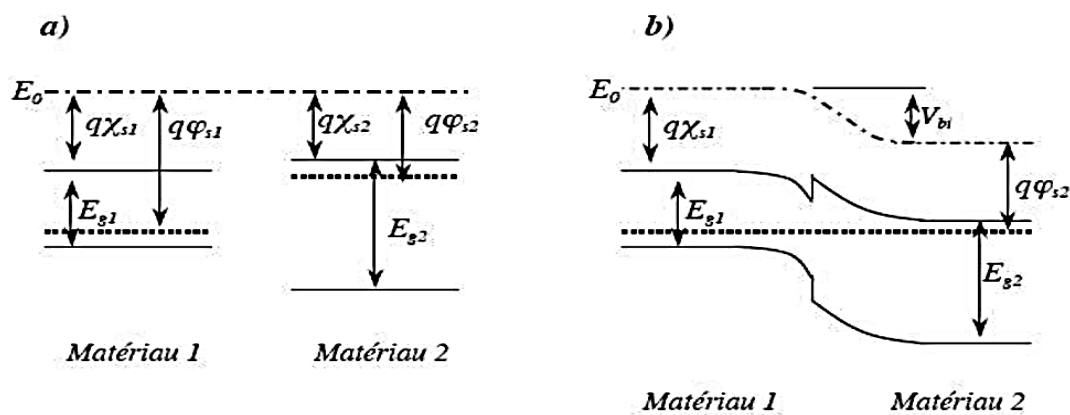


Figure 1.8. Diagramme énergétique montrant la formation de l'hétérojonction) régions P et N isolées, b) régions P et N en contact à l'équilibre

Dans ce cas la barrière d'énergie dépend du gap, de l'affinité électronique et de la concentration des dopants des deux semi-conducteurs.

1.4.2. Les cellules Photovoltaïques

La cellule solaire est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque.

Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie Lumineuse en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques sont constituées :

- d'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le Silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.
- d'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires,

- d'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode,
- les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule.

1.4.3. Les différentes technologies

Il existe un grand nombre de technologies mettant en œuvre l'effet photovoltaïque. Beaucoup sont encore en phase de recherche et développement. Les principales technologies industrialisées en quantité à ce jour sont : le silicium mono ou poly-cristallin (plus de 80% de la production mondiale) et le silicium en couche mince à base de silicium amorphe ou CIS (Cuivre Indium Sélénium).

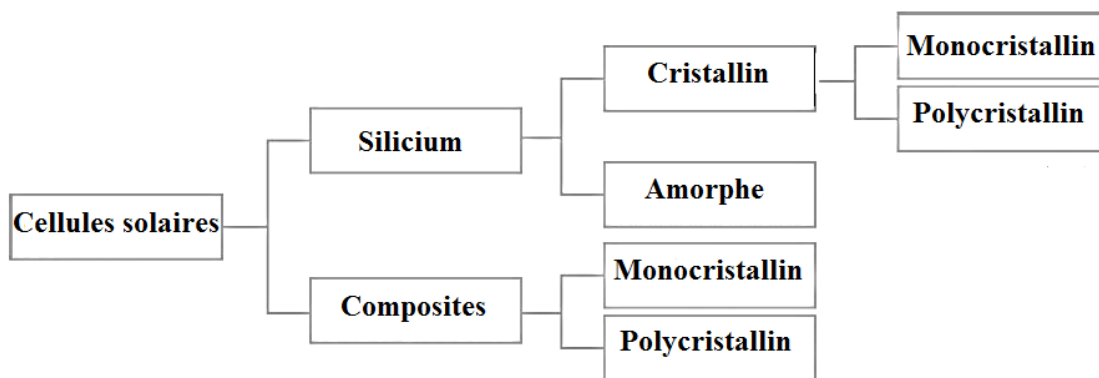


Figure 1.9. Les différentes technologies de cellule PV

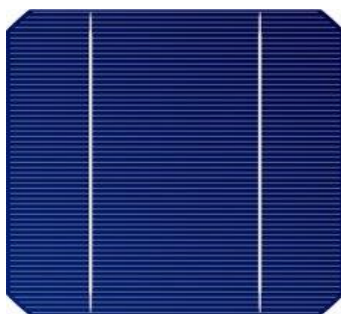
1.4.3.1. Les cellules photovoltaïques au silicium

Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques disponibles à un niveau industriel. Le silicium est fabriqué à partir de sable quartzueux (dioxyde de silicium). Celui-ci est chauffé dans un four électrique à une température de 1700 °C. Divers traitements du sable permettent de purifier le silicium. Le produit obtenu est un silicium dit métallurgique, pur à 98% seulement. Ce silicium est ensuite purifié chimiquement et aboutit au silicium de qualité électronique qui se présente sous forme liquide, puis coulé sous forme de lingot suivant le processus pour la cristallisation du silicium,

et découpé sous forme de fines plaquettes (wafers). Par la suite, ce silicium pur va être enrichi en éléments dopants (P, As, Sb ou B) lors de l'étape de dopage, afin de pouvoir le transformer en semi-conducteur de type P ou N. La diffusion d'éléments dopants (bore, phosphore) modifie l'équilibre électronique de ces plaquettes (wafers), ce qui les transforme en cellules sensibles à la lumière. La production des cellules photovoltaïques nécessite de l'énergie, et on estime qu'une cellule photovoltaïque doit fonctionner pendant plus de deux ans pour produire l'énergie qui a été nécessaire à sa fabrication.

1.4.3.2. Le silicium monocristallin

Sont les cellules solaires de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal. Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie; plus onéreux, il est cependant plus efficace que le silicium poly cristallin. Du silicium à l'état brut est fondu pour créer un barreau. Lorsque le refroidissement du silicium est lent et maîtrisé, on obtient un monocristal. Un Wafer (tranche de silicium) est alors découpé dans le barreau de silicium. Après divers traitements (traitement de surface à l'acide, dopage et création de la jonction P-N, dépôt de couche antireflet, pose des collecteurs), le wafer devient cellule. Les cellules sont rondes ou presque carrées et, vues de près, elles ont une couleur uniforme. Elles ont un rendement de 12 à 18%, mais la méthode de production est laborieuse.



Si-Monocristallin



si-polycristallin



si-amorphe

Figure 1.10. Cellules au silicium

1.4.3.3. Silicium multi-cristallin (poly-cristallin)

Sont des cellules élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vues de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux (tonalités différentes). Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines. Ces cellules, grâce à leur potentiel de gain de productivité, se sont aujourd'hui imposées. L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 à 3 fois

moins d'énergie pour leur fabrication. Le wafer est scié dans un barreau de silicium dont le refroidissement forcé a créé une structure poly-cristalline. Durée de vie estimée: 30 ans. Un cristal est un solide avec des façades polygonales, plus ou moins brillant, à structure régulière et périodique, formée d'un empilement ordonné d'un grand nombre d'atomes, de molécules ou d'ions.

1.4.3.4. Les cellules photovoltaïques amorphes

Elles ont un coût de production bien plus bas, mais malheureusement leur rendement n'est que 6 à 8% actuellement. Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide. Le rendement de ces panneaux est moins bon que celui des technologies poly cristallines ou monocristallines. Cependant, le silicium amorphe permet de produire des panneaux de grandes surfaces à bas coût en utilisant peu de matière première.

1.4.3.5. Récapitulatif des différentes technologies

Le tableau 1.1 regroupe les différentes technologies des cellules solaires au silicium avec leurs caractéristiques.

Matériau	Rendement	Longévité	Caractéristiques	Principale utilisations
Silicium mono-cristallin	12 à 18%	20 à 30 ans	*très performant *stabilité de production d'W *méthode de production couteuse et laborieuse.	*Aérospatiale. *modules pour toits, façades
Silicium poly-cristallin	11 à 15 %	20 à 30 ans	*adapté à la production à grande échelle. *stabilité de production d'W. Plus de 50% du marché mondial.	*modules pour toits, façades, Générateurs...

Amorphe	5 à 8 %		*peut fonctionner sous la lumière fluorescente. *fonctionnement si faible luminosité. *fonctionnement par temps couvert. *fonctionnement si ombrage partiel *la puissance de sortie varie dans le temps. En début de vie, la puissance est de 15 à 20% supérieure à la valeur nominale et se stabilise après quelques mois	*Appareils électrique (montres, calculatrices) Intégration dans le bâtiment
Composite mono-cristallin (GaAs)	18 à 20 %		*lourd, fissure facilement	*systèmes de concentrateurs Aérospatiale (satellites)
Composite poly-cristallin (CdS, CdTe, CuIn, GaSe ₂)	8%		*nécessite peu de matériaux mais certains contiennent des substances polluantes	Appareil électriques (montres, calculatrices...), Intégration dans le bâtiment

Tableau 1.1.Caractéristiques des différentes technologies des cellules solaires au silicium

1.4.4. Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse (photons) des rayons solaires en électricité, par le biais du déplacement de charges électriques dans un matériau semi-conducteur (le silicium).

Lorsque les photons heurtent une surface mince de ce matériau, ils transfèrent leur énergie aux électrons de la matière. Ceux-ci se mettent alors en mouvement dans une direction particulière, créant ainsi un courant électrique.

Le matériau semi-conducteur comporte deux parties, l'une présente un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type N et dopée de type P [7].

Les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement, et la zone initialement dopée P chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique.

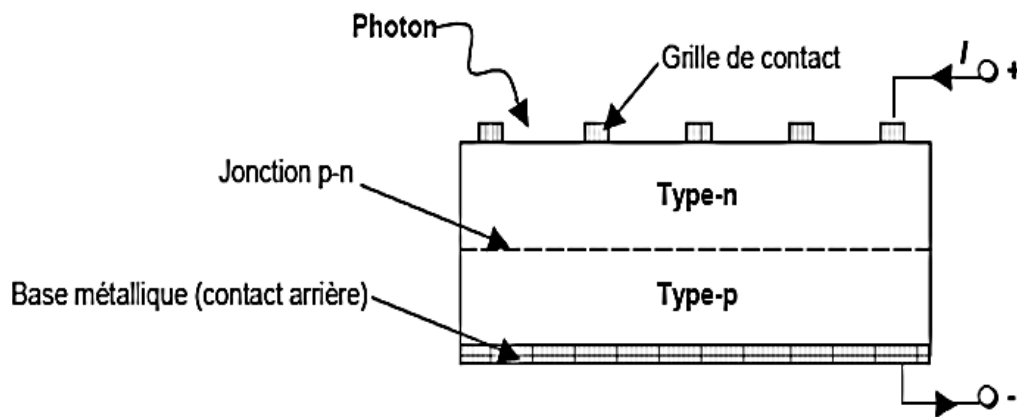


Figure 1.11.fonctionnement d'une cellule solaire

1.5. Conditions standards d'illumination des cellules solaires

L'industrie photovoltaïque a développé deux, et seulement deux, distributions spectrales solaires standards avec l'organisation Américaine (American Society for Testing and Matériels: ASTM), la recherche gouvernementale et différents laboratoires.

Ces deux distributions définissent un spectre du rayonnement incident de façon normale au capteur et un spectre du rayonnement provenant de l'hémisphère situé devant le capteur.

Ces deux définitions sont référencées dans le document ASTM G-173-03. Les mesures qui ont permis d'établir ces normes ont été réalisées aux Etats-Unis, l'angle entre le rayonnement et la normale à la terre était de 48,19°.

Le rayonnement incident parcourt une certaine distance dans l'atmosphère conduisant à des pertes plus ou moins importantes suivant l'angle d'incidence. Une appellation a été introduite afin de distinguer les rayonnements selon leur incidence. Cette appellation est notée AM (AM signifie Air Mass) et m vaut 1,5 dans le cas des normes citées ci-dessus. On parle alors de rayonnements AM 1.5 et AM 1.5G (G pour global) quand on veut caractériser les cellules dans les conditions standards de l'industrie. Le rayonnement AM1.5 est le rayonnement incident de façon normale au capteur, il est mesuré en utilisant un cylindre. Le rayonnement AM1.5G est le rayonnement provenant de l'hémisphère situé devant le capteur. De manière générale, est obtenu avec la relation: $m \approx 1/\sin \theta$, θ est l'angle entre le rayonnement et la tangente à la terre. Sur la (figure 1.3), on peut distinguer trois rayonnements AM_X .

Le rayonnement AM0 est le rayonnement solaire avant la traversée de l'atmosphère, le rayonnement AM1 correspond à la lumière ayant traversée l'atmosphère en incidence normale et le rayonnement AM 1.5 est le rayonnement possédant l'incidence de la norme industrielle.

1.5.1. Le watt crête (w_c)

C'est l'unité de référence qui permet de comparer les performances des cellules ou des modules C'est la puissance maximale délivrée dans les conditions suivantes :

- Eclairement = 1000 W/m^2
- Température cellule = 25°C
- Spectre solaire = AM1.5

A titre d'exemple.

Un module de puissance 120 Wc et de surface 1 m^2 pour une puissance de rayonnement solaire incident de 1000 W/m^2 Ce module fournit une puissance de 120 W et son rendement est de 12% .

1.6. Caractéristiques courant-tension

La cellule photovoltaïque possède une caractéristique $I=f(V)$ non linéaire (figure1.12) la caractéristique d'une cellule photovoltaïque balaie 3 quadrants sur les 4 existants.

Une cellule PV est un récepteur dans le quadrant 2 et dans le quadrant 4. Le fonctionnement dans ces deux quadrants est à proscrire car un risque de destruction par phénomène d'échauffement local (hot spot) est possible. Le fonctionnement dans le quadrant 1 est le fonctionnement normal, en effet dans ce cas la cellule est un générateur, elle produit donc de l'énergie. L'objectif est donc de faire travailler la cellule dans ce quadrant.

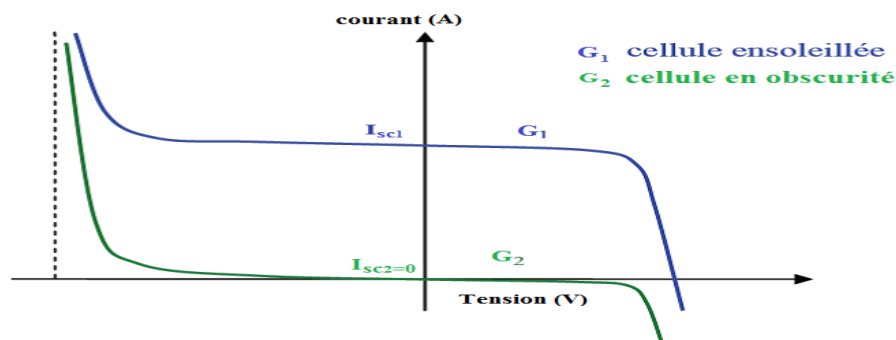


Figure 1.12. Caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque.

La tension en circuit ouvert (V_{oc}) d'une cellule est comprise entre $0,3\text{V}$ et $0,7\text{V}$ selon le matériau utilisé, la température et son état de vieillissement. Son courant de court-circuit (I_{sc})

varie principalement selon le niveau d'éclairement G et selon les technologies et les tailles de cellules (entre 5 et 8A pour le silicium cristallin)[8].

1.6.1. Zones de fonctionnement du module photovoltaïque

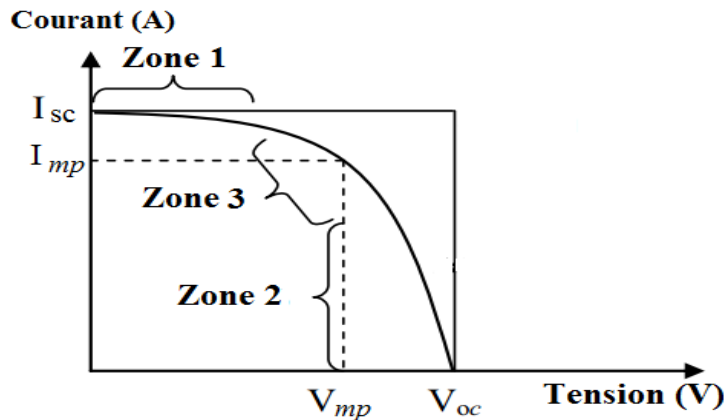


Figure 1.13. Principaux zones de la caractéristique I-V

Les caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque varient en fonction de la température, de l'éclairement et, de façon générale, des conditions de fonctionnement lorsqu'il est connecté à une charge donnée. Nous rappelons brièvement dans ce paragraphe le comportement du générateur soumis à diverses contraintes. Ces notions sont en effet nécessaires pour comprendre le comportement d'un générateur PV et ensuite effectuer des optimisations de fonctionnement.

Nous pouvons décomposer la caractéristique $I(V)$ d'un générateur photovoltaïque en 3 zones :

- Zone 1 : elle est assimilable à un générateur de courant I_{sc} proportionnel à l'irradiation, d'admittance interne pouvant être modélisée par $1/R_{sh}$.
- Zone 2 : elle est assimilable à un générateur de tension V_{oc} d'impédance interne équivalente à la résistance série R_s .
- Zone 3 : l'impédance interne du générateur dans cette zone varie très fortement de R_s à R_{sh} . Elle comporte un point de fonctionnement pour lequel la puissance fournie par le générateur est maximale. Ce point est appelé point de puissance optimale, caractérisé par le couple (I_{mp}, V_{mp}) , et seule une charge dont la caractéristique passe par ce point, permet d'extraire la puissance maximale disponible dans les conditions considérées [9].
- La puissance disponible en sortie du générateur PV est donnée par :

$$P_G = N_S I_C N_P V_C \quad (1.5)$$

Ou

P_G : La puissance disponible en sortie du générateur photovoltaïque,

I_c : Le courant de sortie de la cellule.

V_c : La tension à la sortie de la cellule.

N_s : Nombre de cellules en série.

N_p : Nombre de branche de cellules en parallèle.

1.7.2. Association des cellules en série

Ce système d'association est généralement le plus communément utilisé pour les modules photovoltaïques commerciaux. Comme la surface des cellules devient de plus en plus importante, le courant produit par une seule cellule augmente régulièrement au fur et à mesure de l'évolution technologique alors que sa tension reste toujours très faible.

Une association de plusieurs cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, (figure 1.14). L'équation (1.6) résume les caractéristiques électriques d'une association série de N_s cellules

$$V_{oc} = N_s V_c \quad (1.6)$$

Ou

V_{oc} est La tension du circuit ouvert(en V).

A titre indicatif, les modules commerciaux constitués de cellules de première génération sont habituellement réalisés en associant 36 cellules en série ($V_{cons} = 0.6V * 36 = 21.6$ Volt) afin d'obtenir une tension optimale du module V_{mp} proche de celle d'une tension de batterie de 12V.

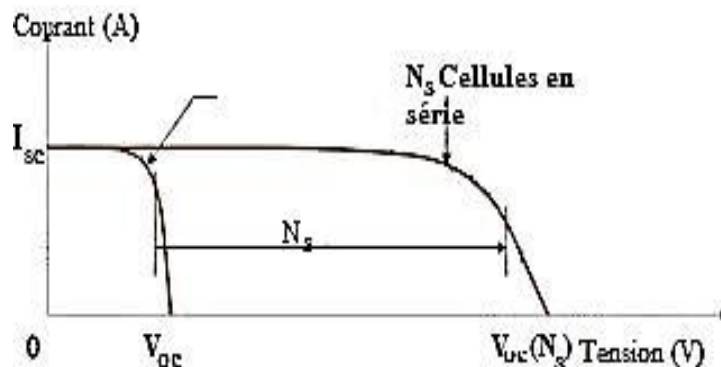


Figure 1.14. Caractéristiques résultantes d'un groupement de N_s cellules en série.

1.6.2. Association des cellules en parallèle

En revanche en cas de déséquilibre, tel n'est plus le cas. Particulièrement, dans un groupement série, la cellule de plus faible courant photovoltaïque impose celui-ci à l'ensemble du groupement, une propriété qui peut pénaliser très fortement la conversion globale si elle n'est pas prise en compte.

D'autre part, une association parallèle de N_p cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants, (figure 1.15) L'équation (1.7) résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de N_p cellules [10].

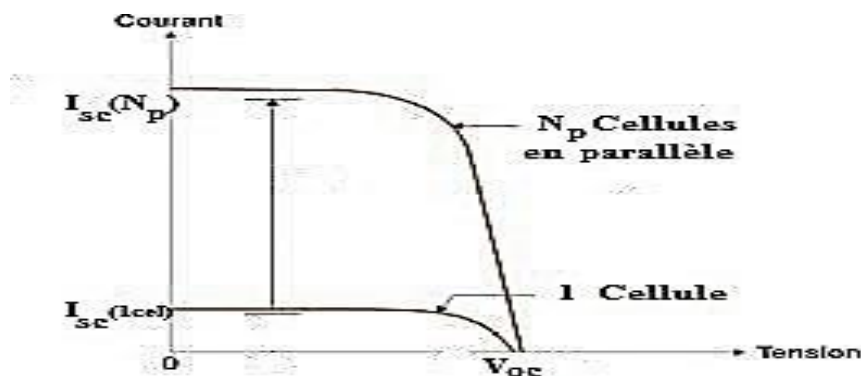


Figure 1.15. Caractéristiques résultant d'un groupement de N_p cellules en parallèle.

$$I_{SC} = N_p \cdot I_{SC} \quad (1.7)$$

Ou

I_{sc} est le courant de court-circuit(en A).

Si l'on désire avoir un générateur PV ayant un courant de sortie plus intense, on peut soit faire appel à des cellules de plus grande surface et de meilleur rendement, soit associé en parallèle plusieurs modules de caractéristiques similaires. Pour qu'un générateur PV ainsi constitué puisse fonctionner de façon optimale, il faut que les (N_s N_p) cellules se comportent toutes de façon identique. Elles doivent pour cela être issues de la même technologie, du même lot de fabrication et qu'elles soient soumises aux mêmes conditions de fonctionnement (éclairage, température, vieillissement et inclinaison) [9].

La puissance du générateur PV sera optimale si chaque cellule fonctionne à sa puissance maximale (P_{\max}). Cette puissance est le maximum d'une caractéristique $P(V)$ du générateur, et correspond au produit d'une tension optimale (V_{mp}) et d'un courant optimal noté I_{mp} .

Pour réduire les dysfonctionnements, les fabricants ont choisi de ne pas commercialiser des cellules PV seules. Ainsi, les générateurs PV se trouvent souvent sous forme de modules pré câblés, constitués de plusieurs cellules.

Chaque référence de module a ses propres caractéristiques électriques garanties à $\pm 10\%$ selon le lot de fabrication.

1.7. Générateur photovoltaïque

1.7.1. Constitution d'un module photovoltaïque

Câblage des cellules photovoltaïques :

les cellules sont connectées entre elles par un fins ruban métallique (cuivre étamé), du contact en face avant (-) au contact en face arrière (+).

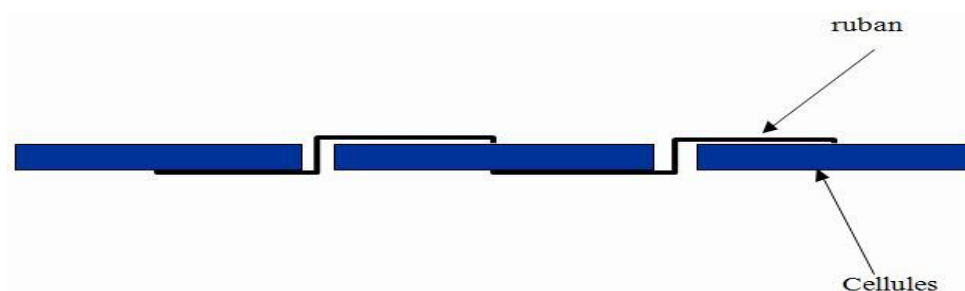


Figure 1.16. Câblage des cellules photovoltaïques

- les cellules sont encapsulées sous vide entre 2 films thermoplastiques transparents (EVA : Ethylène Acétate de Vinyle).
- le plus souvent présence d'un cadre en aluminium avec joint périphérique pour permettre la dilatation.
- un verre trempé en face avant protège les cellules sur le plan mécanique tout en laissant passer la lumière.
- la face arrière est constituée d'un verre ou d'une feuille TEDLAR
- la boîte de connexion étanche regroupe les bornes de raccordement, les diodes by-pass
- les 2 câbles unipolaires sont raccordés

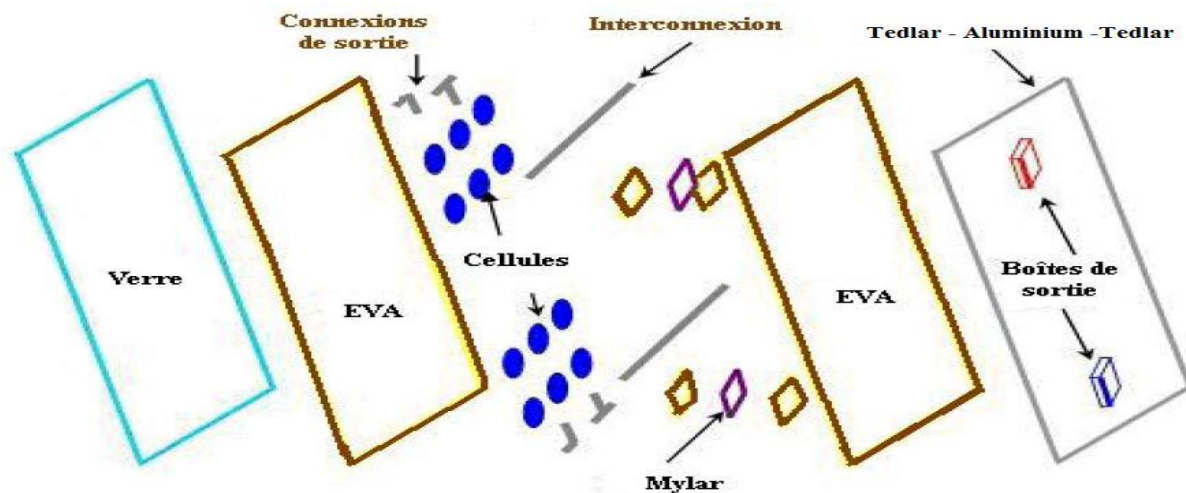


Figure 1.17. Encapsulation d'un module photovoltaïque

En associant les cellules PV en série (somme des tensions de chaque cellule) ou en parallèle (somme des intensités de chaque cellule), on peut constituer un générateur PV selon les besoins des applications visées. Les deux types de regroupement sont en effet possibles et souvent utilisés afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité souhaitées. Ainsi, pour N_s cellules en série, constituant des branches elles-mêmes N_p en parallèle, la puissance disponible en sortie du générateur PV est donnée par :

$$PG = (N_s \cdot V_C) \cdot (N_p \cdot I_C) \quad (1.8)$$

1.8. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire

1.8.1. Avantages de l'énergie photovoltaïque

L'énergie solaire offre de multiples avantages :

- la production de cette électricité renouvelable est propre (elle n'est pas toxique).
- les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables.
- l'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains, dus à leur petite taille, et leur opération silencieuse.
- la lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville.
- l'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur.

- les matériaux employés (verre, aluminium) résistent aux pires conditions climatiques (notamment à la grêle).
- la durée de vie des panneaux photovoltaïques est très longue. Certains producteurs garantissent les panneaux solaires pour une durée de 25 ans.

1.8.2. Inconvénients de l'énergie photovoltaïque

- production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable.
- le coût très élevé,
- faible rendement de conversion,
- s'il faut stocker l'énergie avec des batteries, le coût de l'installation augmente.
- pollution à la fabrication.

Malgré ces inconvénients, le marché photovoltaïque ne cesse pas de trouver des applications et de s'agrandir. En plus, la technologie photovoltaïque est dans un processus de maturation dans laquelle les inconvénients pourraient s'attendrir, surtout en ce qui concerne les coûts de fabrication [11].

1.9. Conclusion

En résumé, technologiquement, un capteur PV est proche d'une diode PN de par sa constitution, les matériaux utilisés, et les phénomènes physiques identiques mis en œuvre. Le comportement d'une cellule PV peut donc se modéliser comme celui d'une mauvaise jonction PN autant en statique qu'en dynamique lorsque cette dernière n'est pas éclairée.

Dans ce chapitre, nous avons présenté la situation actuelles du photovoltaïque. Nous avons ensuite présenté le fonctionnement d'une cellule en expliquant brièvement le phénomène photovoltaïque (l'effet photovoltaïque). Nous avons vu que la cellule PV présente une caractéristique $I(V)$ non linéaire, présente un point de puissance maximal (MPP) caractérisé par un courant (I_{mp}) et une tension (V_{mp}) et qu'elle peut être modélisée par un circuit électrique simple.

L'interconnexion de cellules PV en série ou en parallèle pose plusieurs problèmes de déséquilibre qui sont très pénalisants si les cellules n'ont pas le même point de fonctionnements. Nous avons présenté les différentes technologies de cellules actuellement sur le marché, et malgré la fin du silicium annoncée depuis de nombreuses années, ce dernier garde une grande longueur d'avance sur les autres technologies.

Le monde de la conversion photovoltaïque, aussi bien au niveau de la recherche qu'au niveau de l'industrie connaît depuis quelques années une mutation profonde associée à l'intérêt

croissant pour l'énergie photovoltaïque. Une industrie majeure est en cours de constitution comme le montre l'analyse de la situation et des évolutions. De façon intéressante et exemplaire, les possibilités d'innovation sont très grandes, portées par le bouillonnement des recherches en vue d'améliorer les filières existantes, d'en consolider de nouvelles et de préparer les prochaines ruptures, notamment en matière de matériaux et de rendements. Celles-ci associent des chercheurs de tous horizons sur des bases pluridisciplinaires, contrairement à la situation précédente, dans un contexte de dynamisme industriel, ce qui constitue un creuset pour de nouvelles avancées. Un élément clé est la capacité de la conversion photovoltaïque de contribuer de façon importante à l'approvisionnement énergétique dans le futur, et le plus tôt sera le mieux.