

## 1. Introduction

Les semi-conducteurs sont des matériaux utilisés pour la fabrication des dispositifs électroniques et optoélectroniques.

Nous aborderons ainsi en premier lieu quelques notions sur la source d'énergie que représentent le soleil, et son application dans le domaine photovoltaïque. Nous décrirons ensuite le fonctionnement des cellules photovoltaïques, leurs caractéristiques principales, les pertes physiques et technologiques limitant le rendement des cellules photovoltaïques. On se base sur les pertes optiques. [1]

## 2. Notions préliminaires sur le rayonnement solaire

Le développement, l'optimisation et la caractérisation des cellules photovoltaïques impliquent une certaine connaissance de la source d'énergie utilisée (le soleil). La surface de celui-ci se comporte comme un corps noir à la température d'environ 5800K. Ceci conduit à un pic d'émission situé à une longueur d'onde de 0,5  $\mu\text{m}$  pour une puissance d'environ 60  $\text{MW}/\text{m}^2$ , soit un total de  $9,5 \cdot 10^{25}$  W [3]. En tenant compte de la surface apparente du soleil et de la distance entre celui-ci et la terre, cela conduit à un éclairage moyen dans l'année de 1,36  $\text{kW}/\text{m}^2$  hors atmosphère.

Afin de comparer et d'unifier les performances des cellules photovoltaïques élaborées dans les différents laboratoires du monde, il a été institué la notion d'Air Mass (AM), elle quantifie la quantité de puissance absorbée par l'atmosphère en fonction de l'angle  $\theta$  du soleil par rapport au zénith :

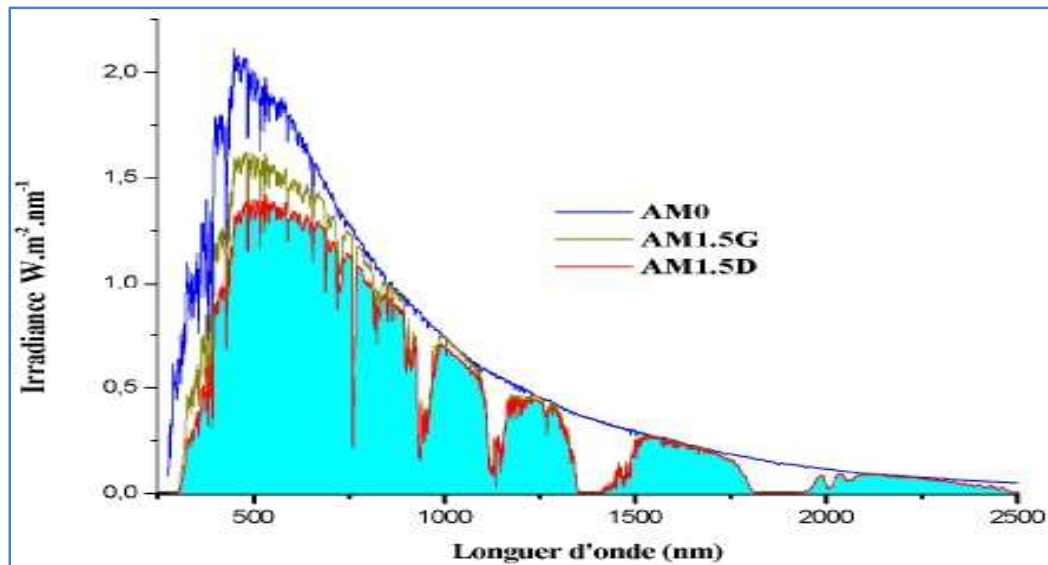
$$AM = \frac{1}{\cos(\theta)} \quad (\text{I.1})$$

Si le soleil est au zénith du lieu d'observation,  $\theta = 0^\circ$ ,  $AM=1$  : la notation utilisée est AM1. AM0 correspond à l'irradiante hors atmosphère, et est surtout utilisée pour prédire le comportement des cellules pour applications spatiales. Le spectre standard le plus étudié est AM1.5G, G signifiant global car il tient compte à la fois des radiations directes et diffuses, par opposition à AM1.5D qui ne tient compte que des directes. AM1.5G donne une irradiante de 970  $\text{W}/\text{m}^2$ , mais a été arrondi à 1  $\text{kW}/\text{m}^2$ .

L'intensité  $I_d$  reçue à la surface de la terre peut être calculée grâce à la formule empirique suivante [3] :

$$I_d = 1,353 \cdot (0.7^{AM})^{0.678}$$

Avec  $I_d$  en  $\text{kW}/\text{m}^2$ , pour une surface perpendiculaire aux rayons incidents. Les spectres AM0 et AM1.5 sont représentés sur la figure I.1.



**Figure I.1** : Représentation graphique des spectres AM0 et AM1.5 [3]. Le domaine spectral utile aux cellules en silicium est mis en évidence.

Il apparaît que la partie la plus importante du spectre solaire à la surface de la terre concerne le domaine du visible et du proche infrarouge.

Les irradiances définies par le nombre AM ne tiennent toutefois pas compte de la variété des conditions climatiques, et de l'altitude du lieu. La terre présente ainsi de grandes disparités dans la répartition de la puissance solaire :

Les pays du Maghreb ont un potentiel solaire élevé. Les taux d'irradiation solaire effectués par satellites par l'Agence Spatiale Allemande (DLR), montrent des niveaux d'ensoleillement exceptionnels de l'ordre de  $1200 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$  dans le Nord du Grand Sahara. Par contre, les meilleurs taux d'irradiation solaire en Europe sont de l'ordre de  $800 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$  limités à la partie sud de l'Europe [4].

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit:  $169.000 \text{ TWh/an}$  pour le solaire thermique,  $13,9 \text{ TWh/an}$  pour le solaire photovoltaïque et  $35 \text{ TWh/an}$  pour l'éolien [5]. La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est présentée dans le Tableau I.1, selon l'ensoleillement reçu annuellement [6].

Tableau I.1 : Ensoleillement reçu annuellement en Algérie par région climatique :

Régions	Littoral	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue ( $\text{kWh/m}^2/\text{an}$ )	1700	1900	2650

### 3. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

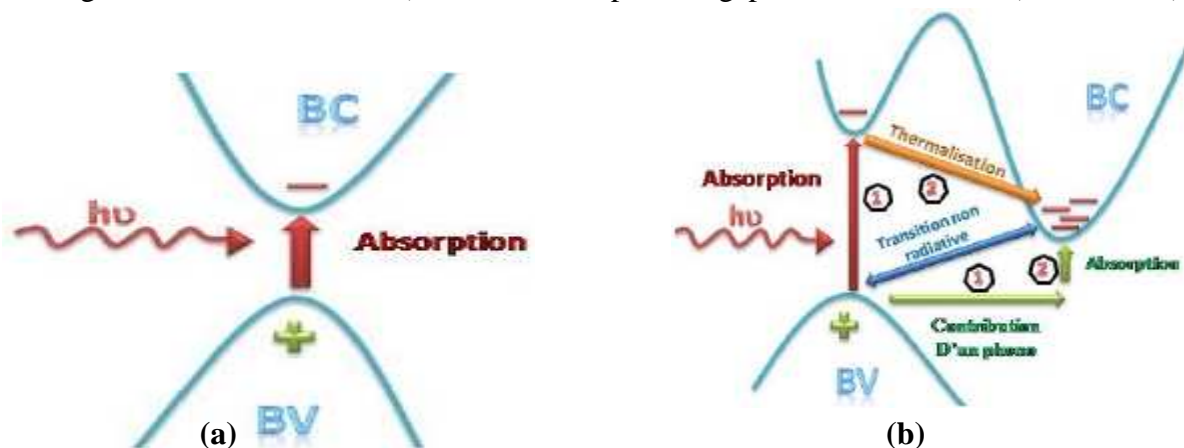
L'effet photovoltaïque a été mis en évidence pour la première fois par E. Becquerel en 1839, il découvrit que certains matériaux délivraient une petite quantité d'électricité quand ils étaient exposés à la lumière. Albert Einstein expliqua le phénomène photoélectrique en 1912, mais il fallut attendre le début des années 50 pour sa mise en application pratique dans la réalisation d'une cellule photovoltaïque en silicium d'un rendement de 4,5% [7]. Nous présentons ici les mécanismes de la génération de porteurs électroniques au sein d'un semi-conducteur sous l'impact de photons.

#### 3.1 L'interaction photon/semi-conducteur

L'écart entre la bande de valence et de conduction, ou *gap*, représente une caractéristique fondamentale des semi-conducteurs. La figure I.2 présente les différentes transitions possibles selon la nature du gap. Quand le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence coïncident dans l'espace des  $k$ , il s'agit d'un gap direct. Les transitions inter bandes s'effectuent verticalement, et sont donc radiatives (cf. figure I.2. (a)). Ceci illustre le fonctionnement des semi-conducteurs binaires, tels que le GaAs, beaucoup utilisés en optoélectronique.

Dans le cas du silicium, le gap est indirect : les transitions électroniques entre les extrema des bandes sont obliques, donc non radiatives puisqu'elles impliquent un changement du vecteur d'onde de l'électron. Les électrons du sommet de la bande de valence peuvent toutefois être directement excités vers le minimum relatif central de la bande de conduction grâce à un photon de plus grande énergie. Pour que la transition s'effectue dans le gap indirect, il faut qu'un phonon soit au préalable absorbé (ou émis) par l'électron, afin que le vecteur d'onde de ce dernier corresponde au maximum de la bande de valence, pour absorber un photon (cf. figure I.2. (b)).

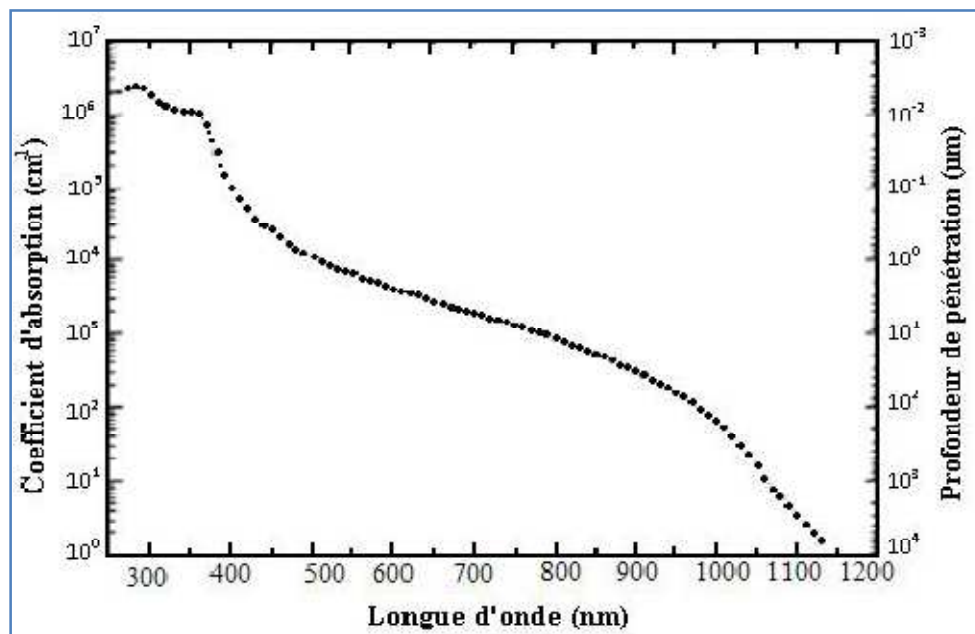
Notons que la valeur du gap indirect du silicium est de 1,12 eV à 300 K (ce qui correspond à une longueur d'onde de 1107 nm), mais celle du premier gap direct vaut 3,4 eV (soit 365 nm).



**Figure I.2** : Transitions inter-bandes d'électrons dans un semi-conducteur. Le cas a) correspond à un semi-conducteur à gap direct, le cas b) à un gap indirect [3].

L'interaction entre les photons et un semi-conducteur se traduit par une caractéristique essentielle du matériau dans le domaine photovoltaïque : le coefficient d'absorption. Il traduit le nombre de photons absorbés par unité d'épaisseur du matériau en fonction de leur longueur d'onde. La figure I.3 nous donne celui du silicium. Nous constatons que pour des longueurs d'ondes inférieures à 365 nm, la majorité des photons incidents est absorbée dans les 100 premiers Å du matériau.

Comme nous l'avons vu précédemment, ces transitions directes ne sont plus possibles pour des longueurs d'ondes plus grandes. Il faut alors qu'un phonon au moins vienne assister l'électron pour que ce dernier passe dans la bande de conduction. Ceci réduit la probabilité de transition. L'augmentation de la longueur d'onde des photons entraîne donc une diminution du coefficient d'absorption. Lorsque l'énergie du photon devient inférieure à celle du gap du matériau (à l'énergie d'un phonon près), la transition n'est plus possible et le photon n'est pas absorbé.



**Figure I.3 :** Coefficient d'absorption du silicium et profondeur de pénétration des photons en fonction de la longueur d'onde [8].

L'interaction photon/électron au sein du semi-conducteur se traduit finalement par la génération d'une paire électron-trou, qui modifie localement la conductivité du matériau. Notons que nous nous situons dans un régime de faible injection, c'est à dire que la densité de porteurs photogénérés est faible devant celle des porteurs majoritaires au sein du matériau. Ainsi cet excès de porteurs est plus sensible dans le cas des porteurs minoritaires (trous dans la région dopée n et électrons dans celle dopée p). La cellule photovoltaïque se comportant comme un générateur, il s'agit à présent de séparer ces deux types de porteurs pour éviter qu'ils ne se recombinent entre eux, et de les collecter dans un circuit électrique extérieur.

L'absorption est caractérisée par le taux de génération optique, noté  $G$  : il s'agit taux de création de paires électron-trou (en  $cm^{-3}.s^{-1}$ ). Les porteurs minoritaires (électrons dans un matériau de type p et trous dans un matériau de type n) sont métastables et n'existeront, en

moyenne, que pour un temps égal à la durée de vie  $\tau$  des porteurs minoritaires. Cette grandeur définit la durée de vie moyenne avant que les porteurs ne se recombinent et est liée à la longueur de diffusion  $L_D$  et au coefficient de diffusion  $D$  du matériau par la relation :

$$L_D = \sqrt{D\tau}$$

### 3.2 Fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Une cellule PV est formée d'une jonction p-n qui permet de séparer spatialement l'électron et le trou photo générés grâce à la variation du potentiel électrochimique au sein de la structure. Une paire électron-trou photogénérée dans la zone de charge d'espace (ZCE) est immédiatement dissociée par le champ électrique : les trous sont accélérés vers la zone p et les électrons vers la zone N, (voir Figure I.4). On a un photocourant de génération.

Dans les zones n ou p, les porteurs minoritaires photogénérés diffusent et ceux qui atteignent la ZCE (dépendant de la longueur de diffusion  $L_D$  de ces porteurs) sont propulsés vers la région dans laquelle ils deviennent majoritaires, où ils peuvent être collectés par les contacts ohmiques. On a un photocourant de diffusion. Ces deux contributions s'ajoutent pour donner le photocourant résultant  $I_{ph}$ . C'est un courant de porteurs minoritaires proportionnel à l'intensité lumineuse. Ce courant s'oppose au courant de diode, appelé courant d'obscurité  $I_{obs}$ , qui résulte de la polarisation du composant. Le courant résultant  $I$  est :

$$I = I_{obs} - I_{ph} \quad (I.2)$$

Avec :

$$I_{obs} = I_0 \left( e^{\left(\frac{qV}{nkT}\right)} - 1 \right) \quad (I.3)$$

Où :  
 $q$  : charge élémentaire ( $q = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ )  
 $K$  : constante de Boltzmann ( $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$ )  
 $T$  : température ( $K^\circ$ )  
 $V$  : tension aux bornes de la jonction (Volt)

$I_0$  est le courant de saturation en inverse de la diode. Le coefficient  $n$  est le facteur d'idéalité de la diode, fonction de la qualité de la jonction (égal à 1 si la diode est idéale et égal à 2 si la diode est entièrement gouvernée par la génération / recombinaison).

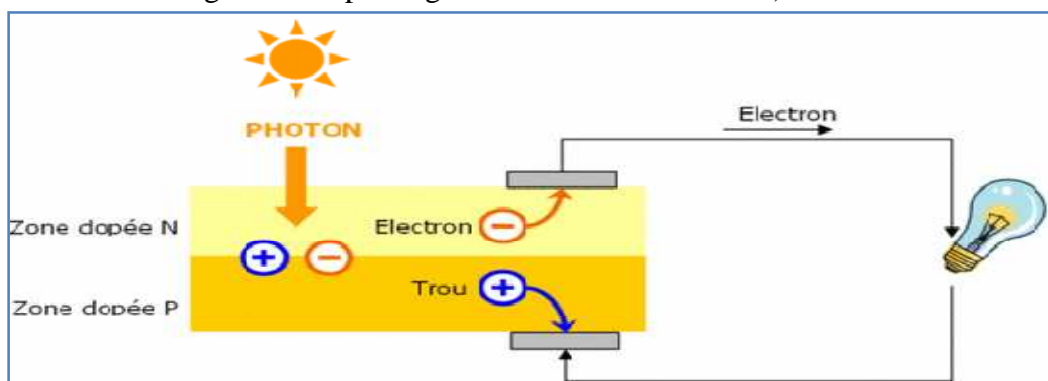
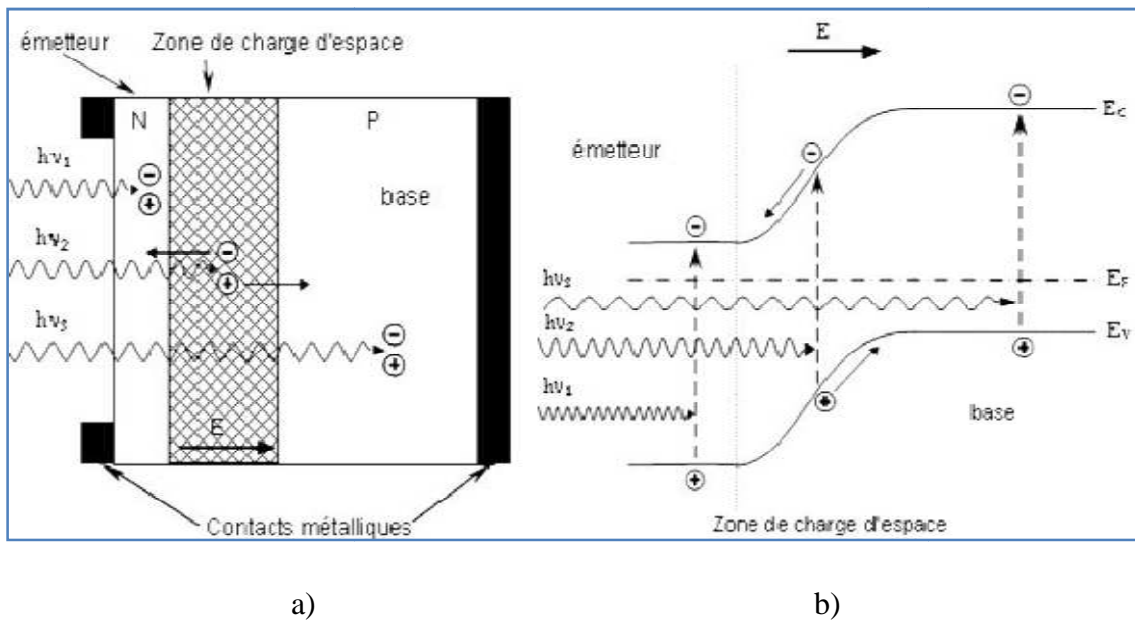


Figure I.4 : L'effet photovoltaïque



**Figure I.5 :** Structure (a) et diagramme de bande (b) d'une cellule photovoltaïque. Les dimensions respectives des différentes zones ne sont pas respectées.

La longueur de diffusion des électrons photo générés est plus grande que celle des trous.

La base présente une épaisseur relativement grande ( $\approx 250-300 \mu m$ ) et elle est donc le plus souvent de type p : elle va fournir le plus de porteurs. Afin de limiter les recombinaisons avec les porteurs majoritaires, elle est faiblement dopée (environ  $10^{16} cm^{-3}$ ). L'émetteur, de type n, est de faible épaisseur ( $\approx 0.2 \mu m$ ) et fortement dopé (environ  $10^{20} cm^{-3}$ ) afin d'obtenir un champ électrique suffisant dans la ZCE ( $\approx 0.3 \mu m$ ). L'épaisseur de la cellule doit être choisie de manière à ce qu'un maximum des photons soit absorbé par le silicium, tout en tenant compte des contraintes de découpe du matériau.

Même si nous ne l'aborderons pas dans ce travail, il est intéressant de noter que les cellules photovoltaïques en silicium de type n suscitent actuellement un intérêt important et que de nombreuses recherches sont menées sur ce matériau jusqu'ici sous-estimé [9].

#### 4. Pertes physiques et technologiques

Le rendement de conversion photovoltaïque peut être exprimé en prenant en compte les facteurs de pertes [9]:

$$\eta = \frac{\int_0^{\lambda_g} P(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} P(\lambda) d\lambda} \times \frac{E_g \int_0^{\lambda_g} N(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} P(\lambda) d\lambda} \times \frac{qV_{oc}}{E_g} \times FF \times (1 - R) \times \frac{S - S_{m\acute{e}tal}}{S} \times \eta_a \times \eta_{col} \tag{I.4}$$

Facteur : (1) (2) (3) (4) (5) (6) (7) (8)

Les différents facteurs de pertes (1 à 8) sont dus soit aux restrictions purement physiques liées au matériau, soit aux limitations technologiques induites par le processus de fabrication. Des choix technologiques appropriés peuvent cependant avoir des conséquences sur les limitations intrinsèques du matériau.

#### 4.1. Pertes physiques

##### (1) Pertes par les photons de grande longueur d'onde

Tous les photons possédant une longueur d'onde supérieure à celle associée au gap du semi-conducteur ( $\lambda > \lambda_g$ ) ne peuvent générer de paire électron/trou et sont donc perdus. Les mécanismes d'absorption assistée par phonons permettent néanmoins de repousser la limite inférieure de l'énergie correspondant au gap du matériau (1.052 eV au lieu de 1.124 eV dans le cas d'une absorption assistée par un phonon dans le silicium [11]. Sous un éclairage de AM 1.5, ces pertes sont évaluées à 23.5% dans le cas du silicium [12].

##### (2) Pertes dues à l'énergie excédentaire des photons

Un photon absorbé génère seulement une paire électron/trou. L'excès d'énergie, supérieur à la largeur de la bande interdite, est principalement dissipé sous forme de chaleur (thermalisation Figure I.5). Sous un éclairage de AM 1.5, ces pertes sont évaluées à 33% de la puissance totale dans le cas du silicium [12].

##### (3) Facteur de tension

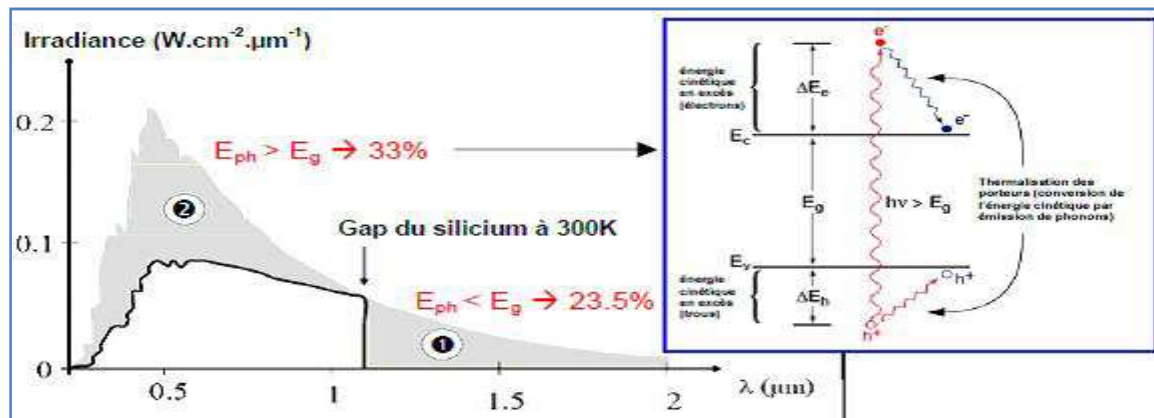
C'est le rapport de la tension maximale développée par la cellule ( $V_{oc}$ ) par la tension de gap  $E_g/q$ . La tension aux bornes d'une cellule n'est qu'une fraction de la tension de gap à cause notamment de la chute de potentiel au niveau des contacts et de la jonction. Les meilleures valeurs obtenues de  $V_{oc}$  sont de l'ordre de 700 mV, pour les cellules à haut rendement.

##### (4) Facteur de forme $FF$

L'équation courant-tension est régie par les équations de Boltzmann sous forme exponentielle ( $e^{\frac{qV}{kT}}$ ). La courbe  $I(V)$  ne peut donc avoir une forme rectangulaire et, même dans le cas d'une cellule idéale, le facteur de forme ne peut dépasser 0.89 [10]. Ce terme dépend également fortement des paramètres technologiques modélisés par les résistances série et parallèle.

Le rendement est donc limité par ces différents facteurs à une valeur théorique maximale. D'après les travaux de Schokley et Quiesser, une limite d'environ 30% peut être démontrée, valeur qui a été affinée depuis à 29%. De nouveaux concepts, dits de 3ème génération, permettraient cependant de contourner cette limite théorique en exploitant notamment les photons de hautes et basses énergies (facteurs (1) et (2)).

Comme illustré par la Figure I.5, ces deux phénomènes entraînent une chute du rendement maximal à 44% et de nombreuses recherches sont menées afin de développer des systèmes offrant une meilleure conversion énergétique. Nous n'aborderons dans ce chapitre que les cellules photovoltaïques de 1ère génération (cellules en silicium massif) [13].



**Figure I.6** : Principales pertes intrinsèques pour une cellule photovoltaïque en silicium. (1) Pertes des photons de grandes longueurs d'onde. (2) Pertes dues à l'énergie excédentaire des photons. L'insert illustre le phénomène de thermalisation [12].

Ces deux facteurs physiques (facteurs (1) et (2)) étant considérés comme invariables, les facteurs technologiques tels que la réflectivité et le rendement de collecte prennent alors une part importante dans l'objectif d'améliorer le rendement de la cellule solaire.

## 4.2 Pertes technologiques

### (5) Réflectivité

Une partie de l'énergie incidente est réfléchiée par la surface (non métallique) de la cellule. Le coefficient de réflexion  $R$  peut être optimisé par la mise en œuvre de traitements de surface adéquats et de couche antireflet.

### (6) Taux d'ombrage

Les contacts métalliques (de surface  $S_{\text{métal}}$ ) présents sur la face avant afin de collecter les porteurs entraînent des pertes de puissance puisqu'ils couvrent une partie de la surface  $S$  de la cellule. Le taux d'ombrage est un compromis entre les pertes dues à la couverture partielle de l'émetteur par les contacts et les pertes de facteur de forme provoquées par la résistance série, liée à la largeur de la métallisation.

### (7) Rendement d'absorption

A cause de l'épaisseur limitée de la cellule, une part non négligeable de photons, ayant néanmoins l'énergie requise, traverse l'épaisseur de la structure sans être absorbés. Des techniques de piégeage par réflexion sur la face arrière peuvent augmenter de manière significative l'absorption, particulièrement dans le cas des cellules très fines.



### (8) Rendement de collecte

C'est le rapport entre le nombre de porteurs effectivement collectés et le nombre total de porteurs photo générés. En effet, certains porteurs se recombinent dans le volume ou à la surface de la cellule, ce phénomène dépendant directement de la durée de vie  $\tau$  des porteurs minoritaires. Ces recombinaisons peuvent être réduites en mettant en œuvre différents traitements, abordés plus loin dans ce rapport.

Ces différents facteurs peuvent être optimisés à l'aide de procédés technologiques utilisés lors de la fabrication des cellules photovoltaïques et détaillés dans les parties suivantes de ce chapitre.

### 5. Rendement quantique et réponse spectrale

Le facteur de forme et le rendement renseignent sur les performances globales de la structure. Pour détailler ces caractéristiques en fonction de la longueur d'onde utilisée, le rendement quantique est introduit.

Le rendement quantique externe est le rapport du nombre de porteurs collectés sur le nombre de photons incidents d'une énergie donnée. Si chaque photon d'une longueur d'onde précise génère un porteur de charge effectivement collecté, le rendement quantique vaut l'unité. Comme nous l'avons vu précédemment, le coefficient d'absorption du silicium varie avec la longueur d'onde du rayonnement.

Les photons de faible longueur d'onde sont absorbés près de la surface (vers la zone d'émetteur) alors que ceux de forte longueur d'onde sont plus en profondeur du dispositif (au niveau de la base). On peut donc accéder au comportement et à l'efficacité de chaque région constitutive de la cellule. Ainsi, ce paramètre est diminué par plusieurs facteurs : les phénomènes de recombinaison en surface et en volume y jouent une part importante. La réflexion sur la face avant et la faible longueur de diffusion des porteurs ont pour conséquence de diminuer le rendement quantique sur toute la gamme de longueurs d'onde (Figure I.8).

Le paramètre présenté ici tient compte des pertes optiques comme la réflexion ou la transmission à travers la cellule : c'est le rendement quantique externe (*EQE* pour external quantum efficiency). Il peut être corrigé des pertes optiques pour donner le rendement quantique interne (*IQE*) qui tient compte des caractéristiques propres de la cellule (longueur de diffusion, recombinaisons en surface et en volume) :

$$IQE = \frac{EQE}{(1-R)} \quad (I.5)$$

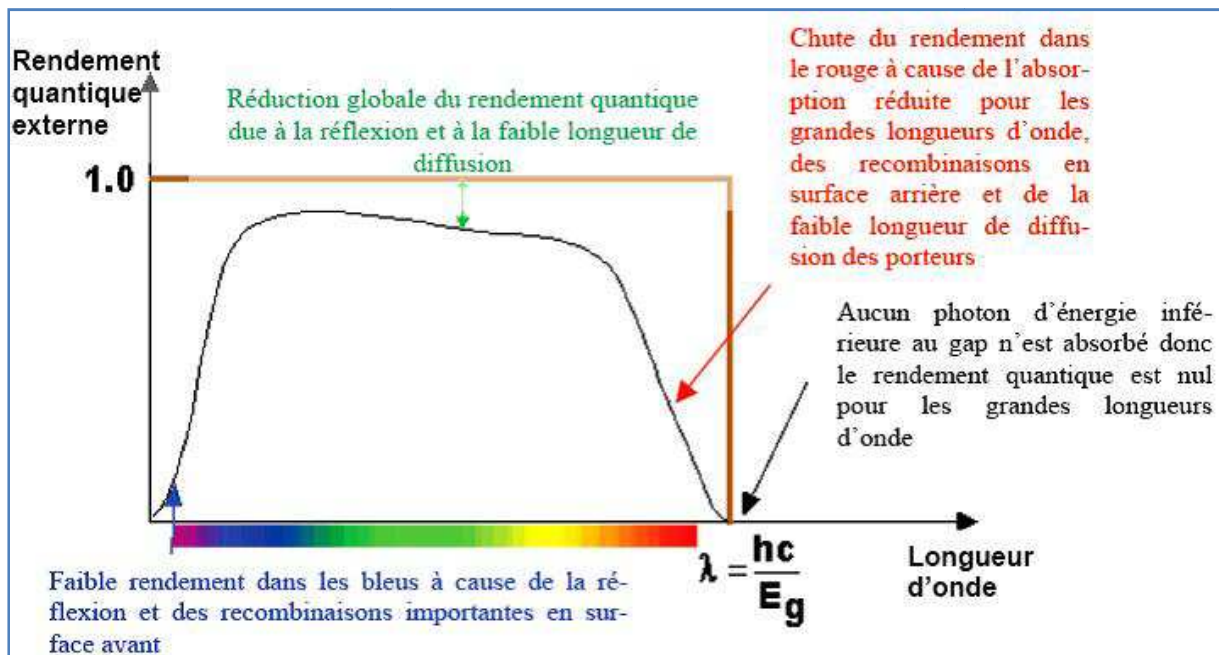


Figure I.7 : Rendement quantique externe d'une cellule photovoltaïque [3].

La réponse spectrale ( $SR$  pour spectral réponse) est, de manière analogue, le rapport de l'intensité  $I(\lambda)$  générée par la cellule sur la puissance incidente  $P_{inc}(\lambda)$ , pour chaque longueur d'onde:

$$SR = \frac{I(\lambda)}{P_{inc}(\lambda)} = \frac{I(\lambda)}{\Phi(\lambda) \cdot S} \quad (I.6)$$

où  $\Phi(\lambda)$  est le flux lumineux incident ( $W \cdot m^{-2}$ ) et  $S$  est la surface de la cellule ( $m^2$ ). C'est en général cette grandeur qui est mesurée et qui permet de calculer le rendement quantique, en prenant en compte l'énergie des photons :

$$SR = \frac{q\lambda}{hc} EQE \quad (I.7)$$

## 6. Électricité photovoltaïque

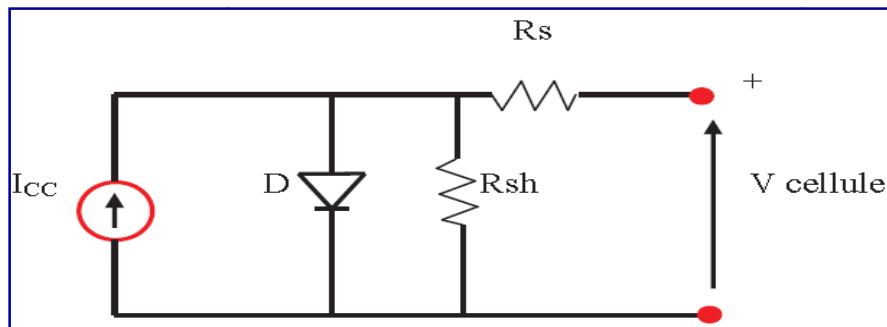
### 6.1. La cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques ou les plaques solaires sont des composants Optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un Processus appelé « effet photovoltaïque », a été découverte par E. Becquerel en 1839.

Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants.

La taille de chaque cellule va de quelques centimètres carrés jusqu' à 100 cm<sup>2</sup> ou plus sa forme est circulaire, carrée ou dérivée des deux géométries.

Les cellules se branchent en série, ce qui permet aux électrons générés par une cellule d'être repris par la suivante. Le but est d'avoir une différence de potentiel normalement entre 6 et 24 V. la figure (I.8) suivante représente le schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.



**Figure I.8 :** Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque

La cellule PV peut se modéliser à partir de l'équation :

$$I = I_{CC} - I_s \left( \exp^{\frac{V + R_s \times I}{n \times V_T}} - 1 \right) - \frac{V + R_s \times I}{R_{SH}} \quad (I.8)$$

Ou :  $V_T = \frac{KT}{e}$

Avec :

$I_s$  (A) courant de saturation

$V_T$  (V) potentiel thermodynamique

$K$  (J.K) constante de Boltzmann ( $1.380 \times 10^{-23}$  J/K)

$T$  (K) température effective de la cellule

$e$  charge de l'électron ( $1.602 \times 10^{-19}$  C)

$n$  facteur de non idéalité de la jonction

$I$  (A) courant fourni par la cellule

$V$  (V) tension aux bornes de la cellule

$I_{CC}$  (A) courant de court-circuit de la cellule dépendant de l'ensoleillement et de la température

$R_{sh}$  ( $\Omega$ ) résistance de shunt caractérisant les courants de fuites de la jonction

$R_s$  ( $\Omega$ ) résistance série représentant les diverses résistances des contacts et de connexions.

## 6.2. La jonction PN utilise comme un capteur

Une jonction P-N est créée par la mise en contact d'un semi-conducteur dopé N et d'un semi-conducteur dopé P. La jonction entraîne l'égalisation des niveaux de Fermi par décalage des bandes. Si l'on applique une tension positive du côté de la région P, les porteurs majoritaires positifs (les trous) sont repoussés vers la jonction. Dans le même temps, les porteurs majoritaires négatifs du côté N (les électrons) sont attirés vers la jonction. Arrivés à la jonction, soit les porteurs se recombinent (un électron tombe dans un trou) en émettant un

photon éventuellement visible (LED), soit ces porteurs continuent leur course au travers de l'autre semi-conducteur jusqu'à atteindre l'électrode opposée : le courant circule, son intensité varie en exponentielle de la tension.

Si la différence de potentiel est inversée, les porteurs majoritaires des deux côtés s'éloignent de la jonction, bloquant ainsi le passage du courant à son niveau. Ce comportement asymétrique est utilisé notamment pour redresser le courant alternatif.

La jonction P-N est à la base du composant électronique nommé diode, qui ne permet le passage du courant électrique que dans un seul sens. De manière similaire, une troisième région peut être dopée pour former des doubles jonctions N-P-N ou P-N-P qui forment les transistors bipolaires. Dans ce cas-là, les deux semi-conducteurs de même type sont appelés l'émetteur et le collecteur. Le semi-conducteur situé entre l'émetteur et le collecteur est appelé la base, et a une épaisseur de l'ordre du micromètre. Lorsqu'on polarise la jonction émetteur-base en direct, celle-ci est passante alors que la jonction base-collecteur est bloquée. Cependant la base est assez fine pour permettre aux nombreux porteurs majoritaires injectés depuis l'émetteur (fortement dopé) de la traverser avant d'avoir le temps de se recombiner. Ils se retrouvent ainsi dans le collecteur, produisant un courant contrôlé par la tension de base. [1]

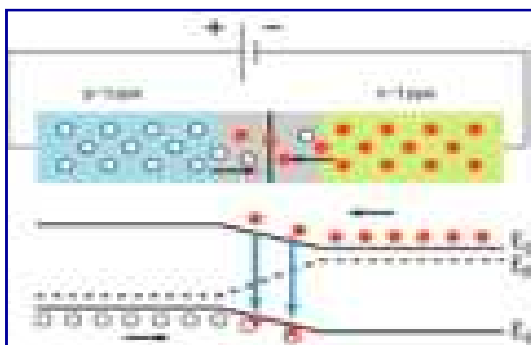


Figure I.9 : Jonction P-N en polarisation directe.

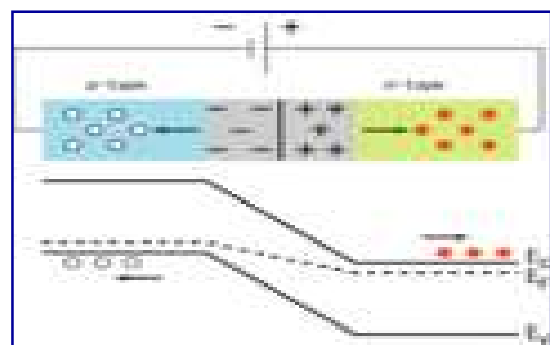


Figure I .10 : Jonction P-N en polarisation inverse.

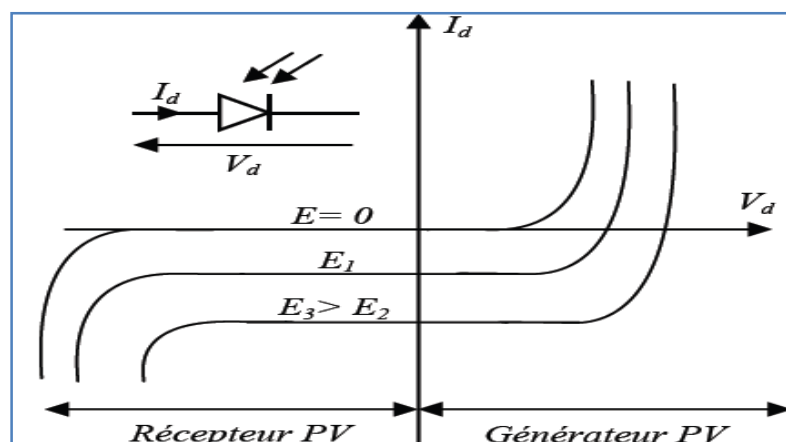


Figure I .11: caractéristique d'une jonction PN sous éclaircment

## 7. Le générateur PV et ses performances

Un générateur photovoltaïque ou module est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées tels que la puissance, le courant de court-circuit ou la tension en circuit ouvert [2].

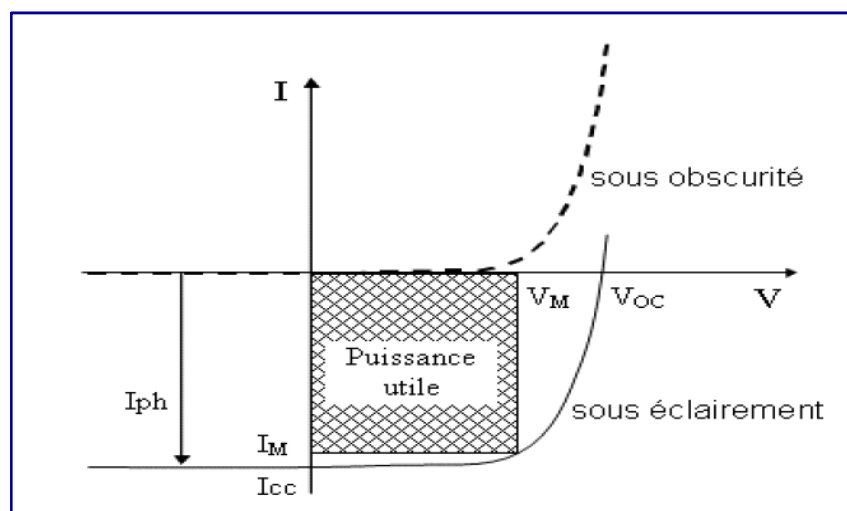
### 7.1 Caractéristiques courant / tension

La courbe de la caractéristique d'une cellule PV représente la variation du courant qu'elle produit en fonction de la tension aux bornes de la cellule PV depuis le court-circuit (tension nulle correspondant au courant maximum ne produit) jusqu'au circuit ouvert (courant nul pour une tension maximale aux bornes de la cellule).

Cette courbe est établie dans des conditions ambiantes de fonctionnement données (répartition du rayonnement donnée, cellule PV à une température donnée, air ambiant circulant à une vitesse donnée).

En effet, le fonctionnement des cellules photovoltaïques dépend des conditions d'ensoleillement et de température à la surface de la cellule. Ainsi, chaque courbe courant-tension correspond à des conditions spécifiques de fonctionnement.

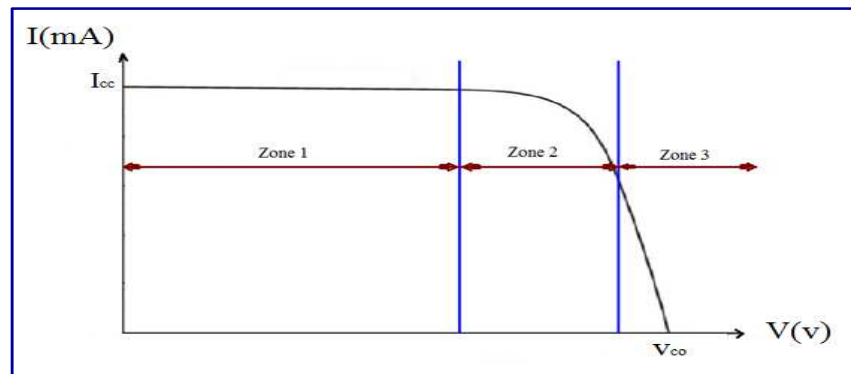
À température fixés, pour les deux régimes (sous obscurité et sous éclairement) la caractéristique courant / tension d'une cellule a l'allure suivante :



**Figure I.12 :** La caractéristique d'une cellule photovoltaïque non éclairée est celle en présence d'un éclairement.

Cette caractéristique est décalée vers le bas d'un courant  $I_{cc}$  (courant de court-circuit). De même, elle coupe l'axe des abscisses en  $V_{oc}$  (tension maximale de circuit ouvert).

On peut regrouper trois zones essentielles :



**Figure I.13 :** les différentes zones de caractéristique  $I=f(V)$  d'une cellule photovoltaïque

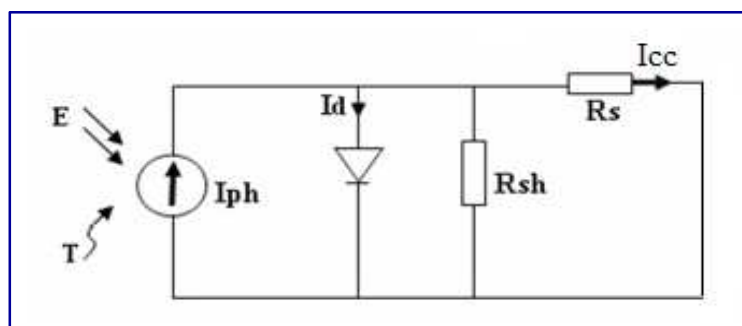
**La zone 1 :** où le courant reste constant quelle que soit la tension. Pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.

**La zone 2 :** correspondant au coude de la caractéristique. La région intermédiaire entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.

**La zone 3 :** qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante. Dans ce cas, le générateur est assimilable à un générateur de tension [1].

- **Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ )**

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule. 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.

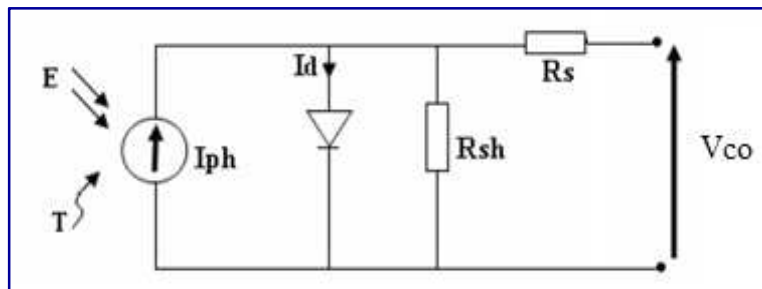


**Figure I.14 :** Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque en court-circuit

$$I_{cc}(V = 0) = I_{ph} \quad (\text{I.9})$$

- **Tension à 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 décroît avec la température. Elle varie peu avec l'intensité lumineuse.



**Figure I.15 :** Schéma électrique d'une cellule Photovoltaïque en circuit ouvert

$$I_{ph} - \left( e^{\frac{V_{co}}{V_T}} - 1 \right) - \frac{V_{co}}{R_{sh}} = 0 \quad (\text{I.10})$$

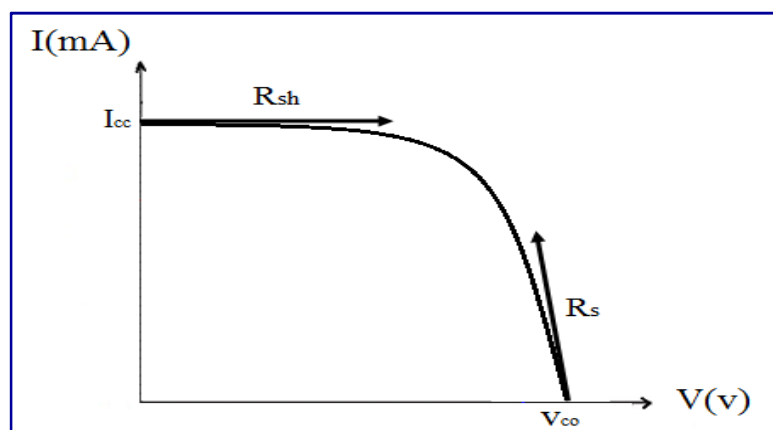
$$V_{co} = V_T \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1\right) \quad (\text{I.11})$$

- **La résistance série**

Caractérise les pertes par effets Joule de la résistance propre aux contacts entre les différentes régions constitutives de la cellule, à savoir l'émetteur, la base, les contacts métalliques, les grilles de collectes. L'influence de  $R_s$  sur les caractéristiques d'une cellule est très importante.

- **La résistance shunt**

La résistance parallèle (ou shunt) caractérise les pertes par recombinaison dues aux épaisseurs des régions N et P et de la zone de charge et d'espace.  $R_p$  est donc liée directement au processus de fabrication, l'existence de défaut de structures et aux états de surface. Elle traduit l'existence de shunts à travers l'émetteur également, connue sous le nom de résistance de court-circuit.



**Figure I.16 :** détermination graphique de résistance shunt Et série

Différentes méthodes de détermination des résistances shunt et série ont été proposées par des chercheurs. La méthode la plus simple est la méthode graphique qui consiste à évaluer  $R_{sh}$ ,

$R_s$  à partir de la pente de la caractéristique I-(V), au point de court-circuit pour  $R_{sh}$ , et au point de circuit-ouverte pour  $R_s$ .

$$R_{sh} = \left( \frac{\Delta V}{\Delta I} \right)_{I=I_{CC}} \quad (I-12)$$

$$R_s = \left( \frac{\Delta V}{\Delta I} \right)_{V=V_{CO}} \quad (I-13)$$

## 7.2 Influence de la température

L'équation de Boltzmann donne :  $I_{SC} = I_0 \cdot \exp \left( q \cdot \frac{V_{CO}}{KT} \right)$ , l'expérience montre que la tension de circuit ouvert d'une cellule solaire diminue avec l'augmentation de la température de la cellule [14].

Nous présentons ci-dessous les caractéristiques I-V et P-V (figure I.15 et I.16) d'un module photovoltaïque **pour** un niveau d'ensoleillement  $G$  donné et pour différentes températures :

Pour la figure (I.17) Nous remarquons que le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, on constate que la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Et par contre la puissance maximale du générateur subit une diminution lorsque la température augmente figure (I.18).

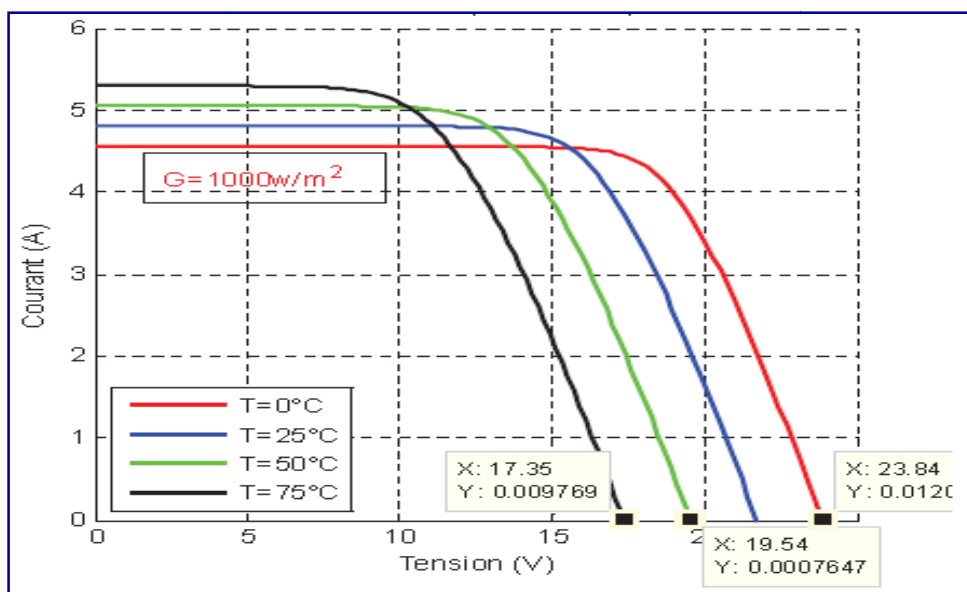


Figure I .17: La caractéristique de I=f(V) en fonction de température



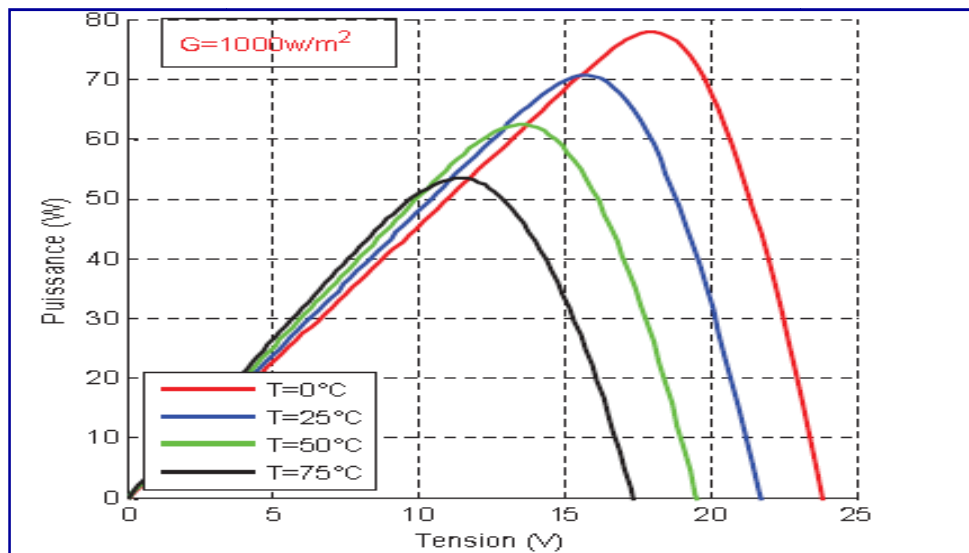


Figure I.18 : La caractéristique de  $P= f(V)$  en fonction de température

### 7.3 Influence de l'éclairement

Le même travail comme précédente, nous avons fixé la température pour différents éclairagements figure (I.19 et I.20). Pour la figure (I.19) on remarque que pour l'éclairement  $G=1000 \text{ w/m}^2$  le courant  $I_{sc}=4.8\text{A}$  et pour  $G=800\text{w/m}^2$  le courant  $I_{sc}=3.84\text{A}$  on peut voir que le courant subit une variation importante, quand l'éclairement augmente le courant de court-circuit est augmenté, mais par contre la tension varie légèrement .Ce qui se traduit par une augmentation de la puissance, lorsque l'éclairement est augmenté figure (I.20).

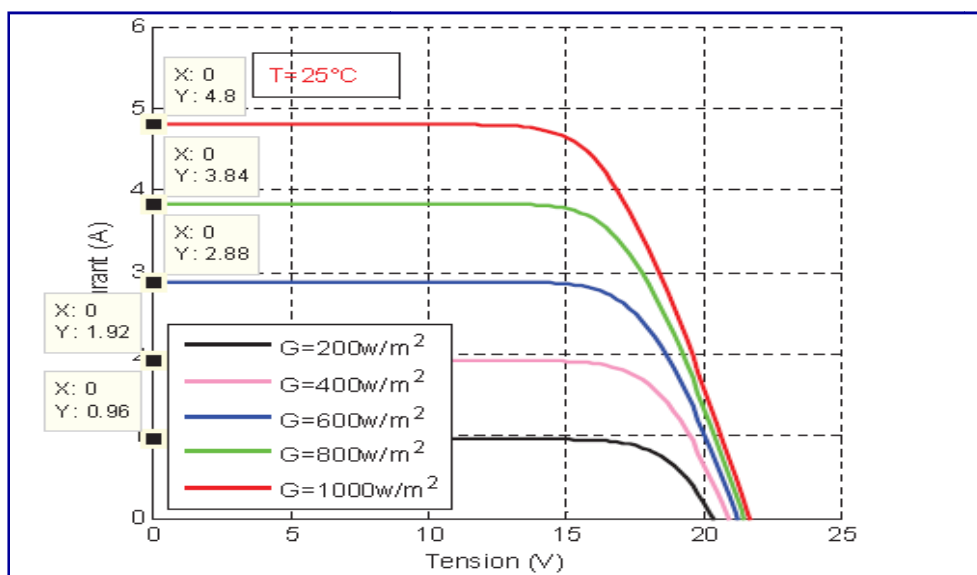


Figure I.19 : La caractéristique  $I=f(v)$  en fonction de l'éclairement

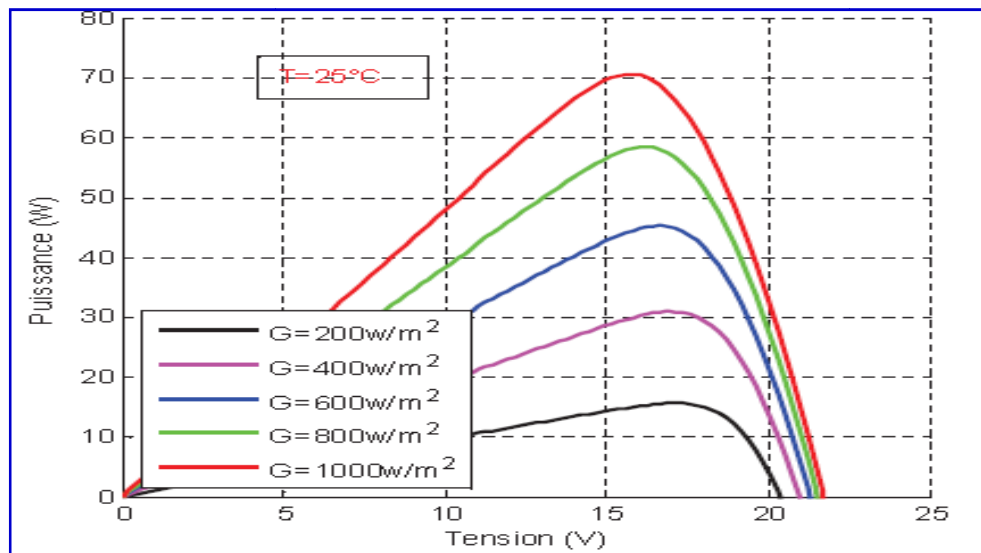


Figure I .20 : La caractéristique  $P=f(v)$  en fonction de l'éclairement

### 7.4 Regroupement des cellules en série

Une association de ( $N_s$ ) cellule en série figure (I.21) 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 obtenues par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation résume les caractéristique électrique d'une association série de ( $N_s$ ) cellules [15].

$$V_{CONS} = N_s * V_{CO} \tag{I.14}$$

$$I_{CC} = I_C \tag{I.15}$$

$V_{CONS}$ : La somme des tensions en circuit ouvert de  $N_s$  cellules en série.

$I_{CCNS}$ : Courant de court-circuit de  $N_s$  cellules en série.

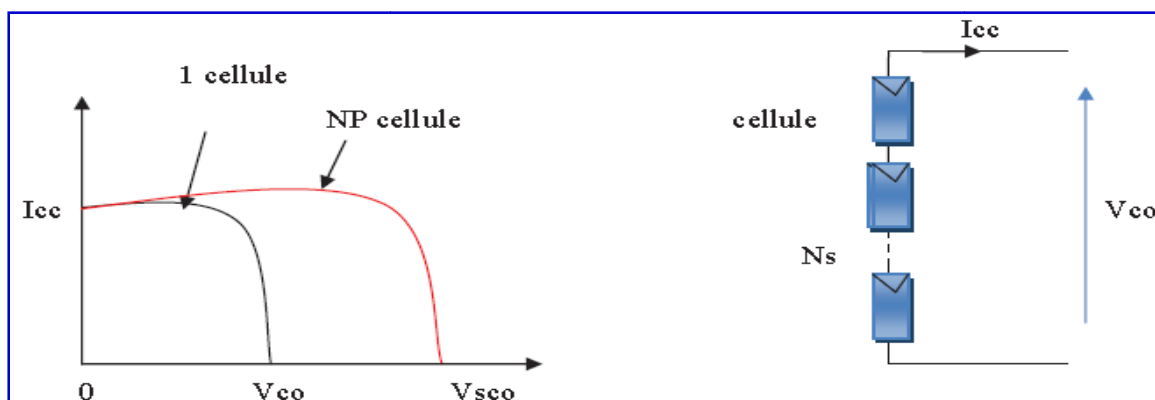


Figure I .21: Caractéristique courant tension de  $N_s$  cellule en série

### 7.5 Regroupement des cellules en parallèle

Une association parallèle de ( $N_P$ ) cellule figure (I.21) 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 résultante du groupement est obtenue par addition des courants [16].

Avec :

$$I_{CCNP} = N_P \times I_{CC} \quad (I. 16)$$

$$V_{CO} = V_{CONP} \quad (I. 17)$$

$I_{CCNP}$ : la somme des courants de court circuit de ( $N_P$ ) cellule en parallèle

$V_{CONP}$ : tension du circuit ouvert de ( $N_P$ ) cellules en parallèle

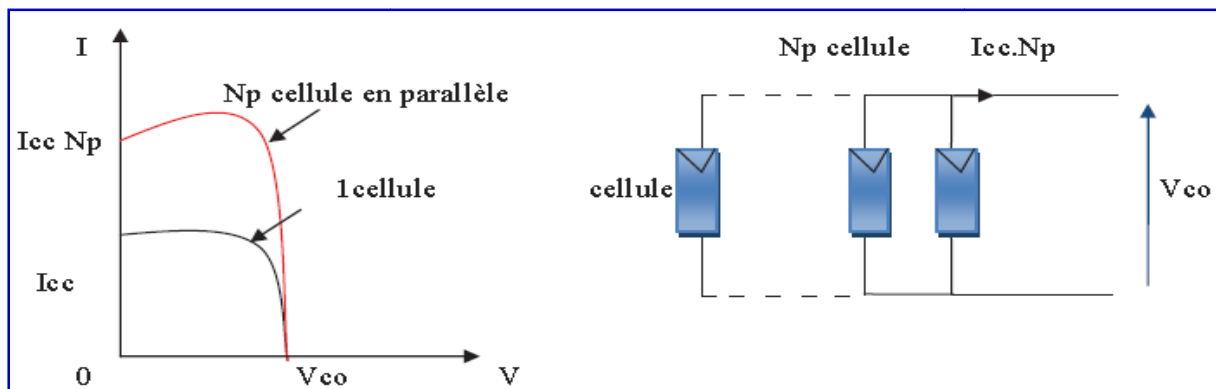


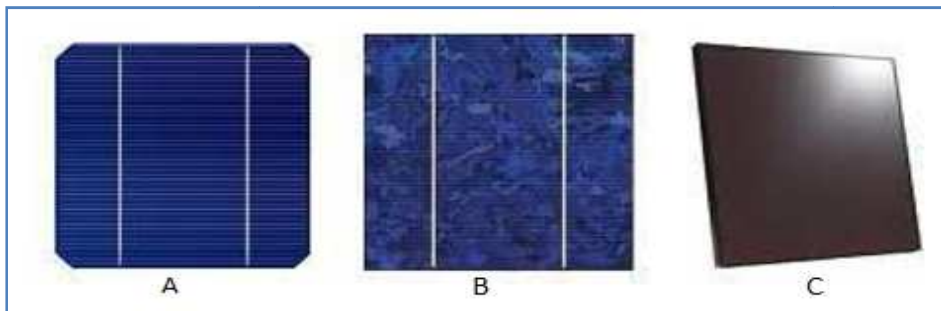
Figure I.22 : Caractéristique courant tension de ( $N_P$ ) cellule en parallèle

## 8. Les Différents Types de Cellules Photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques sont constituées de semi-conducteurs à base de silicium (Si), de germanium (Ge), de sélénium (Se), de sulfure de cadmium (CdS), de tellure de cadmium (CdTe) ou d'arséniure de gallium (GaAs). Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques, car il est très abondant dans la nature. On le trouve dans la nature sous forme de pierre de silice. La silice est un composé chimique (dioxyde de silicium) et un minéral de formule  $SiO_2$ . Il est le principal constituant des roches sédimentaires détritiques (sables, grès) [1].

Les différents types de cellules PV existants sont :

- ✚ Cellule en silicium amorphe (rendement : 6 à 10%)
- ✚ Cellule en silicium monocristallin (rendement : 13 à 17%)
- ✚ Cellule en silicium poly cristallin (rendement : 11 à 15%)
- ✚ Cellule Tandem
- ✚ Cellule en matériaux organiques (rendement : 3.6%)



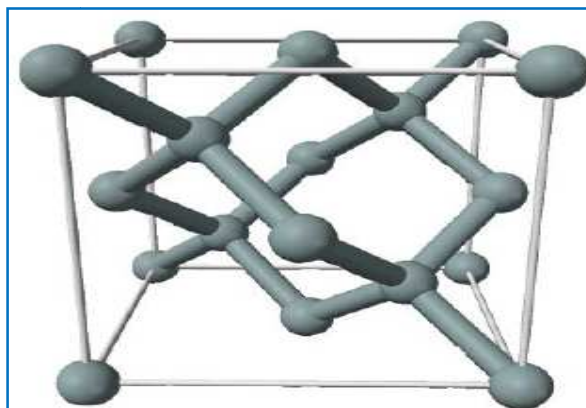
**Figure I.23** : Types de cellules photovoltaïques. (A) silicium monocristallin, (B) silicium poly cristallin, (C) silicium amorphe [1]

## 9. Silicium cristallin

Le silicium fait partie de la quatorzième colonne du tableau périodique de Mendeleïev. Le silicium est un élément dit cristallogène i.e. il existe une forme cristalline du silicium. En effet, le silicium, de même que le germanium se cristallise en une structure de type "diamant" : la maille élémentaire (représentée en **Fig I-24**) est cubique à faces centrées avec la moitié des sites tétraédriques occupés. Le paramètre de maille du cristal de silicium est de  $5.431 \text{ \AA}$ , pour des conditions normales de pression et de température.

Le silicium (Si) ainsi que les autres éléments de la colonne IV du tableau périodique forment des cristaux covalents. Ces éléments génèrent des liaisons covalentes avec leurs quatre atomes voisins, en mettant en commun leurs quatre électrons de valence. Les électrons de valence dans le cas du silicium ont une énergie de liaison de  $1.12 \text{ eV}$  à température ambiante (intermédiaire entre celle du diamant (isolant) et celle de l'étain qui est un bon conducteur) faisant de lui un semi-conducteur.

Grâce au procédé Czochralski permettant l'obtention de silicium ultra pur, et à la possibilité d'ajuster le comportement électronique du silicium via l'incorporation d'éléments comme le bore ou le phosphore dans le cristal (dopage), que la porte s'est ouverte à de nombreuses applications en électronique et autres applications high-tech.



**Figure I-24** : Maille élémentaire d'un cristal de silicium

## 10. Les cellules multi-jonctions à haut rendement.

Aujourd'hui, la plupart des cellules photovoltaïques inorganiques sont constituées d'une simple jonction PN. Dans cette jonction, seuls les photons dont l'énergie est égale ou supérieure à la bande interdite du matériau (notée  $E_g$  en eV) sont capables de créer des paires électron-trou. En d'autres termes, la réponse photovoltaïque d'une cellule simple jonction est limitée. Seule la proportion du spectre solaire dont l'énergie des photons est supérieure au gap d'absorption du matériau est utilisable.

D'autre part, même si l'énergie des photons est suffisante, la probabilité de rencontrer un électron est faible. Ainsi, la plupart des photons traversent le matériau sans avoir transféré leur énergie. Une première réponse pour limiter les pertes est connue depuis longtemps. Du point de vue technologique, il suffit d'utiliser des systèmes à plusieurs niveaux, en empilant des jonctions possédant des gaps décroissants, (Figure I-24). Ainsi il est possible d'exploiter le spectre solaire dans sa quasi-totalité avec des rendements de conversion très importants.

Des cellules PV multi-jonctions à base d'associations de matériaux semi-conducteurs III-V (GaAs, AlGaAs, InGaAs, etc) ont ainsi été mises au point depuis les années 60 présentant des rendements très élevés supérieurs parfois à 40%. Elles ne sont pas connues du grand public à cause de leur coût de fabrication, de loin, les plus élevés actuellement (fabrication sous ultra vide, croissance très lente, problème de casses et de défauts aux interfaces) [17].

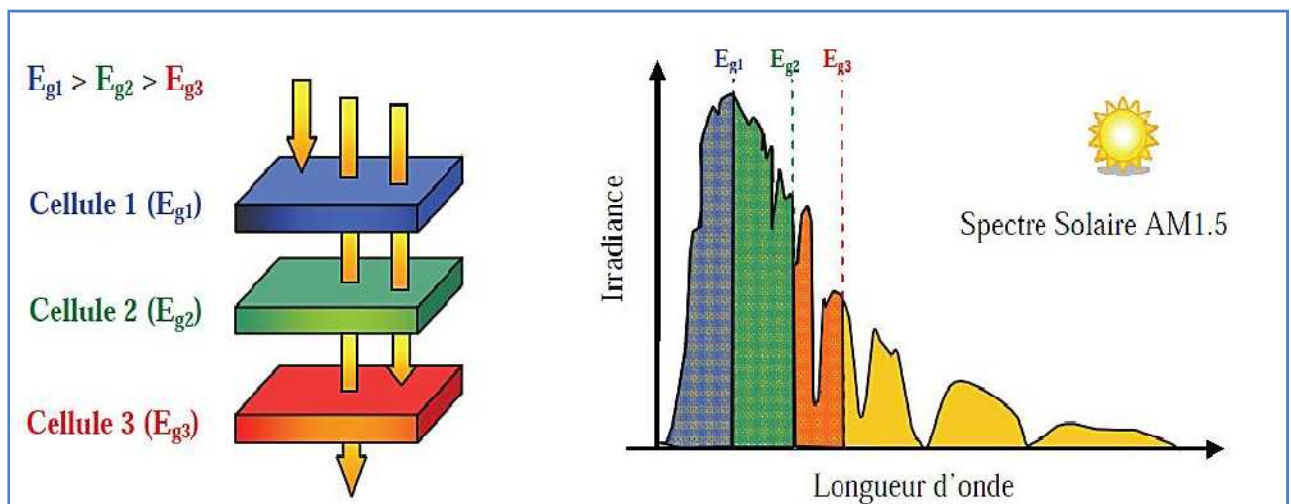


Figure I. 25. Principe de la cellule à hétérojonction [17]

Le développement des cellules à haut rendement a été motivé en priorité par les applications spatiales. En effet, dans ce domaine, le critère principal n'est pas le prix par watt crête ( $\text{€}/\text{Wc}$ ) mais plutôt le nombre de watts par kilogramme ( $\text{Wc}/\text{kg}$ ). Il faut savoir qu'envoyer un satellite dans l'espace coûte entre 3.000€ et 30.000€ par kilogramme (le prix dépend de l'altitude de mise en orbite).

Dès lors, il est compréhensible qu'on utilise les technologies photovoltaïques les plus performantes afin d'optimiser le poids de l'ensemble et faire en sorte qu'il soit le plus longtemps possible autonome. Un dernier avantage à signaler pour ces cellules est leur robustesse vis-à-vis des radiations et des impacts. Au cours du temps, ces cellules ont démontré qu'il était possible d'avoir des générateurs d'énergie qui vieillissent très bien et qui

peuvent produire de l'énergie même en ayant subi quelques détériorations. Le rendement des modules commercialisés contenant des cellules multi-jonction actuellement avoisine les 30% pour un spectre AM0 [17]. Certaines recherches se concentrent sur l'amélioration des technologies de fabrication pour en baisser le coût et les adapter aux besoins terrestres.

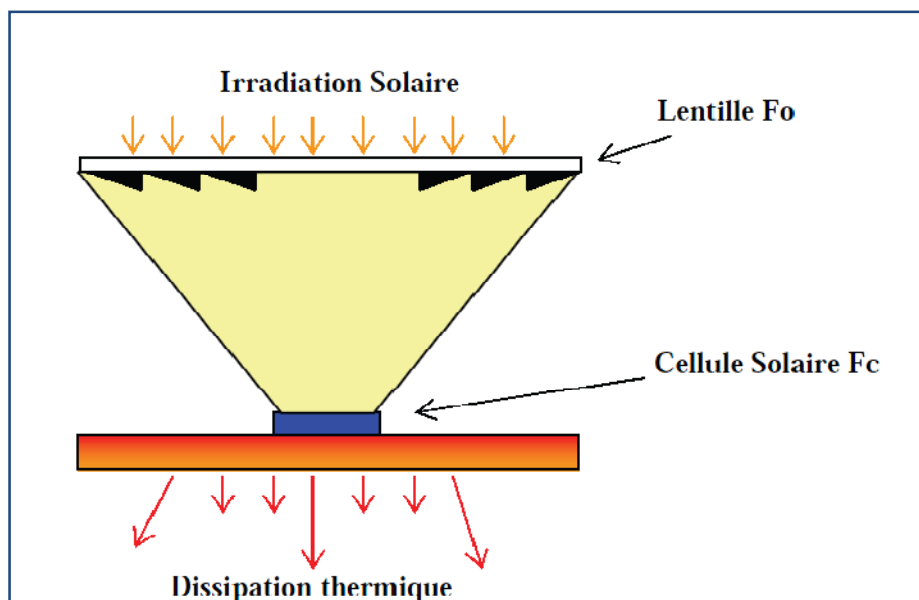
Ils s'affrontent principalement aux problèmes d'interfaces et de passage de petits volumes de fabrication à des grandes quantités. Aujourd'hui, les véhicules de courses terrestres et/ou maritimes en utilisent pour assurer leur autonomie. Mais cela reste des cellules beaucoup trop chères pour des applications domestiques.

En utilisant des concentrateurs solaires, certains pensent pouvoir baisser les prix (moins de surface de cellule utilisée) et prendre une place dans le marché conventionnel terrestre. Ainsi, si on compare le meilleur rendement sans concentrateur d'une triple jonction GaInP/GaAs/Ge atteignant les 32%, cette même cellule arriverait à 40.7% avec concentrateur [17].

On peut même envisager des rendements encore plus importants avec des cellules complexes de 4 à 6 jonctions voir plus [17]. L'idée basique du concentrateur photovoltaïque (CPV) est de réduire le prix de revient d'un système PV en focalisant les rayons lumineux sur une cellule solaire de surface  $F_c$  par le biais d'une lentille optique de surface  $F_o$ . Le ratio de concentration  $C$  est approximativement  $C = F_o/F_c$  comme indiqué en Figure I-25.

La réduction de la surface des cellules permet d'utiliser des cellules plus performantes qui étaient encore trop chères pour être utilisées sur de grandes surfaces de modules PV.

En pratique, la plus grande différence à noter entre un GPV composé de modules PV classiques et un CPV est la nécessité d'ajuster pour ce dernier l'orientation du système pour suivre la course du soleil. En effet, un mauvais angle de pénétration de la lumière pourrait priver complètement les cellules de lumière, d'autant plus que ces capteurs ne peuvent utiliser que le rayonnement direct du spectre solaire.



**Figure I. 26.** Schéma de principe d'un concentrateur photovoltaïque [17].

Cette fonction, réalisée par un système suiveur ou tracker, doit être prise en compte dans le prix global du CPV et représente une part non négligeable de l'investissement rendant en fin

de compte ce système encore trop coûteux pour le grand public. Le nombre d'exemples de centrales solaires à concentration montrent cependant bien l'intérêt de ces systèmes et leur viabilité [19,20]. Ils sont aujourd'hui destinés aux très grandes centrales énergétiques dépassant la centaine de kW. Des problèmes thermiques liés à la concentration des rayons sur les cellules nécessitent un dispositif de dissipation thermique performant. Une technique intéressante permet d'allier la production solaire photovoltaïque à la production solaire thermique, en récupérant la chaleur émise, par le biais d'un liquide caloporteur, et ainsi créer également un chauffe-eau solaire.

### 11. Nouvelles technologies photovoltaïques.

On utilise de plus en plus de matériaux organiques dans le domaine de l'optoélectronique, avec des perspectives d'électronique organique voire moléculaire, pour l'éclairage à l'aide de diodes électroluminescentes organiques (OLED : Organic Light- Emitting Diode). Bien que les optimisations des matériaux à mettre en œuvre ne soient pas les mêmes, le domaine du photovoltaïque bénéficie depuis quelques années des avancées technologiques de l'optoélectronique. Ainsi, bien que cette filière soit vraiment récente, les progrès annuels sont spectaculaires. Les matériaux organiques, moléculaires ou polymériques, à base de carbone, d'hydrogène et d'azote, sont particulièrement intéressants en termes d'abondance, de coût, de poids et de mise en œuvre.

Comme les semi-conducteurs, ils possèdent des niveaux d'énergies susceptibles d'absorber les photons en créant des paires électron-trou utilisables grâce à des transitions entre les niveaux dits HOMO (Highest occupied molecular orbital) et des niveaux dits LUMO (Lowest unoccupied molecular orbital). En l'absence de séparation, les paires électron-trou peuvent se recombiner en émettant des photons de la longueur d'onde correspondante (fluorescence, luminescence) plutôt que se convertir en chaleur comme vu précédemment pour les filières inorganiques. La séparation des charges reste encore aujourd'hui un des points bloquants (Verrou) pour être effectuée efficacement. Si elles peuvent être séparées et transportées vers un circuit extérieur grâce à deux phases adjacentes, on obtient alors des cellules photovoltaïques d'un nouveau type tel que celle présentée en Figure I-27.

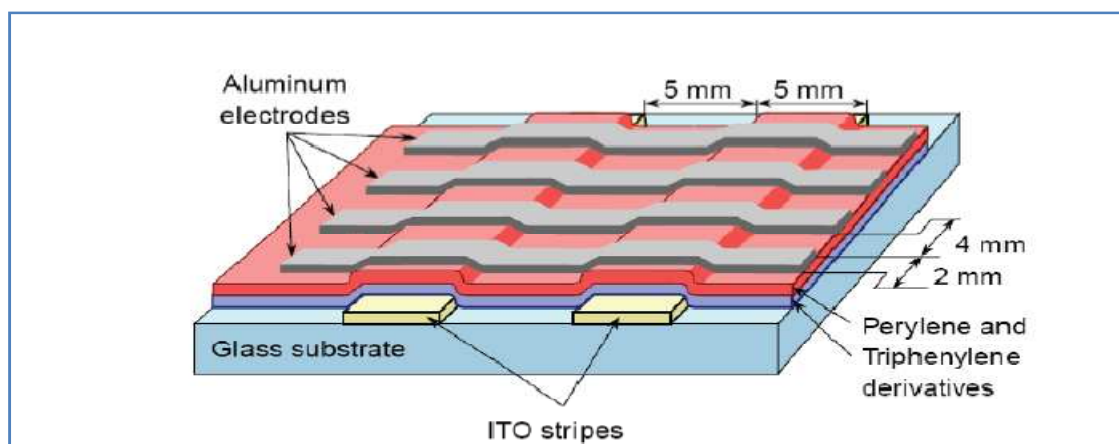


Figure I. 27. Schéma de principe d'une cellule organique [17]

Pour en faire des cellules organiques PV à part entière dans le futur, il faut améliorer les propriétés de création de paires électron-trou dans des molécules organiques ou des polymères mais également développer des méthodes de séparation des paires (e-t) en associant un matériau accepteur et un matériau donneur, grâce à des positions différentes des bandes énergétiques. On parle dans ce contexte de matériaux LUMO et HOMO. Un des points les plus difficiles est la séparation de ces deux phases qui ont tendance à se mélanger car les matériaux sont solubles l'un avec l'autre. Cependant une avancée importante a permis de séparer spontanément les donneurs et les accepteurs en rendant les matériaux non solubles [17].

Dans le cas des polymères, tout se passe comme si on avait deux catégories de fibres intimement mélangées, l'une conduisant les électrons et l'autre les trous [17].

D'autres recherches se sont orientées vers un modèle de cellule photovoltaïque à la fois organique et inorganique (cellules hybrides) qui offre de nombreux avantages par rapport aux cellules traditionnelles. Ainsi, il a été élaboré une cellule nanocristalline qui imite la photosynthèse des plantes. Utilisées depuis longtemps dans les lasers à colorants ou les matériaux pour l'optique, l'utilisation efficace des molécules de colorants organiques dans le domaine du photovoltaïque, fut découvert en 1991 par Michael Graetzel. Des molécules organiques pigmentées (colorant), absorbent la lumière et libèrent ainsi des électrons. Les électrons sont véhiculés vers l'anode par une couche poreuse de dioxyde de titane (TiO<sub>2</sub>), un matériau semi-conducteur inorganique. A l'anode, les électrons sont dirigés vers un circuit externe où leur passage produit de l'énergie électrique [17].

Le rendement de ces cellules solaires organiques est encore inférieur à 3% à cause justement de la nature du mélange et des problèmes de recombinaisons électroniques [17].

L'oxydation de la cellule est encore un autre problème auquel il faut se pencher en recherche pour trouver des solutions viables à long terme. Malgré tous ces inconvénients, le développement de ces cellules est prometteur à l'avenir car elles présentent une grande facilité de fabrication. En effet, les matériaux actifs peuvent s'étaler sur de grandes surfaces.

Comme ces cellules peuvent facilement se développer sur matériaux souples, leur flexibilité quasi naturelle comme le montre la Figure I-28 est également un atout. Le coût de ces cellules organiques est inférieur à celui des cellules à colorants et elles peuvent même être biodégradables. Les cellules solaires organiques avec leurs faibles coûts de matière première, leurs faibles besoins énergétiques de production et leurs capacités à être fabriquées à grande échelle sont des candidates sérieuses à fort potentiel de développement photovoltaïque à long terme [17].





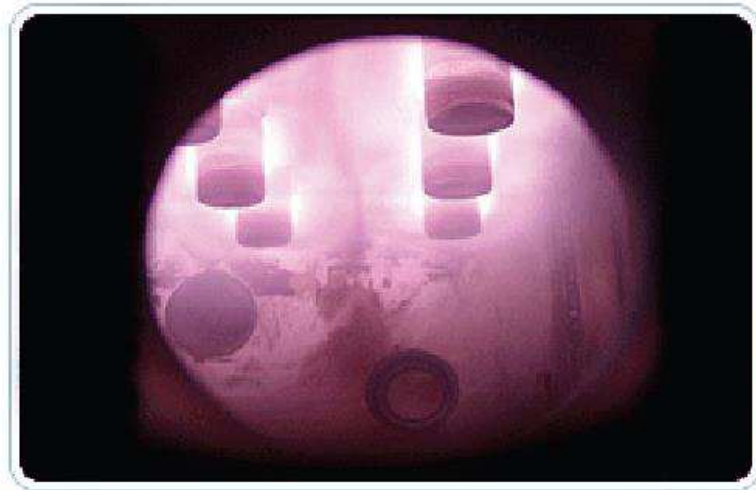
**Figure I. 28.** Cellule solaire tout Organique sur substrat souple [17].

## 12. Technologie couche-mince.

Les cellules PV dites couche mince (Thin-film) constituent ce que certains appellent les cellules de seconde génération car elles viennent historiquement juste après les cellules en silicium cristallin relativement épaisses. L'intérêt de la technologie couche mince vient de la faible quantité de matériaux nécessaire à la fabrication d'une cellule comparativement aux cellules classiques. Contrairement aux cellules silicium cristallin de première génération, on ne dépose que la quantité de matériau photosensible efficace pour absorber l'essentiel du rayonnement solaire (quelques microns d'épaisseurs suffisent). Par ailleurs, on utilise des méthodes de fabrication moins coûteuses des cellules qui permettent une intégration totale [17].

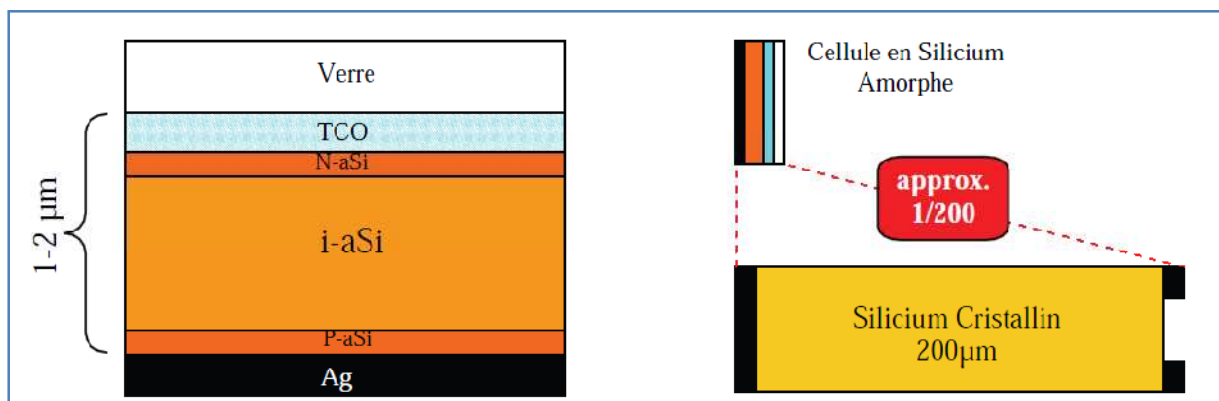
### 12.1. Silicium couche-mince.

Dans la technologie TFSi basée sur le silicium non cristallisé, le silicium amorphe (noté a-Si) peut être directement déposé sur un substrat de verre à basse température par un procédé de dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma (PECVD pour Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition) (Figure I-29) [27]. On dépose d'abord, sur le verre, une couche d'oxyde transparente conductrice d'une épaisseur de  $0,5\mu\text{m}$  (TCO pour Transparent Conductive Oxide). Cette étape est suivie par les étapes de dépôt suivantes : une couche d'a-Si de type N, puis une couche a-Si semi-isolante ( $1\mu\text{m}$  au total) et enfin une couche de a-Si dopée P [17].



**Figure I. 29.** Procédé technologique de dépôt chimique nommé PECVD [17].

Une dernière couche métallique arrière à base d'argent assure la connectique (Figure I-30). Le processus de fabrication de ces cellules permet d'abaisser significativement les coûts de productions. En effet, le cycle de production ne nécessite que très peu d'énergies le processus peut générer de grandes surfaces unitaires, de l'ordre du mètre carré, en un seul tenant.



**Figure I. 30.** -Schéma de principe d'une cellule à base de silicium amorphe et comparaison à une cellule en silicium cristallin [17].

Pour fabriquer un module, il suffit d'ajouter au processus une déposition de matériau conducteur entre les cellules servant d'interconnexion entre elles (Figure I-30).

Ainsi, grâce à cette souplesse de fabrication, il est possible de fabriquer simplement des panneaux de n'importe quelle puissance et tension en fonction de la demande et de l'application [17].

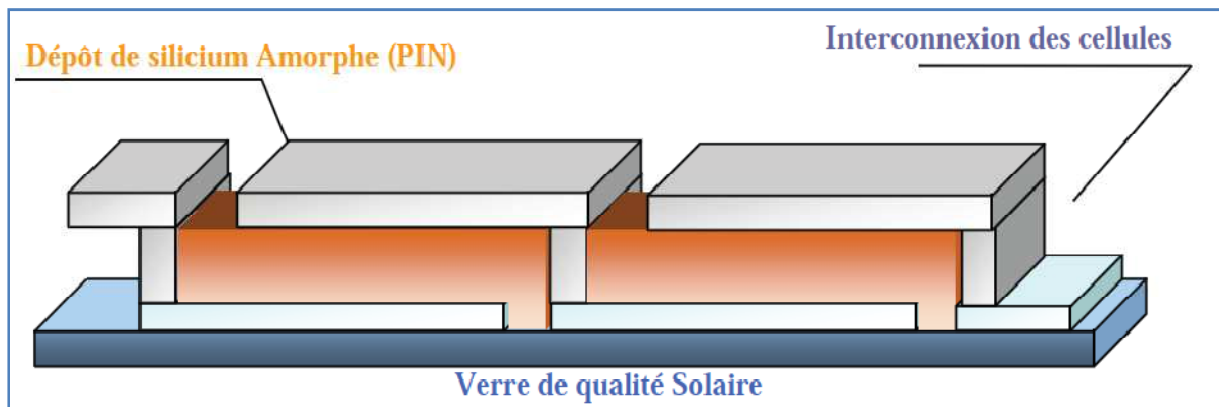


Figure I. 31. Schéma simplifié d'un module a-Si en couche mince [17]

### 13. Technologie de nano fil

#### 13.1. Pourquoi des cellules solaires à nano fils ?

L'utilisation des nano fils de silicium cristallin s'inscrit dans la même stratégie que les couches minces : diminuer la quantité de matériau absorbant tout en conservant des rendements élevés. Les deux avantages des nano fils de silicium que nous détaillerons dans la suite sont les suivants :

1- grâce à leur taille sub micrométrique, l'absorption optique d'une assemblée de nano fils est supérieure à celle d'une couche mince de même épaisseur. Ainsi, la quantité de matériau absorbant peut être diminuée tout en conservant une bonne absorption optique.

2-Le second avantage réside dans la géométrie particulière de la jonction radiale (jonction autour du nano fil). Cette structure permet l'utilisation de silicium de moins bonne qualité électronique tout en conservant une bonne collecte des porteurs. Il est donc possible d'utiliser des nano fils de silicium produits par une technique de croissance catalysée, dont la qualité électronique est réduite par les contaminations métalliques mais qui permet néanmoins de faire croître des nano fils sur de grandes surfaces et sur différents substrats (plaquette de silicium, verre, feuillard métallique).

L'utilisation de nano fils de silicium cristallin permettrait donc de diminuer le rapport  $\frac{\$}{W_c}$ .

#### 13.2. Les nanomatériaux et les nanotechnologies

Les nanotechnologies ont vu le jour dans le prolongement de la course à la miniaturisation. Cependant, les nanotechnologies ne sont pas une énième avancée dans le domaine de l'électronique mais ouvrent réellement une voie nouvelle d'exploration en sciences et de nouvelles possibilités d'applications. En effet, pour la première fois dans l'histoire humaine, l'homme peut [18] :

- (1) changer les propriétés fondamentales de la matière (comme les écarts de bande et la luminescence) ;
- (2) observer et manipuler des objets à l'échelle micrométrique (comme des ensembles d'atomes et de molécules) ;

(3) fabriquer et construire des nano-systèmes avec un nano fil ou nanotube permettant le passage d'un unique électron ou photon.

La première caractéristique découle du changement d'échelle de macroscopique à nanoscopie qui entraîne un changement des propriétés physiques de la matière. Les lois observées à cette échelle contredisent souvent de manière radicale celles de la physique dite classique. La seconde caractéristique est devenue possible par l'invention de la microscopie électronique en transmission haute résolution (HR-MET), de la microscopie à balayage (MEB) (incluant la microscopie à effet tunnel) et de la microscopie à force atomique (AFM) [18].

La troisième caractéristique est le résultat du développement des techniques de nano fabrication variées (comme la lithographie utilisant des faisceaux d'électrons ou des rayons X) autant que du phénomène physique de confinement quantique [18].

Les scientifiques ne sont pas encore unanimes quant à la définition des nanotechnologies.

En voici une régulièrement employée : les nanotechnologies sont l'ensemble des théories et techniques permettant de produire et manipuler des objets minuscules à l'échelle du milliardième de mètre (le nanomètre). C'est une technologie qui demande des outils de très haute précision pour déplacer les atomes un à un et visualiser ce qui se passe à une échelle aussi petite. Avec les nanotechnologies, sont nées les nanosciences qui ont pour rôle d'étudier les phénomènes se produisant aux échelles atomique, moléculaire et macromoléculaire et de manipuler les matériaux à ces mêmes échelles. Les nanomatériaux sont les briques de base de ces systèmes et sont au centre des nanosciences [18]

L'histoire scientifique des nanomatériaux a commencé en 1959 lorsque R. Feynman évoqua les potentialités des toutes petites particules de matière condensée : « *Je suis certain que si nous maîtrisons la structure de la matière à petite échelle, nous accéderons à un plus grand nombre de propriétés de la matière* ». Dès le début des années 60, des confirmations théoriques de cette intuition apparurent. R. Kubo (Université de Tokyo) détermina le comportement quantique de petits agrégats d'atomes. Ce modèle permettait de pressentir que lorsque la taille des grains élémentaires devient inférieure à la longueur critique associée à une propriété donnée, cette dernière devient ajustable. En 1986, Eric Drexler publie un ouvrage sur l'avenir des nanotechnologies, « *Engines of Creation : the coming area of nano technology* », dans lequel il délivre sa vision des progrès possibles avec l'essor des nanotechnologies. Il décrit l'idée de créer un assembleur, à savoir une nano machine consistant en un bras relié à un ordinateur qui pourrait être programmé pour construire d'autres nano machines. Idée qu'il ne pourra pas mettre en application en raison des difficultés pratiques à créer des machines de manipulation à l'échelle atomique.

Par la suite, les nanotechnologies ont pu se développer grâce à l'invention de deux instruments permettant d'observer et d'interagir avec la matière à une échelle atomique ou subatomique : le microscope à effet tunnel (Scanning Tunnel Microscopy, STM) et le microscope à force atomique (AtomicForce Microscopy, AFM)[18].

Plusieurs avantages des nanomatériaux peuvent être soulignés. Ces matériaux, du fait de leurs dimensions, possèdent un nombre important d'atomes de surface par rapport aux atomes de volume ce qui donne une importance majeure aux phénomènes de surface et qui va engendrer des propriétés physico-chimiques nouvelles. D'autre part, ces matériaux ont un paramètre

dimensionnel de l'ordre de la longueur d'onde des particules, elle-même impliquée dans un grand nombre de phénomènes physiques. Des phénomènes de confinement quantique apparaissent. En raison de ce ratio surface/volume élevé et de leurs dimensions, les nanomatériaux sont particulièrement intéressants du fait qu'ils peuvent présenter des propriétés anisotropes ou variables selon leurs dimensions, lesquelles sont des attributs importants dans les applications de type nano systèmes. La conséquence est que ces nanomatériaux ne respectent pas forcément les lois de la physique macroscopique et que l'interprétation de leur comportement peut être extrêmement complexe [18].

Enfin, leurs faibles dimensions répondent également aux exigences de taille de la course à la miniaturisation notamment en microélectronique et pour les micros sources d'énergie. Ainsi, les propriétés exceptionnelles qui peuvent découler de ces assemblages nanométriques permettent d'envisager de dépasser le simple cadre de la miniaturisation des dispositifs pour aller vers des applications nouvelles et innovantes [19].

En principe, il y a deux approches de la nanotechnologie : L'approche « descendante » (en anglais « top-down ») et la stratégie « montante » (en anglais « Bottom-up »). L'approche montante vise à construire des nano systèmes à partir des éléments atomiques et moléculaires. L'approche descendante cherche à fabriquer des nano dispositifs en usinant la matière avec des machines très précises comme le faisceau d'électrons, l'ultraviolet extrême ou la lithographie de rayons X [18]. Quelle que soit l'approche employée, les premières étapes à réaliser sont la synthèse et la caractérisation des nanomatériaux ainsi que l'étude de leurs propriétés physiques et chimiques.

Les nanomatériaux sont, par définition, des matériaux dont au moins une des dimensions est nanométrique, *i.e.* de l'ordre de 10<sup>9</sup> mètre.

On distingue arbitrairement trois catégories de nanomatériaux :

- Les nano-objets 0D : nanoparticules (agrégats, colloïdes, cristaux) composées de quelques dizaines à quelques milliers d'atomes,
- Les nano-objets 1D : nanotubes, nano fils, etc. dont la dimension nanométrique concerne le seul diamètre.
- Les objets 2D : couches nanométriques ou couches minces de quelques nanomètres d'épaisseur généralement déposées sur un matériau massif.

Il existe des nano-objets 1D de morphologies et structures différentes, nous en décrivons rapidement les principaux (cf. figure II.1) :

- Les nano fils ou nano fibres : cylindres pleins de quelques nanomètres de diamètre (1-100 nm) avec une longueur qui peut aller jusqu'à plusieurs centaines de microns,
- Les nanotubes : structures filaires creuses. Un nanotube est un ensemble de un ou plusieurs feuillets atomiques enroulés de façon concentrique. Les nanotubes de carbone sont les plus courants en raison de la structure planaire du carbone sous forme graphitique,
- Les nano bâtonnets (nano rods) : équivalentes aux nano fils mais avec une longueur bien inférieure, de quelques microns seulement,
- Les nano rubans (nano belts ou nano ribbons) : structures pleines de longueur équivalente à celle des nano fils mais présentant une section rectangulaire ou trapézoïdale dont un des côtés est plusieurs fois supérieur à l'autre. Forme qui fait penser à des rubans,

- Les nano câbles ou nano fils radiaux : structure avec un cœur de type nano fil et des couches coaxiales qui entourent ce cœur.

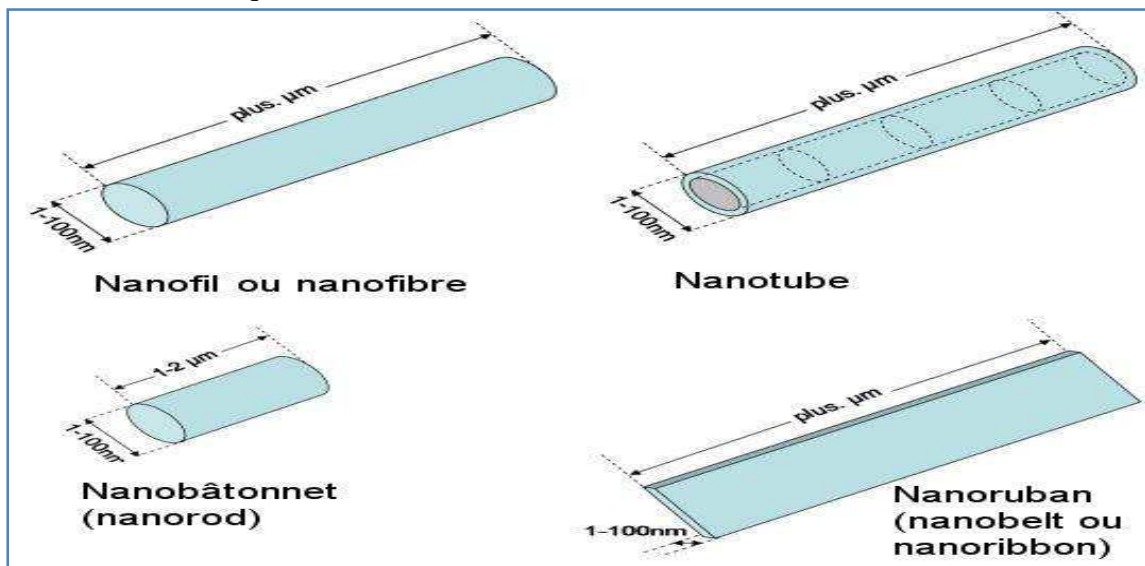


Figure II. 32. Principaux nano-objets 1D : les nano fils, les nanotubes, les nano bâtonnets et les nano rubans [19].

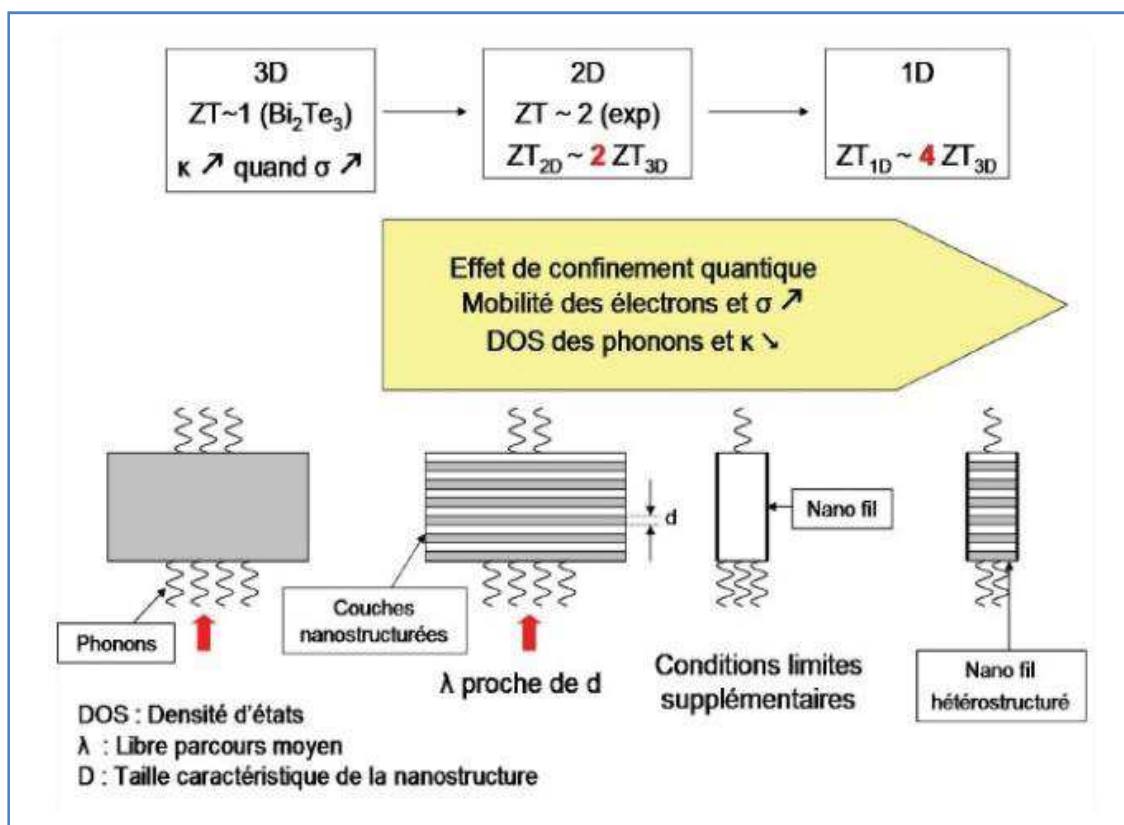


Figure I.33. Evolution théorique et expérimentale de ZT [17].

### 13.3. Intérêt des nano fils

Les premières nanostructures 1D à avoir été synthétisées sont les nanotubes de carbone, découverts par **Iijima** en 1991 [1]. Suite à cette première découverte, les chercheurs se sont intéressés à la synthèse et caractérisation d'autres structures 1D, qui incluent les nano fils, les nano bâtonnets et les nano rubans. Les nano fils inorganiques peuvent jouer le rôle de composants actifs dans les systèmes électroniques, comme l'ont mis en évidence des études récentes [17]. Comme nous l'avons déjà mentionné, les propriétés modulables et hors du commun de ces nanostructures permettent de les intégrer dans des domaines d'applications vastes tels que l'électronique, l'optique, la thermo électricité, le photovoltaïque, la biologie, la chimie, la mécanique, etc. Nous nous intéressons plus particulièrement aux applications en micro sources d'énergie, en thermoélectricité et en photovoltaïque, ainsi qu'aux applications en électronique.

## 14. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les bases indispensables à la compréhension du sujet. Nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire, et son application dans le domaine photovoltaïque. Nous avons ensuite expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales ainsi que les paramètres limitant leur rendement. Puis nous avons abordé les différentes technologies réduisant les pertes optiques et enfin la technique de fabrication de la cellule photovoltaïque en silicium.

Dans le chapitre suivant, on va traiter le contexte actuel des recherches dans le domaine des nano fils de silicium. Celles abordées sont les nanostructures unidimensionnelles existantes.