

**II.1 Introduction :**

Depuis l'antiquité le soleil été une source majeure d'énergie sur la surface de la terre, et son utilisation s'est développée avec le développement de la science et de la technologie, l'homme l'utilisait pour le chauffage et le séchage, et pour chauffer l'eau selon le principe de conversion "rayonnement - chaleur" en utilisant les détecteurs solaires, puis la production d'énergie électrique, selon le principe de conversion "rayonnement - électronique" par l'utilisation des cellules solaires photovoltaïques.

L'avantage de ces cellules solaires photovoltaïques consiste dans sa simplicité d'installation dans les lieux utilisés. Mais en dépit de ces avantages elles coûtent très cher par rapport à l'énergie électrique conventionnelle. De nombreux laboratoires mènent des recherches dans ce domaine afin d'améliorer le rapport coût-rendement de ces cellules.

Initialement le développement des cellules solaires été pour les applications spatiales, puisqu'elles fournissent l'énergie électrique aux satellites par la conversion photovoltaïques, puis la crise pétrolière (1973) a obligé les pays développés à appliquer la conversion photovoltaïques de l'énergie solaire pour l'utilisation terrestre, certains pays arabes ont suivi cette tendance comme la Tunisie , l'Arabie Saoudite, la Jordanie et l'Egypte...

**II.2 Généralité sur les cellules solaires :**

Les cellules photovoltaïques sont basées 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 par cette force électromotrice peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule [30].

**II.2.1 Principe de l'effet photovoltaïque :**

L'effet photovoltaïque a été découvert en 1839 par Alexandre Edmond Becquerel, qui se demandait pourquoi certains matériaux faisaient des étincelles lorsqu'ils étaient exposés à la lumière, il a pu démontrer qu'il s'agissait d'une conversion directe de la lumière en énergie électrique.

En 1905 Albert Einstein a écrit sur l'effet photovoltaïque en postulant que la lumière pouvait entrer à l'intérieur des atomes, et que la collision entre les photons et les atomes pouvait faire sortir des électrons de leurs orbites permettant la création d'un courant électrique [31].

L'effet photovoltaïque s'appuie principalement sur trois grands principes dont l'action combinée engendre la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique :

- L'absorption de photons.
- La conversion de l'énergie absorbée en charges électriques libres.
- La collecte de ces particules dans un circuit électrique extérieur.

De ce fait, un dispositif photovoltaïque doit être constitué :

- d'un matériau absorbant dans la gamme du spectre solaire et possédant au moins une transition possible entre deux niveaux d'énergie.
- et d'une structure de collecte, de résistance électrique la plus faible que possible.

L'optimisation de ce dispositif passe par une gamme de fréquence absorbante la plus large que possible, couvrant la partie la plus dense du spectre solaire ; ainsi qu'une différence d'énergie entre deux niveaux de transition la plus petite qu'elle soit. Leur structure de bande (interdite et de conduction) fait du semi-conducteur le meilleur compromis pour la réalisation des cellules solaires. On en trouve actuellement en arséniure de gallium (AsGa) pour les applications spatiales, en silicium cristallin (c-Si) pour les applications terrestres et en silicium amorphe hydrogéné (a-Si :H) pour des cellules bas coût.

La conversion de l'énergie est le résultat de l'absorption de photons donnant lieu à la création de paires électron-trou. Un champ électrique permanent, au sein du matériau, assure une séparation rapide de ces porteurs pour éviter des phénomènes de recombinaison. Ce champ peut être généré de plusieurs manières : par la jonction de deux semi-conducteurs de nature et de type différents (hétérojonctions), soit par la barrière de potentiel entre un métal et un semi-conducteur (diodes Schottky), ou encore à l'interface de zones d'un même semi-conducteur dont les concentrations en électrons libres sont différentes (homojonctions ou jonction PN) [32].

### II.2.2 Description de la cellule solaire :

Un cristal semi-conducteur dopé de type P est recouvert d'une zone très mince dopée de type N et d'épaisseur  $e$ . Entre les deux zones se trouve la jonction PN. La zone N est couverte par une grille métallique qui sert de cathode  $k$  tandis qu'une plaque métallique  $a$  recouvre l'autre face du cristal et joue le rôle d'anode. L'épaisseur totale du cristal est de l'ordre du  $\mu\text{m}$ . Un rayon lumineux qui frappe le dispositif peut pénétrer dans le cristal au travers la grille et provoquer l'apparition d'une tension entre la cathode et l'anode [33].

Les photons incidents créent des porteurs dans les régions neutres N, P et dans la région de déplétion.

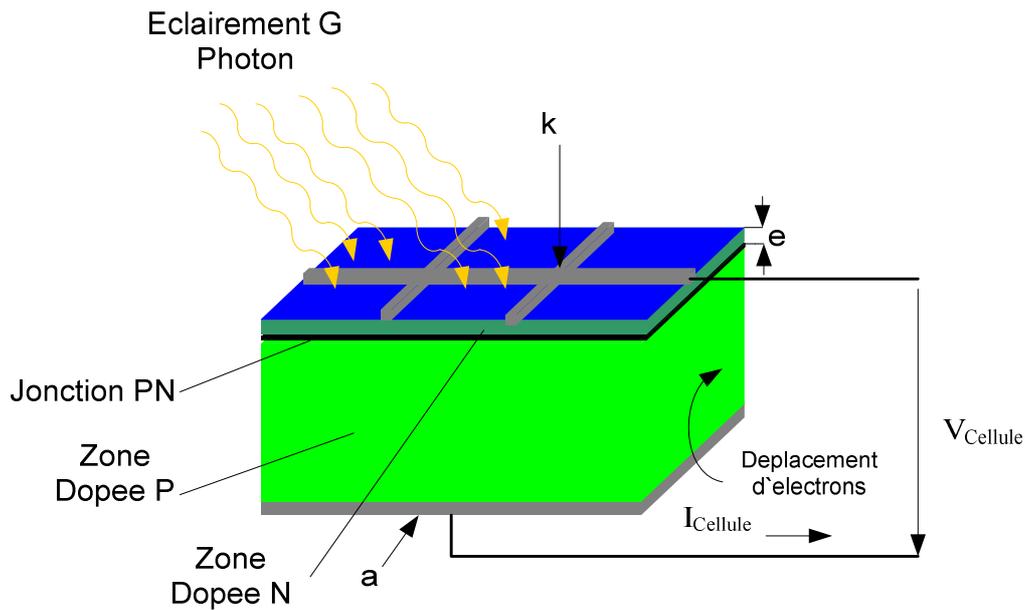


Figure II-1 : Schéma de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [31].

Les photoporteurs auront un comportement différent suivant la région :

- Dans la région N ou P, les porteurs minoritaires qui atteignent la région de déplétion sont "envoyés" par le champ électrique dans la région P (pour les trous) ou dans la région N (pour les électrons) où ils seront majoritaires ; on aura un photocourant de diffusion;
- Dans la région de déplétion, les paires électrons / trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique: les électrons vont aller vers la région N, les trous vers la région P ; on aura un photocourant de génération.

Ces deux contributions s'ajoutent pour donner un photocourant résultant  $I_{ph}$ . C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse [34]. Le courant débité par la cellule solaire est le photocourant diminué du courant direct [35].

$$I = I_{ph} - I_d \tag{II-1}$$

Avec :

$$I_d = I_s \left( \exp\left(\frac{q.V}{kT}\right) - 1 \right) + I_R \tag{II-2}$$

Où :

$q$  : charge élémentaire ( $q = 1.6.10^{-19}$  C).

$k$  : constante de Boltzmann ( $k= 1.38.10^{-23}$  J.K<sup>-1</sup>).

$T$  : température (K°).

$V$  : tension aux bornes de la jonction (Volt).

$I_s$  : le courant de saturation.

$I_R$  : le courant de recombinaison de la région de déplétion.

### **II.2.3 Le rayonnement solaire :**

#### **II.2.3.1 Les émissions du Soleil :**

L'énergie émise par le Soleil l'est d'abord sous la forme de rayonnements électromagnétiques dont l'ensemble forme le rayonnement solaire, qui constitue la seule source externe notable d'énergie pour l'atmosphère. Ce rayonnement solaire se propage à la vitesse de la lumière  $c$  ; il lui faut donc, en moyenne, 499 secondes, soit 8 minutes et 19 secondes, pour atteindre notre atmosphère. La théorie « corpusculaire » de Max Planck prévoit que tout rayonnement de fréquence  $f$  peut être considéré comme un flux de photons dont l'énergie élémentaire est directement proportionnelle à cette fréquence. De ce fait, ce sont les rayonnements de courte longueur d'onde (ou de haute fréquence) qui sont les plus énergétiques [36].

#### **II.2.3.2 Le spectre du rayonnement solaire**

Le spectre solaire est la distribution spectrale du rayonnement solaire en fonction de la longueur d'onde, l'énergie en (eV) de chaque photon est reliée à la longueur d'onde  $\lambda$  [30] par la formule suivante :

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad \text{(II-3)}$$

Où

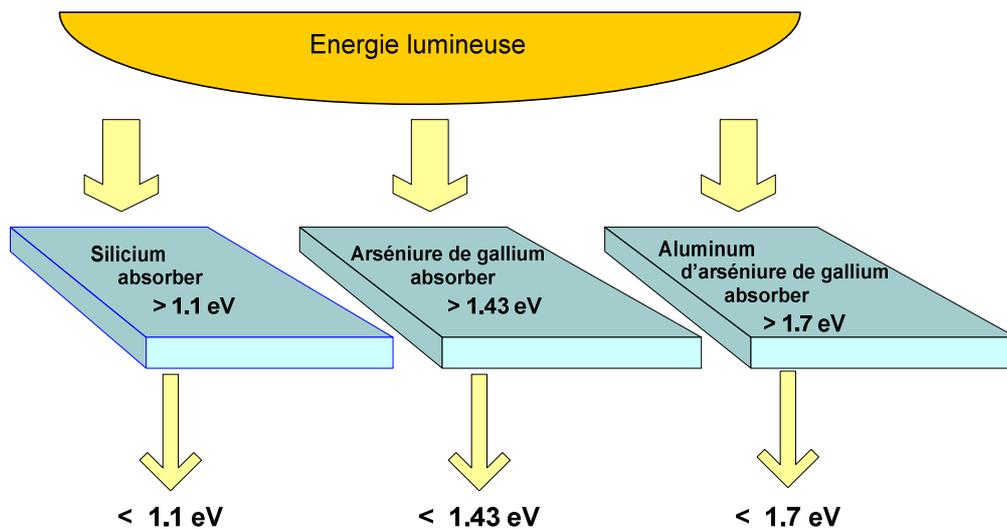
$\lambda$  est la longueur d'onde en micromètres .

$h$  est la constante de Planck . ( $h=6,62 \times 10^{-34}$  J.s) .

$c$  est la vitesse de la lumière . ( $c = 3 \times 10^8$  m.s<sup>-1</sup>) .

Un eV est approximativement égal à  $1.6 \times 10^{-19}$  J d'énergie. Dans le cas de GaAs, la longueur d'onde qui correspond à son gap d'énergie 1.42 eV est  $\sim 0.873 \mu\text{m}$ .

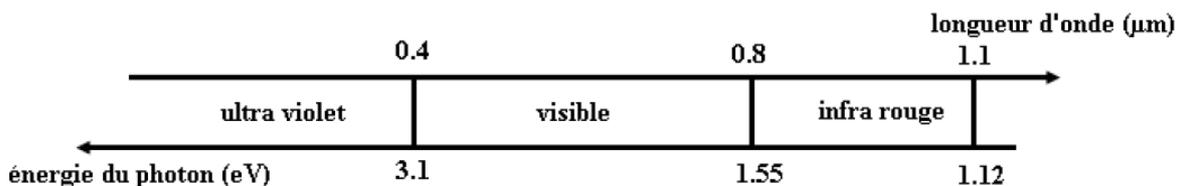
La figure II-2 aide à visualiser le concept de l'absorption lumineuse. Quand la lumière a une énergie supérieure à 1.1 eV, la cellule solaire de silicium cristallin produit de l'électricité. La lumière d'énergie inférieure à 1.1 eV est inutilisée. De même, la lumière avec une valeur d'énergie supérieure à 1.43 eV excite les électrons de l'enveloppe extérieure de la cellule solaire d'arséniure de gallium. Et finalement, la lumière avec une énergie supérieure à 1.7 eV est utile pour le matériel photovoltaïque aluminium d'arséniure de gallium (AlGaAs).



**Figure II-2.** Effet de l'énergie lumineuse sur les différentes bandes interdites [3].

Donc pour qu'il y ait création des paires électrons-trous, il faut que l'énergie transportée par les photons arrivant au dispositif soit supérieure ou égale à la bande interdite du matériau semi-conducteur utilisé ; c'est-à-dire  $E \geq E_g$ .

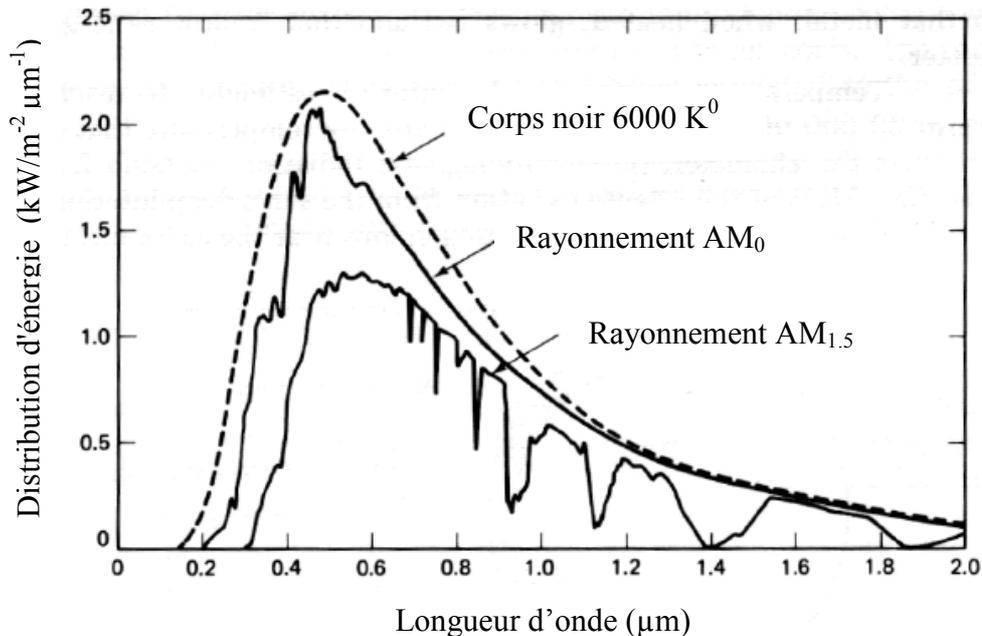
La figure II-3 représente la gamme du rayonnement électromagnétique entourant le spectre visible et les longueurs d'ondes correspondantes.



**Figure II-3 :** Spectre du rayonnement solaire [37].

### II.2.3.3 Masse d'air :

Le spectre du rayonnement électromagnétique solaire comporte une très grande étendue, depuis les rayonnements radio jusqu'aux rayons X. On distingue en général le spectre continu, qui est sensiblement celui d'un corps noir à environ 6000°K et le spectre réel d'émission du soleil [38], représenté sur la figure II-4.



**Figure II-4 :** Le spectre solaire AM<sub>0</sub> et AM<sub>1.5</sub> [39].

L'intensité lumineuse issue du soleil normalement incidente sur la surface de la Terre est appelée la constante solaire. Cette constante est approximativement d'une valeur de 1,4 kW/m<sup>2</sup> au-dessus de la couche atmosphérique et est réduite sur la terre à 1 kW/m<sup>2</sup> par la réflexion et l'absorption des particules présentes dans la couche atmosphérique. Cette perte est appelée la « masse d'air » (AM<sub>x</sub>) [40], qui est le rapport entre l'épaisseur de l'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol et l'épaisseur traversée à la verticale du lieu,

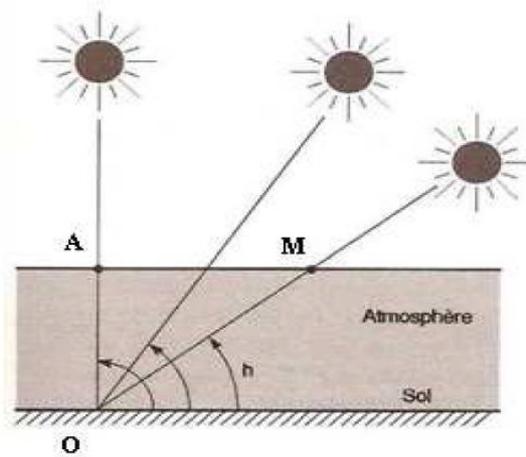


Figure II-5 : Définition de la masse d'air [37].

$$OM = \frac{OA}{\sin h} \quad (\text{II-4})$$

Donc la masse d'air:

$$\frac{OM}{OA} = \frac{1}{\sin h} \quad (\text{II-5})$$

Dans l'expression  $AM_x$ ,  $x$  désigne le rapport  $\frac{OM}{OA}$

La désignation  $AM_0$  correspond à une masse d'air nulle pour la lumière arrivant au-dessus de l'atmosphère terrestre à l'incidence normale.  $AM_1$  correspond à une même lumière (incidence normale) mais arrivant à la surface terrestre. L'appellation  $AM_{1,5}$  désigne la masse d'air rencontrée pour la lumière arrivant à  $48.2^\circ$  sur la surface terrestre [38].

## II.2.4 Grandeurs photovoltaïques de la cellule solaire :

### II.1.4.1 Courant de court circuit :

Le courant de court-circuit (short circuit)  $I_{sc}$  est le courant qui circule à travers la jonction sous illumination sans application de tension. Il s'accroît 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 [38].

### II.2.4.2 Tension de circuit ouvert :

La tension de circuit ouvert (open circuit)  $V_{oc}$  est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul.

Elle dépend de la barrière d'énergie, et décroît avec la température et change peu avec l'intensité lumineuse [30]. La tension en circuit ouvert peut être calculée à partir de :

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_S} + 1 \right) \quad (\text{II-6})$$

#### **II.2.4.3 Facteur de forme :**

Le facteur de forme ( $FF$ ) représente l'efficacité de la cellule et peut également nous renseigner sur le vieillissement de la cellule. C'est le rapport entre la puissance maximale débitée ( $V_{max} \cdot I_{max}$ ) et la puissance idéale ( $V_{oc} \cdot I_{sc}$ ) [41] :

$$FF = \frac{V_{max} I_{max}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (\text{II-7})$$

#### **II.2.4.4 Rendement de conversion énergétique :**

Le rendement de conversion énergétique est le rapport entre la puissance générée et la puissance du rayonnement solaire incident  $P_0$ . On appelle rendement maximal, le rapport entre la puissance maximale et la puissance  $P_0$  [12]:

$$\eta_m = \frac{V_m I_m}{P_0} = FF \frac{V_{oc} I_{sc}}{P_0} \quad (\text{II-8})$$

L'énergie du rayonnement solaire n'est pas totalement transformée en électricité. Une bonne partie du rayonnement est simplement réfléchi sur la surface de la cellule. Une autre partie de l'énergie apportée par la lumière pénètre parfaitement, mais ne sert qu'à augmenter l'agitation thermique (l'échauffement) et donc la température de la cellule.

Les grilles et les barreaux métalliques déposés sur la surface supérieure de la cellule constituent une perte dans le rendement, car elles diminuent la surface de la cellule exposée à la lumière solaire.

La fraction qui compte est celle qui contribue à la création des paires électron-trou dans la jonction ; dans les meilleures conditions du laboratoire, cette fraction est de 23%, c'est donc à peine le quart de la lumière qui est converti en électricité.

Le tableau II-1 représente les grandeurs photovoltaïques mesurées pour certaines cellules solaires de laboratoire à base de GaAs.

Structure	Aire(cm <sup>2</sup> )	V <sub>oc</sub> (V)	I <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)	η (%)	Centre de test
Hétérojonction -PPN	1	1.021	27.8	83.7	23.7	-
GaAs(AlGaAs)	3.91	1.022	28.2	87.1	25.1	NREL <sup>(a)</sup>
GaAs-Couche mince	4	1.011	27.6	83.8	23.3	NREL
PN-GaAs(AlGaAs)	1	1.036	27.5	85.1	24.2	ISE <sup>(b)</sup>
PN-GaAs(AlGaAs)	8	1.038	26.9	83.5	23.4	ISE
PIN-GaAs(AlGaAs)	8	1.038	27.1	82.9	23.3	ISE
GaAs(AlGaAs)	4	1.022	28.2	87.1	25.1	ISE

**Tableau II-1:** Grandeurs photovoltaïques des cellules solaires à base de GaAs [5].

<sup>(a)</sup> National Renewable Energy Laboratory (USA).

<sup>(b)</sup> Fraunhofer Institute for Solar Energy System (Allemagne).

#### II.2.4.5 Réponse spectrale :

La réponse spectrale (*RS*) permet d'évaluer le rendement quantique d'une cellule solaire en fonction de la longueur d'onde de la lumière incidente. Cette mesure consiste à illuminer la cellule solaire avec un spot monochromatique que l'on fait varier dans la plage d'absorption du matériau (entre 350 et 1150 nm pour le silicium cristallin). La mesure du courant débité par la cellule en fonction de la longueur d'onde permet alors de connaître la réponse spectrale de la cellule à l'aide de la relation suivante [33], [42]

$$RS(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{P_{inc}(\lambda)} = \frac{I(\lambda)}{\phi(\lambda) \cdot S} \quad (II-9)$$

Où

$I(\lambda)$  : l'intensité générée.

$P_{inc}(\lambda)$  : la puissance incidente.

$\phi(\lambda)$  : le flux lumineux incident ( $W \cdot m^{-2}$ ).

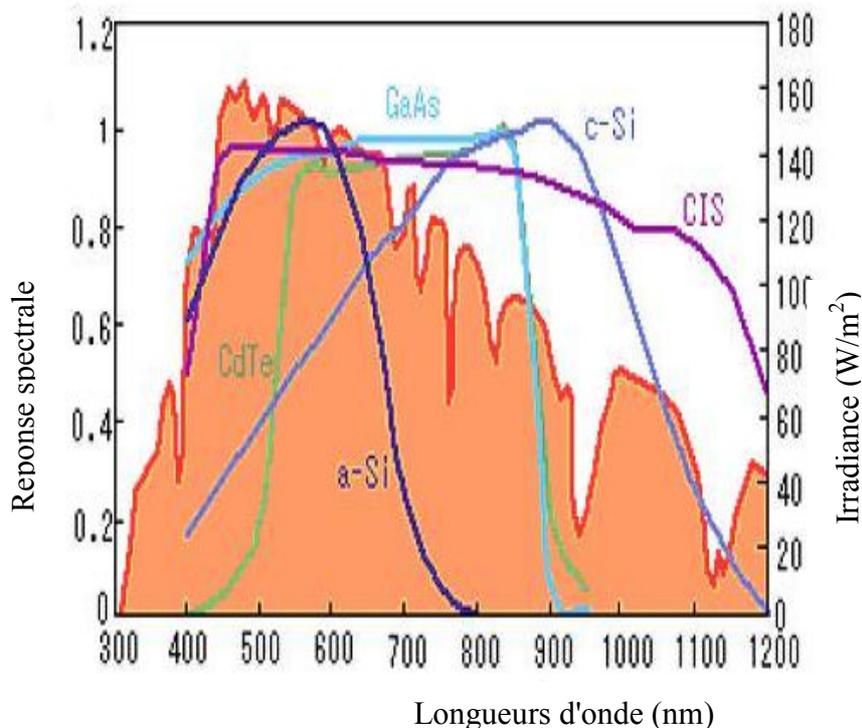
$S$  : la surface de la cellule ( $m^2$ ).

La vitesse de recombinaison a un grand effet sur la réponse spectrale, surtout aux courtes longueurs d'onde. Généralement, pour augmenter la réponse spectrale, on doit augmenter la longueur de diffusion des électrons et trous  $L_n$  et  $L_p$  respectivement, et diminuer la vitesse de recombinaison en surface des électrons et trous  $S_n$  et  $S_p$ , respectivement.

Les cellules solaires absorbent différentes longueurs d'onde selon leurs compositions. Sur la figure (II-6), on a représenté la caractéristique réponse spectrale pour différentes cellules solaires ; cette caractéristique indique la gamme du spectre solaire qu'une cellule peut absorber, identifiant de ce fait ses propriétés. Les cellules constituées d'un semi-conducteur composé, à savoir le GaAs, CdTe et CIS absorbent des longueurs d'onde dans la gamme (500 nm - 900 nm) et sont connues en tant que cellules solaires à rendement élevé.

Les cellules solaires au a-Si :H et au c-Si montrent d'excellente absorption aux longueurs d'onde courtes et longues, respectivement. Les cellules solaires composées de combinaison de ces derniers sont capables de réaliser un rendement plus élevé [5].

La mesure de la réponse spectrale est très sensible aux conditions d'analyse et le résultat est fonction du point de mesure. La comparaison de deux courbes nécessite de cibler exactement la même zone [32].



**Figure II-6** : Caractéristique réponse spectrale pour différentes cellules solaires [5].

Selon la longueur d'onde du rayonnement incident, le courant mesuré sera plus ou moins élevé en fonction du Rendement Quantique Externe (*RQE*) de la cellule. Pour connaître celui-ci, il faut multiplier *RS* par un facteur:

$$RQE(\lambda) = RS(\lambda) \frac{hc}{q\lambda} \quad (\text{II-10})$$

Avec :

*RQE*( $\lambda$ ): Rendement Quantique Externe (%)

*RS*( $\lambda$ ): Réponse spectrale ( $A \cdot W^{-1}$ )

*h*: Constante de Planck ( $kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$ )

*c*: Vitesse de la lumière dans le vide ( $m \cdot s^{-1}$ )

*q* : Charge élémentaire (C)

$\lambda$  : Longueur d'onde (m)

Pour étudier les mécanismes internes de la cellule, il est nécessaire de prendre en considération uniquement les photons absorbés dans le dispositif. On sépare alors du calcul de rendement quantique les photons réfléchis ou transmis, ainsi que ceux absorbés dans les couches non actives comme la couche anti-reflet. Le Rendement Quantique Interne (*RQI*) donne ainsi le pourcentage d'électrons participant du photocourant par rapport au nombre de photons qui ont été réellement absorbés dans la cellule :

$$RQI(\lambda) = \frac{RQE(\lambda)}{1 - R(\lambda) - A(\lambda) - T(\lambda)} \quad (\text{II-11})$$

Avec :

*RQI*( $\lambda$ ): Rendement Quantique Interne (%)

*RQE*( $\lambda$ ): Rendement Quantique Externe (%)

*R*( $\lambda$ ) : Réflectivité de la cellule (%)

*A*( $\lambda$ ) : Absorption dans les couches non actives (%)

*T*( $\lambda$ ) : fraction du rayonnement transmis à travers la cellule (%)

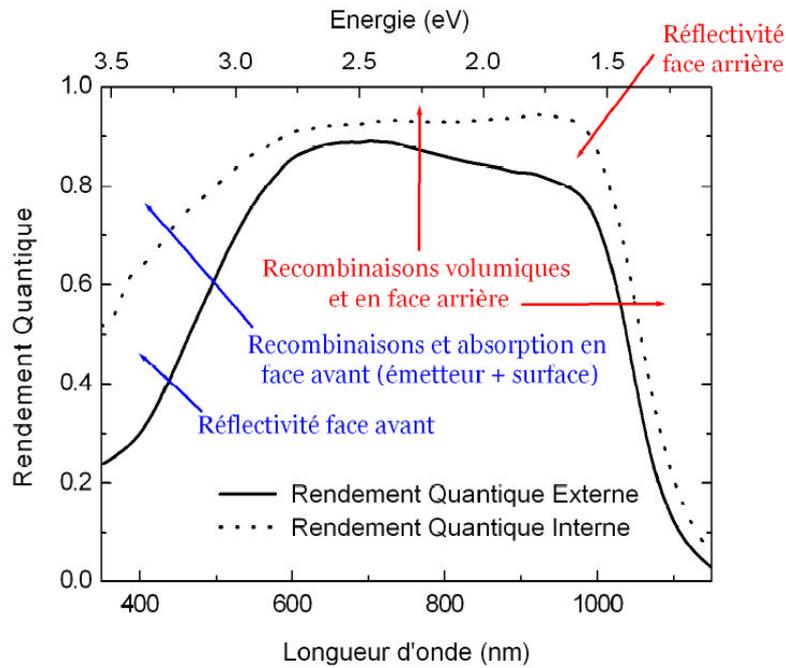


Figure II-7: Exemple de Rendement Quantique Externe et Interne d'une cellule solaire [43].

On considère généralement que les courtes longueurs d'ondes (Ultra-violet) sont absorbées majoritairement dans les premiers  $\mu\text{m}$  de la cellule, alors que les grandes longueurs d'ondes (Infrarouge) peuvent être absorbées au niveau de la face arrière. L'étude du *RQI* aux courtes longueurs d'ondes donne donc des indications sur la qualité de la face avant, tandis que celle aux grandes longueurs d'ondes concerne plus la face arrière (voir la figure II-7) [33].

### II.2.5 Schéma équivalent et caractéristique courant-tension de la cellule solaire:

Pour tenir en compte les limitations de la cellule et de même calculer le courant réellement délivré sur la charge du circuit extérieur, on introduit un modèle comprenant une résistance série et une résistance parallèle [42]. Ce modèle est représenté par le schéma électrique suivant (Figure II-8) :

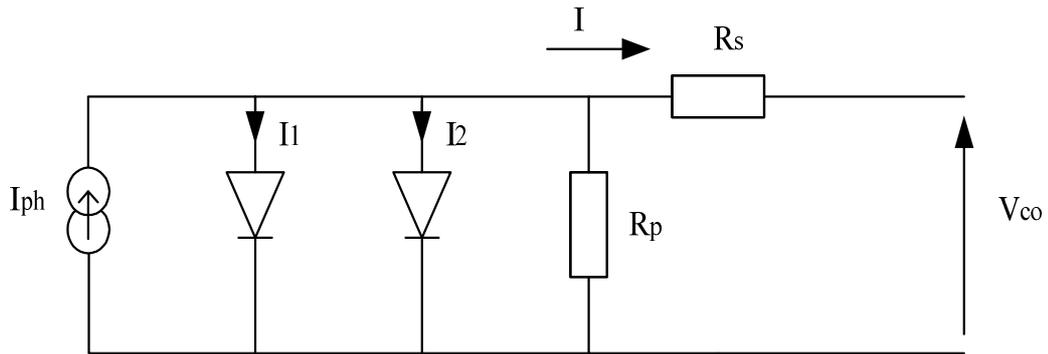


Figure II-8 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque [33].

Les différents paramètres de ce modèle sont [37] :

- a. **Le générateur de courant** : il délivre le courant  $I_{ph}$  correspondant au courant photogénéré.
- b. **La résistance série  $R_s$**  : elle prend en compte la résistivité propre aux contacts entre les différentes régions constitutives de la cellule, et doit être la plus faible que possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule.
- c. **La résistance parallèle  $R_p$**  : connue sous le nom de court circuit, elle peut être due à un court circuit sur les bords de la cellule. On l'appelle aussi résistance de fuite.
- d. **La diode** : modélise la diffusion des porteurs dans la base de l'émetteur.

L'équation du courant devient :

$$I = I_1 + I_2 + \frac{V - IR_s}{R_p} - I_{ph} \tag{II-12}$$

$$I = I_{01} \left( \exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{n_1 kT}\right) - 1 \right) + I_{02} \left( \exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{n_2 kT}\right) - 1 \right) + \frac{V - IR_s}{R_p} - I_{ph}$$

avec :

$I_{01}$ : courant de saturation de la diode D1,  $I_{02}$  : courant de saturation de la diode D2,

$q$  : charge élémentaire,

$k$  : constante de Boltzmann,

$T$  : température,

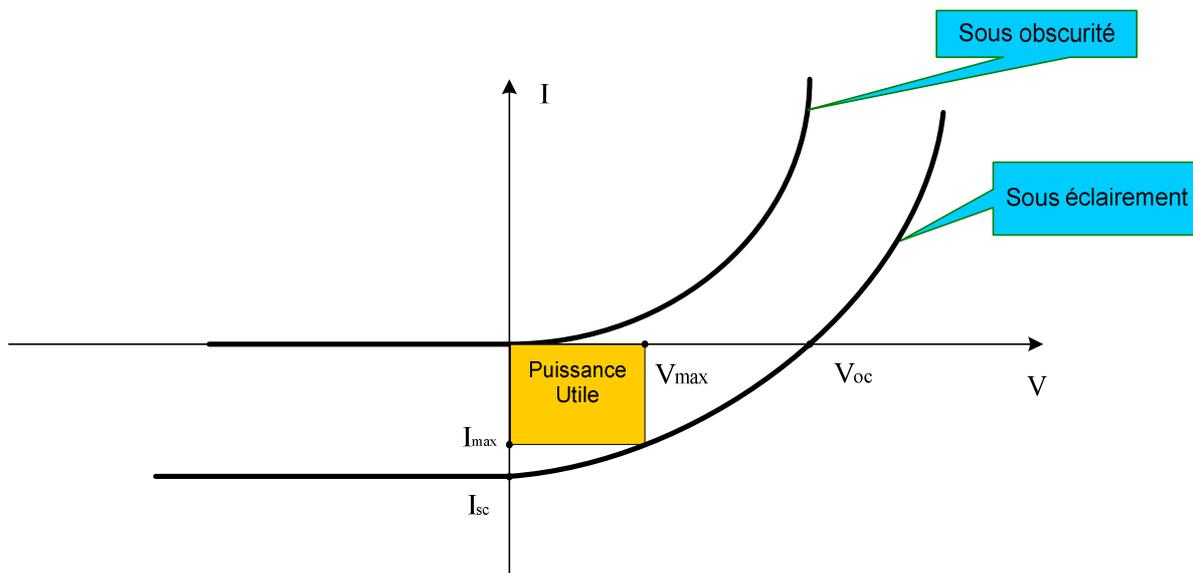
$n_1$  et  $n_2$  : coefficients d'idéalité des diodes D1 et D2.

Pour une cellule photovoltaïque idéale, l'équation (II-13) peut être réécrite plus simplement sous la forme suivante

$$I(V) = I_s \left( \exp\left(\frac{qV}{n_i kT}\right) - 1 \right) - I_{ph} \quad (\text{II-13})$$

La mesure de la caractéristique courant – tension ( $I-V$ ) à l'obscurité est également utile pour analyser le fonctionnement d'une cellule solaire, cette caractéristique à l'obscurité est identique à celle d'une diode.

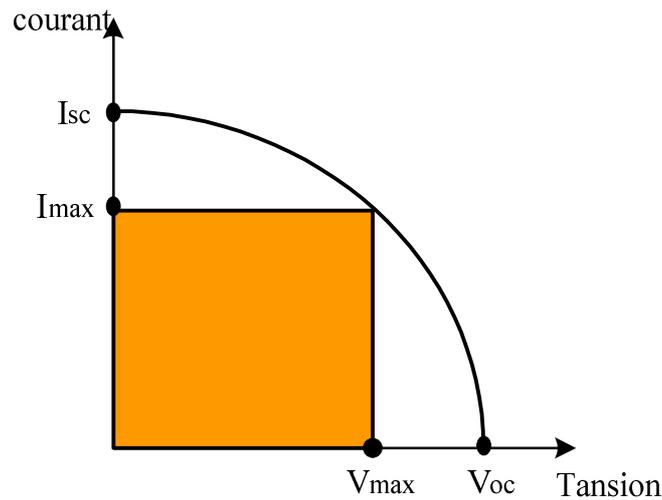
La caractéristique ( $I-V$ ) d'une cellule solaire sous éclairage ou à l'obscurité est présentée dans la figure II-9.



**Figure II-9 :** Caractéristique ( $I-V$ ) d'une cellule solaire [33]

Les grandeurs caractéristiques de la cellule peuvent être extraites depuis ce graphe :

- \* Le courant de court circuit  $I_{sc}$ .
- \* La tension de circuit ouvert  $V_{oc}$ .
- \* Le courant  $I_{max}$  et la tension  $V_{max}$  tels que le produit des deux soit maximal déterminant ainsi la puissance maximale ou utile fournie par la cellule (figures II-9, II-10).



**Figure II-10 :** Puissance maximale sur la caractéristique ( $I-V$ ) [37].

### II.3 Cellules solaires à hétérojonctions (AlGaAs/GaAs) :

Les rendements les plus élevés en utilisant tous les matériaux ont été obtenus avec des cellules solaires à base de GaAs et de ses solutions solides. L'arséniure de gallium a la largeur de bande interdite optimale pour une cellule solaire à jonction unique, un coefficient d'absorption élevé, et la plus grande efficacité théorique (environ 39% pour les cellules à jonction unique de moins de 1000 suns). Il peut également être utilisé sous forme d'alliage avec d'autres matériaux tels que AlGaAs et InGaAs [2].

Lorsque deux matériaux, Métal - Semi-conducteur, semi-conducteur- semi-conducteur ou métal-isolant-semi-conducteur, sont en contact, il s'établit un échange de charges pour que le système trouve un équilibre thermodynamique.

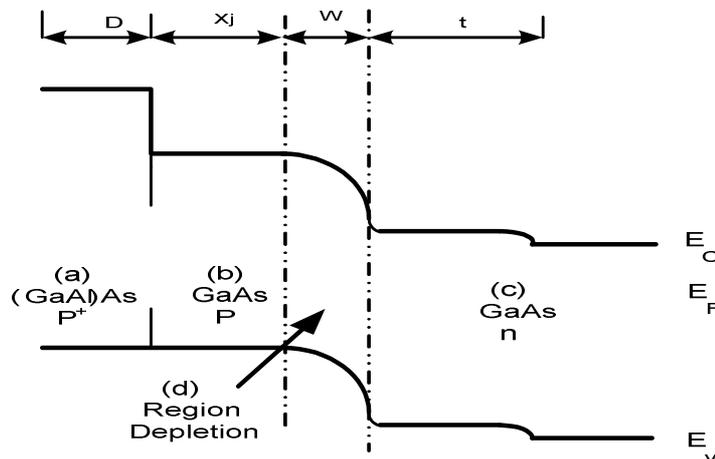
Dans les cellules solaires conventionnelles à homojonction PN, l'émetteur est formé par la zone fortement dopée, alors que dans les cellules solaires à hétérojonction cet émetteur est remplacé par le matériau à large bande interdite. Cependant, le problème de recombinaison en surface rencontré dans la cellule photovoltaïque à homojonction est remplacé par le problème des recombinaisons au niveau de l'interface. Il est à signaler que le taux de recombinaison au niveau de l'interface est considérablement inférieur au taux de recombinaison au niveau de la surface. Cette comparaison est valable dans le cas où le matériau à large bande interdite est passif, c'est-à-dire, présente une faible absorption et une recombinaison nulle [44]

Le GaAs est le semi-conducteur monocristallin le plus utilisé, ou souvent, les solutions solides (Al,Ga)As. C'est le matériau le plus performant du point de vue rendement de conversion, bien que sa densité soit 203 fois supérieure à celle du silicium [30].

Les cellules solaires à base de l'arséniure de gallium sont largement utilisées, plus particulièrement aux applications spatiales, et ceci à cause de leur rendement élevé et leur faible dégradation face aux irradiations spatiales. Ce pendant, un problème important s'opposait au développement des cellules solaires au GaAs, à savoir celui de la vitesse de recombinaison en surface. C'est la raison pour laquelle le rendement réalisé pour les premières cellules solaires était seulement de l'ordre de 10%. Ce problème a été résolu partiellement grâce à la croissance d'une couche de  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  sur la surface du GaAs. Les deux matériaux ayant des paramètres cristallins voisins, peu de défauts et de centres de recombinaison pouvant exister à l'interface entre les deux semi-conducteurs. C'est ainsi que le rendement des cellules au GaAs a dépassé la première fois 20% [45].

La cellule supérieure étant une hétérostructure  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ . L'état graduel de la bande interdite de la couche AlGaAs résulte en un champ interne qui réduit les pertes par recombinaison à la surface et en volume [46].

Il a été découvert que l'interface AlGaAs/GaAs est caractérisée par une faible densité de défauts étendus en raison des mêmes paramètres de réseau à la température de croissance des couches épitaxiales. Celle-ci a fournie dans les cellules solaires basées sur des structures AlGaAs/GaAs une faible vitesse de recombinaison surfacique ( $S$ ) et deux côtés porteurs de collecte avec un rendement élevé  $\eta = 25\text{-}27\%$ .

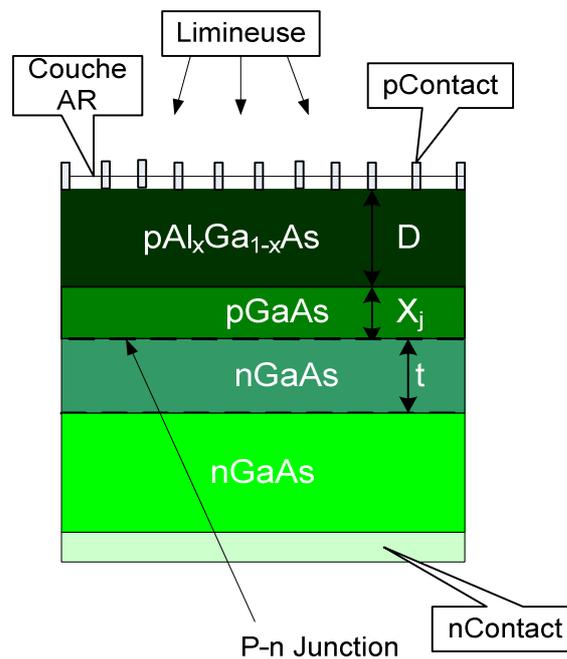


**Figure II-11:** Diagramme de bande d'énergie d'une cellule solaire à hétérojonction AlGaAs/GaAs [47].

Le diagramme de bande d'énergie typique à une cellule solaire à hétérojonction AlGaAs/GaAs est présenté dans la figure II-11 pour une structure ( $\text{p}^+$ -AlGaAs / p- GaAs / n- GaAs).

Les principaux éléments dans la cellule sont :

- un contact ohmique supérieur (grille métallique) en: Ni-Al , Ag-Al
- un oxyde transparent conducteur (OTC) : ZnO, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>
- une couche absorbante
- Un substrat : le plus utilisé est le verre sodé ; on peut aussi utiliser des substrats flexibles (type Upolex) ou métalliques. A ceci est parfois ajoutée une couche anti-reflet (MgF<sub>2</sub>). Ces matériaux ne sont pas choisis au hasard et doivent posséder des propriétés physico-chimiques particulières [33].



**Figure II-12.** Exemple de structure d'une cellule solaire à hétérojonction AlGaAs/GaAs [47].

Les laboratoires HRL (Hughes Research Laboratories) ont reproduit l'une des meilleures images réalisés à ce jour pour la caractéristique  $I-V$  d'une cellule solaire (AlGaAs / GaAs) de surface ( $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ ) sous l'illumination  $AM_0$  en l'absence de concentration solaire (voir figure II-13).

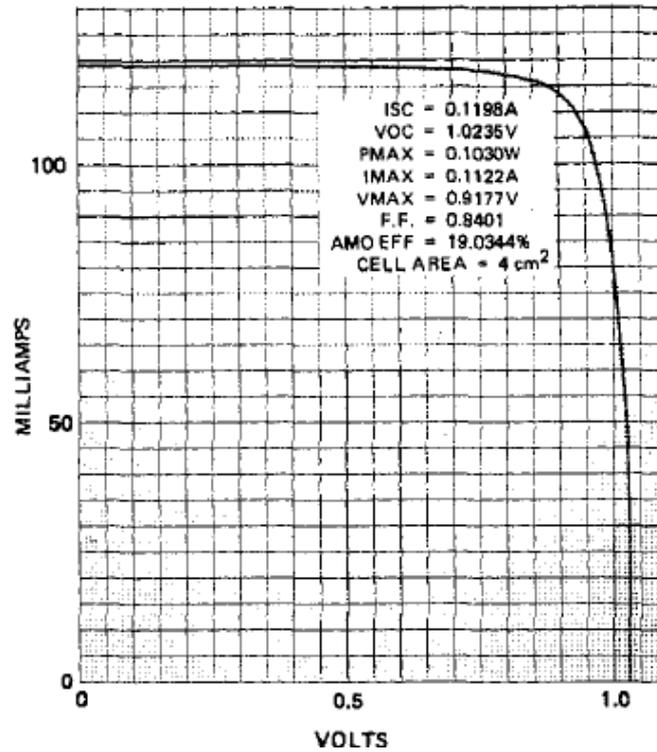


Figure II-13 : Caractéristique  $I$ - $V$  mesurée pour une cellule solaire AlGaAs / GaAs [47]

#### II.4 Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principaux concepts et relations liés à l'étude des caractéristiques électriques des cellules solaires. A la fin nous avons concentré sur la spécificité des cellules solaires à hétérojonction AlGaAs/GaAs par rapport aux cellules solaires conventionnelles (homojonctions); notamment dans le rendement de conversion élevé, la faible dégradation face aux irradiations spatiales et la réduction des recombinaisons au niveau de l'interface AlGaAs/GaAs.