

Contact entre deux matériaux

□ Il y a différents types de contacts: homo-jonction, hétérojonction, contact métal-semi-conducteur, structure MIS (métal-isolant-semi-conducteur).

□ Les matériaux étant isolés les uns des autres, le niveau de Fermi est horizontal dans chacun d'eux mais ne constitue pas une référence commune. Ces niveaux de Fermi n'ont à priori aucune relation entre eux.

En fait, si les matériaux sont électriquement neutres, l'énergie potentielle d'un électron dans le vide c'est-à-dire à l'extérieur des matériaux, est la même quelle que soit sa position par rapport aux matériaux .

En d'autres termes, si nous appelons NV (Niveau du Vide) l'énergie potentielle d'un électron dans le vide au voisinage des différents matériaux, NV est la même pour tous les matériaux et peut servir de référence.

□ Quand le matériau comporte des zones chargées (zones de charge d'espace), elles peuvent modifier le niveau du vide à proximité. Cela explique que le niveau du vide peut varier dans l'espace.

En outre, pour chacun des matériaux l'énergie potentielle d'un électron dans le vide au voisinage du matériau est située à $e\phi$ (travail de sortie) au-dessus du niveau de Fermi. On peut donc, positionner les différents niveaux de Fermi les uns par rapport aux autres.

1

Ainsi donc, à l'équilibre thermodynamique nous disposerons de deux références énergétiques :

- ❖ Avant association, le niveau du vide NV est horizontal, les niveaux de Fermi EF horizontaux dans chaque matériau, se distribuent suivant les travaux de sortie de chacun.
- ❖ Après association, le niveau de Fermi EF est horizontal dans toute la structure, les niveaux du vide V_j se distribuent en fonction des travaux de sortie. Notons que dans chacun des matériaux V_j ne sera pas forcément horizontal car le travail de sortie évoluera selon la redistribution électronique, notamment au voisinage des interfaces.

2

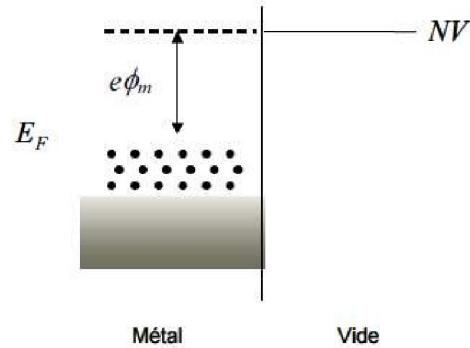
1. Travail de sortie d'un métal:

Pour extraire un électron d'un métal, il faut lui fournir de l'énergie.

Au zéro degré absolu, tous les électrons libres étant situés au-dessous du niveau de Fermi.

L'énergie minimale qu'il faut fournir pour extraire un électron du métal est l'énergie nécessaire à l'extraction d'un électron du niveau de Fermi. Cette quantité est appelée Travail de sortie du métal, on l'appellera $e\Phi_m$, elle est caractéristique du métal. Le tableau suivant donne le travail de sortie de certains métaux utilisés en électronique ou en optoélectronique.

	Travail de sortie $e\Phi_m$ (eV)
Li	2,3
Na	2,3
K	2,2
Rb	2,2
Cs	1,8
Fe	4,4
Ni	4,5
Al	4,1
Cu	4,4
Ag	4,3
Au	4,8
Pt	5,3



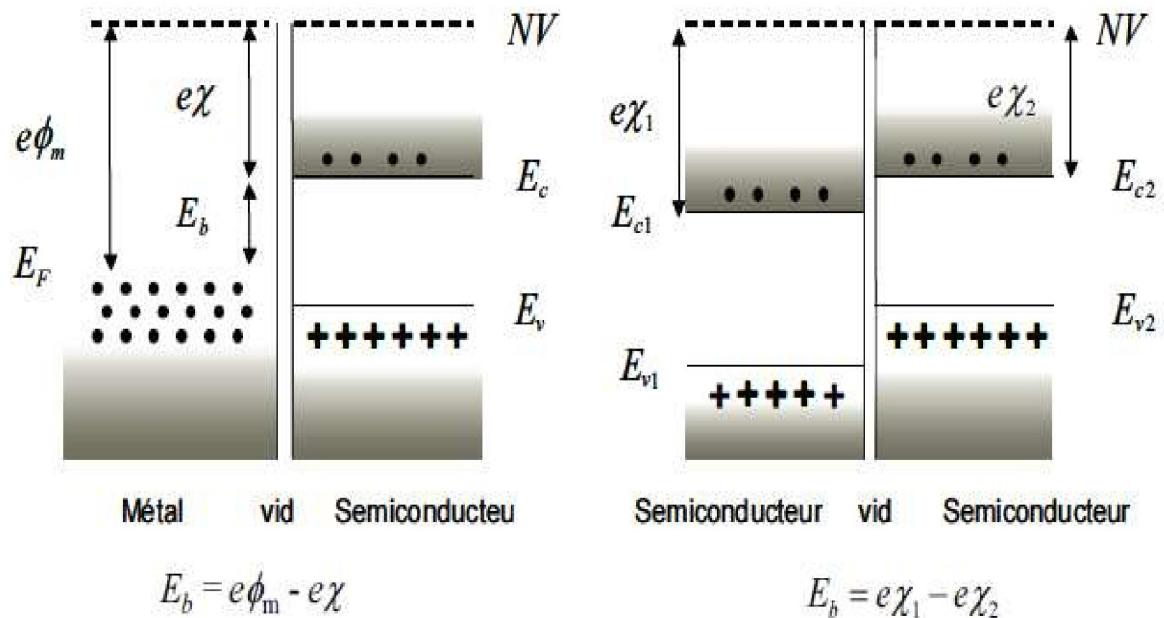
3

2. Affinité électronique :

- Pour un semi-conducteur ou un isolant, le travail de sortie est défini de la même manière. Cependant, si le travail de sortie est un paramètre spécifique d'un métal, il n'en est pas de même pour un semi-conducteur en raison du fait que le niveau de Fermi de ce dernier est essentiellement fluctuant en fonction du dopage.
- On caractérise alors le semi-conducteur par un autre paramètre qui est l'énergie qu'il faut fournir à un électron situé au bas de la bande de conduction, pour l'extraire du semi-conducteur et l'amener dans le vide sans vitesse initiale, c'est l'affinité électronique, on l'appellera $e\chi$.
De même, pour un isolant.

Si	4,01
Ge	4,13
AlP	3,44
AlAs	3,5
AlSb	3,6
GaP	4,3
GaAs	4,07
GaSb	4,06
InP	4,38
InAs	4,90
ZnS	3,9
ZnSe	4,09
ZnTe	3,5
CdTe	4,28

4



5

Chapitre V: Exemples des dispositifs

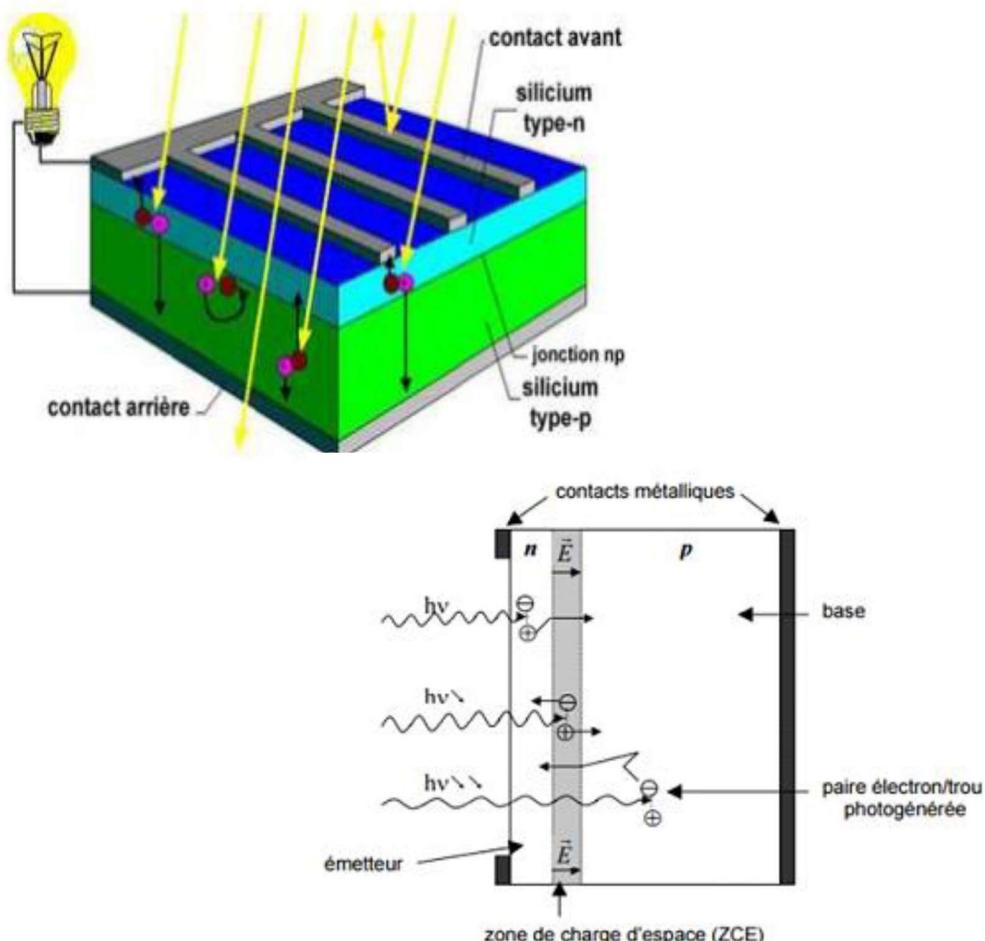
6

La cellule solaire ou photopile:

1. Principe et fonctionnement

- L'effet photovoltaïque a été découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839. L'effet photovoltaïque est obtenu par absorption des photons dans un matériau semi-conducteur qui génère alors une tension électrique. Les cellules photovoltaïques produisent du courant continu à partir du rayonnement solaire, qui peut être utilisé pour alimenter un appareil ou recharger une batterie.
- Une photopile (cellule solaire) est un dispositif à base de matériaux semi-conducteur, elle transforme l'énergie lumineuse (photons) en énergie électrique. Ce dispositif est une jonction PN ayant une surface importante lui permettant de collecter un flux important de rayons lumineux. La surface éclairée de la cellule s'appelle la face avant ou émetteur, la face non éclairée s'appelle face arrière ou base de la cellule.
- Afin de collecter les charges électriques créées par les photons (photo-génération) avec une bonne efficacité les contacts avant sont ohmiques et ont une forme de grille appelée grille de contact. La surface arrière est recouverte de métal qui assure un contact ohmique arrière avec la base.

7



8

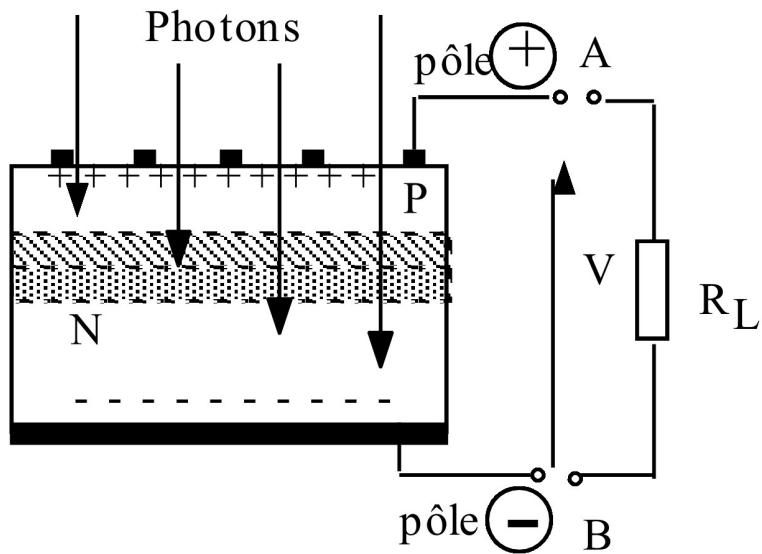
2. Principe de fonctionnement.

Photogénération: Lorsqu'un photon d'énergie $h\nu \geq Eg$ (gap du semi-conducteur) est absorbé par le matériau constituant la cellule il peut briser une liaison de valence et libérer une paire d'électron-trou qui va contribuer à la conduction de l'électricité.

Rendement de conversion: Ce processus de photo-génération de porteurs mobiles présente un rendement de conversion η_q inférieur à 1 ce qui revient à dire que seulement une partie des photons absorbés peuvent libérer des électrons-trous. η_q est appelé rendement quantique du processus.

Photons réfléchis : Si pendant une durée Δt donnée, un certain nombre N de photons tombent sur la surface avant de la cellule, une partie de ces photons est réfléchie car le matériau constituant la cellule présente un coefficient de réflexion R . Le nombre de photons réfléchis est $N_R = R.N$, et le nombre de photons transmis à l'intérieur de la cellule est $N_T = N(1-R)$.

9



Considérons un photon absorbé dans la zone P, il photo-libère un électron (minoritaire) et un trou (majoritaire). Le trou majoritaire reste dans la zone P et fait augmenter la densité p dans la zone P. Pour l'électron minoritaire s'il est créé en un point M se trouvant à une distance L_n (longueur de diffusion) de la zone de charge d'espace, cet électron peut diffuser du point M jusqu'à la zone de déplétion, il peut donc être collecté par le champ électrique E_i et rejoindre la zone N.

Il en résulte alors une augmentation des majoritaire de la zone N ; il y va de même pour un photon absorbé dans la zone N.

10

Excès des densités des porteurs:

La cellule sous éclairement voit donc les densités des majoritaires augmenter soit $n = n_0 + \Delta n$ et $p = p_0 + \Delta p$. n_0 et p_0 sont respectivement les densités des porteurs libres à l'équilibre (en l'absence de lumière) dans les zones N et P. Δn et Δp sont les densités des porteurs en excès (photogénérés)

Polarisation photo-induite:

Ces excès des majoritaires engendrent un stockage des charges (+) et (-) sur les faces des zones P et N respectivement. La cellule sous éclairement se comporte comme une pile électrique et de ce fait elle s'auto polarise en direct. Cette polarisation est induite par la lumière. Si on empêche les photons d'atteindre la cellule cette polarisation photo-induite disparaît.

Tension de circuit ouvert V_{co}:

la tension en circuit ouvert (à vide) qui apparaît entre les bornes de la photopile sous éclairement s'appelle tension de circuit ouvert V_{co}.

Courant de court-circuit:

Si on court-circuite les bornes A et B de cette cellule sous éclairement un courant de court-circuit I_{cc} traverse la cellule. Ce courant correspond à l'évacuation des charges supplémentaires D_p et D_n stockées dans les zones P et N respectivement.

Point de fonctionnement (I,V) d'une cellule chargée:

Si on branche entre les bornes de sortie A et B de la cellule une charge R_L (figure 21) un courant I < I_{cc} traverse l'ensemble cellule-charge et une tension V < V_{co} se développe aux bornes de l'ensemble.

11

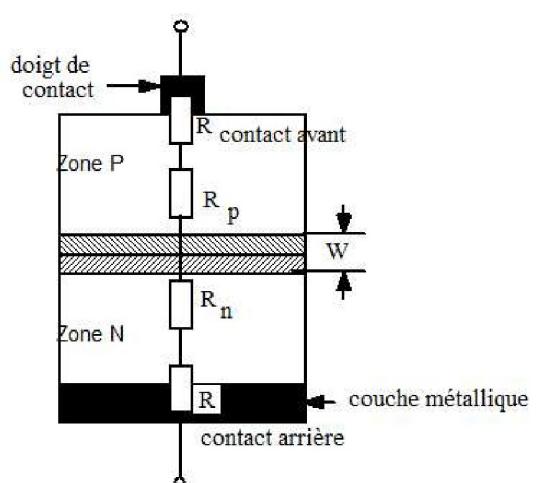
3. Schéma équivalent d'une cellule solaire en régime statique.

le courant débité par la photopile est limité par les résistances séries internes de la photopile. En effet les régions N et P présentent des résistivités respectives ρ_n et ρ_p et donc des résistances, auxquelles il faut ajouter les résistances de contact métal-semi-conducteur arrière et avant soit R_{c_{av}} et R_{c_{ar}}.

L'expression de la résistance série s'écrit donc :

$$R_s = R_p + R_n + R_{c_{av}} + R_{c_{ar}}$$

D'un autre côté des fuites de courant ont lieu sur les bords de la cellule. Leur effet est représenté par une résistance de Shunt R_{sh}



Résistances série d'une jonction PN

12

Le schéma équivalent d'une cellule solaire à l'obscurité:

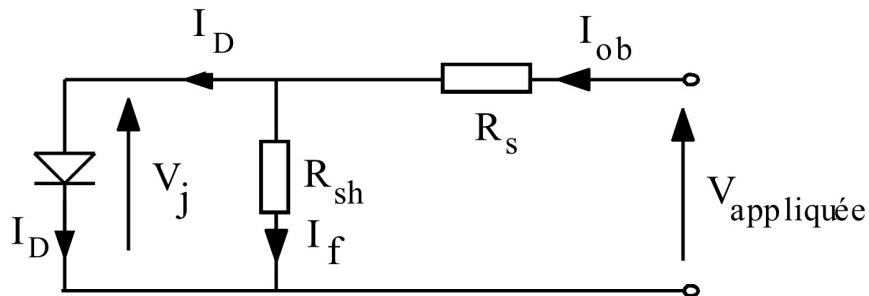


Schéma équivalent d'une jonction PN à l'obscurité

D'après la figure, la tension appliquée est $V_{app} = V_j + R_s I_{ob}$

et le courant d'obscurité est : $I_{ob} = I_D + V_j / R_{sh}$

Le courant $I_{écl}$ est d'après la figure 23-b : $I_{écl}(V) = I_{ph} - I_D - I_f$ où I_D est le courant d'obscurité de la jonction PN idéale, polarisée avec une tension extérieure V_j .

I_f = courant de fuite à travers R_{sh}

13

Le schéma équivalent d'une cellule solaire sous éclairement:

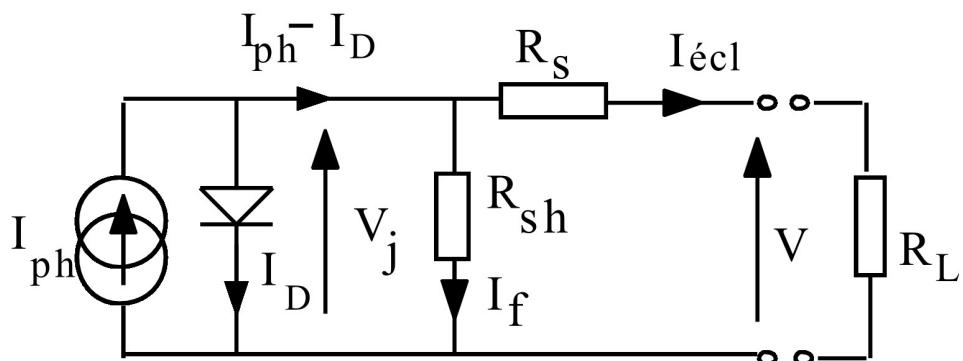


Schéma équivalent d'une cellule solaire (jonction PN) sous éclairement

I_{ph} est le photocourant

V_j : tension aux bornes de la jonction

R_L : résistance de charge

Le courant $I_{écl}$ est d'après la figure: $I_{écl}(V) = I_{ph} - I_D - I_f$ où I_D est le courant d'obscurité de la jonction PN idéale, polarisée avec une tension extérieure V_j .

I_f = courant de fuite à travers R_{sh}

14

4. Caractéristique réelle $I(V)$ d'une photopile:

Il est évident qu'une cellule **idéale** doit avoir une résistance série nulle ($R_s = 0$) et une résistance shunt infinie ($R_{sh} \rightarrow \infty$). Le courant d'obscurité est donné par :

$$I_{ob} = I_s (\exp eV/nkT - 1) + V_j/R_{sh} \quad \text{avec } V_j = V - R_s I_{ob}$$

avec I_s : courant de saturation de la jonction PN.

Facteur d'idéalité 'n':

est le facteur d'idéalité, il prend des valeurs entre 1 et 2 ($1 < n < 2$). En effet : le courant à travers une jonction est la résultante de deux processus :

- processus de diffusion qui donne lieu à un courant de diffusion :

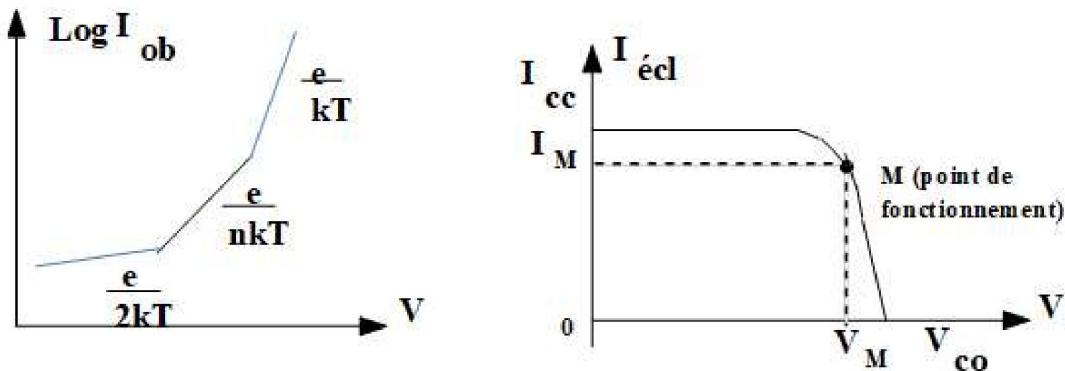
$$I_d = I_{s,d} (\exp eV/kT - 1)$$

- processus de génération recombinaison dans la zone de charge d'espace qui donne lieu à un courant de génération recombinaison :

$$I_{gr} = I_{s,gr} (\exp eV/2kT - 1)$$

et $I_{ob} = I_d + I_{gr} = I_s (\exp eV/nkT - 1)$

15



Les tracés des caractéristiques $I_{écl}(V)$ et $\log(I_{ob}) = f(V)$ d'une cellule réelle

Lorsqu'on branche une charge aux bornes A et B de la photopile le point de fonctionnement du circuit sera : $M(V,I)$. La charge reçoit de la part de la cellule une puissance $P = VI$.

16

Facteur de forme :

FF (facteur de remplissage).

Il est défini par :

$$FF = \frac{IV}{I_{cc} V_{co}}$$

Rendement d'une cellule solaire :

Il est défini par :

$$\eta = \frac{IV}{P_L S} = \frac{\text{Puissance fournie par la cellule}}{\text{Puissance lumineuse reçue à la surface de la cellule}}$$

avec : P_L : Puissance lumineuse par unité de surface (W/m^2).

S : surface éclairée de la cellule.

17

Facteur de forme :

FF (facteur de remplissage). Il est défini par :

$$FF = \frac{I \cdot V}{I_{CC} \cdot V_{CO}} \quad |$$

Rendement d'une cellule solaire :

Il est défini par :

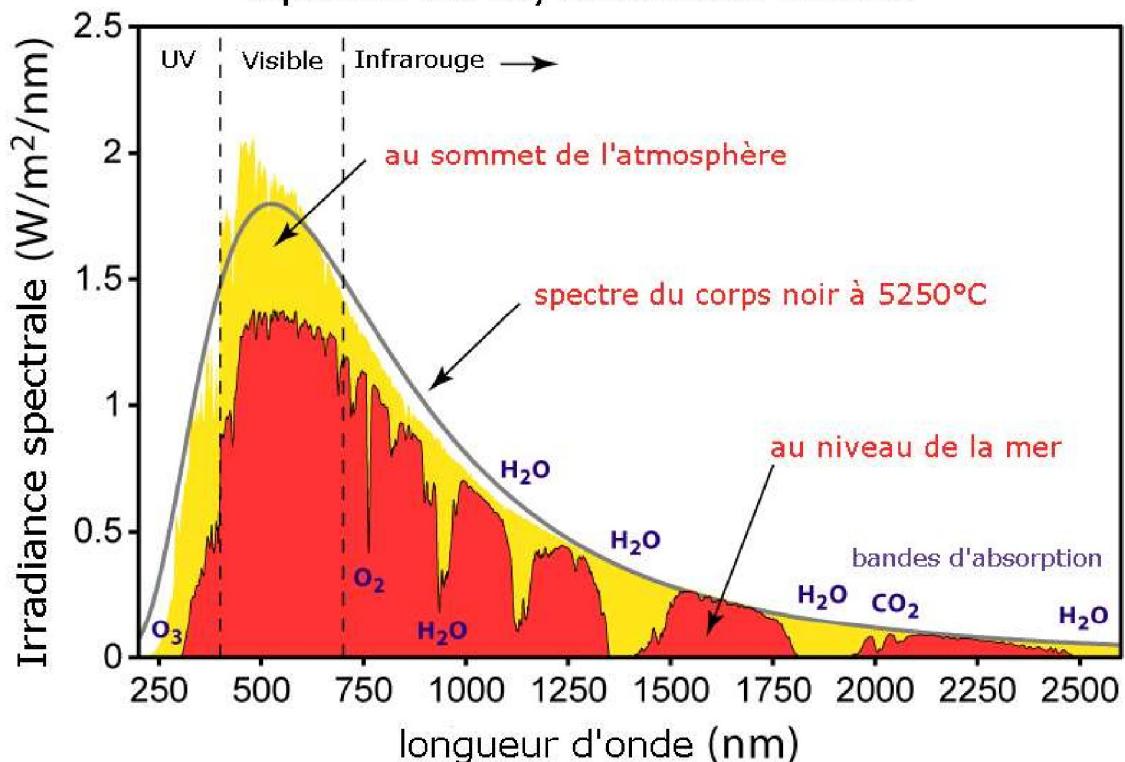
$$\eta = \frac{I \cdot V}{P_L \cdot S} \quad \eta = \frac{I \cdot V}{P_L \cdot S} = \frac{\text{Puissance développée par la cellule}}{\text{Puissance lumineuse reçue par la surface de la cellule}}$$

avec : P_L : Puissance lumineuse par unité de surface (W/m^2).

S : surface éclairée de la cellule.

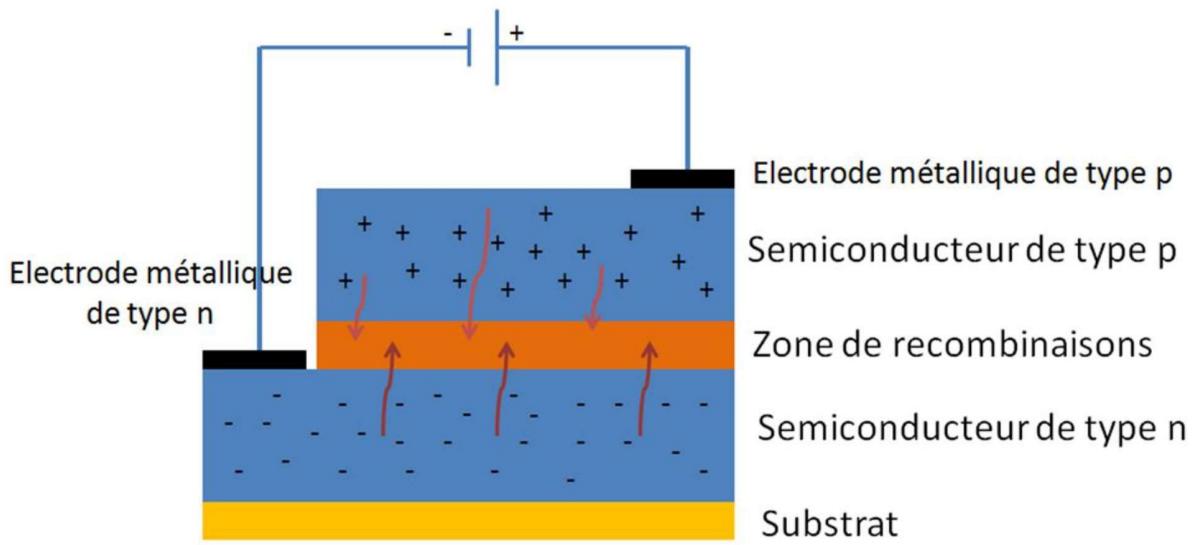
18

Spectre du rayonnement solaire



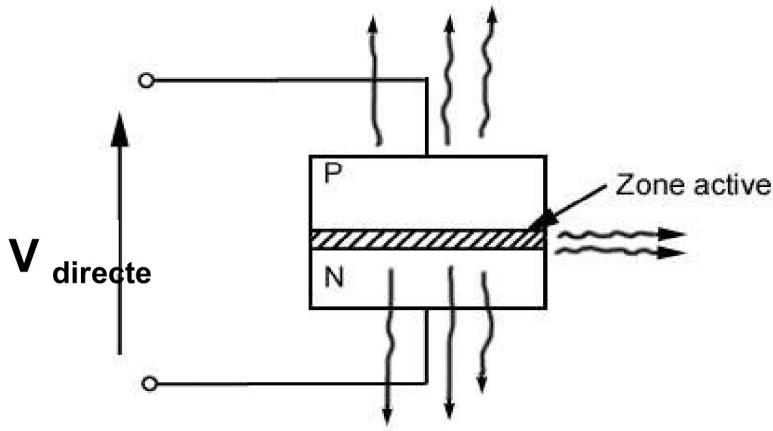
19

Diode électroluminescente DEL (Light Emitting Diode LED)



Fonctionnement d'une diode électroluminescente DEL

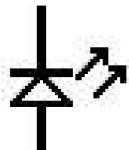
20



Cette diode émet de la lumière quand elle est polarisée en direct. Elle est maintenant très utilisée pour l'éclairage des habitations et depuis 1975 comme voyants lumineux dans les appareils électroniques.

Le symbole de la LED ressemble à celui de la diode mais on y a ajouté deux flèches sortantes pour représenter le rayonnement lumineux émis.

Symbole de la LED



21

1. L'Electroluminescence

Un électron de la bande de valence peut passer dans la bande de conduction à condition d'acquérir une énergie supplémentaire au moins égale à $DE=Eg$. C'est l'**effet photoélectrique**.

Inversement, un électron de la bande de conduction peut passer dans la bande de valence. Dans ce cas il libère une énergie au moins égale à $DE+Eg$. Cette énergie peut être :

- Dissipée sous forme de chaleur (phonons),
- émise sous forme de lumière (photons). C'est l'**effet électroluminescence**.

22

2. Caractéristiques optiques

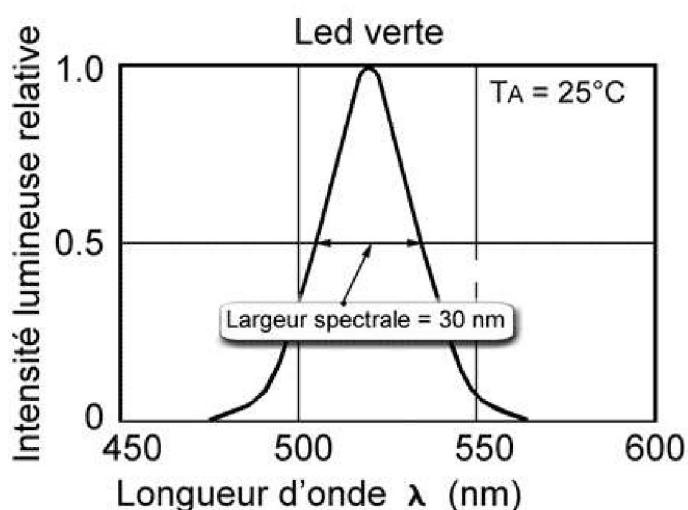
□ Longueur d'onde du pic d'émission

Cette valeur nous indique la longueur d'onde (λ_p), en nm, à laquelle est émis la plus importante partie du rayonnement. La valeur est donnée pour une intensité de courant (I).

□ Spectre ou largeur spectrale à mi-intensité

Le spectre d'émission d'une diode LED est relativement étroit.

Exemple : pour une longueur d'onde à intensité maximale égale à 520 nm, la longueur d'onde à intensité moitié pourra être comprise de 505 nm à 535 nm (soit une largeur spectrale de 30 nanomètres)



23

- Il existe actuellement plusieurs types de LED donnant chacun des spectres différents. Cela est obtenu par la variété des semi-conducteurs utilisés pour fabriquer les jonctions PN.

Exemples dans le tableau suivant pour l'obtention de certaines longueurs d'onde :

Couleur	Longueur d'onde (nm)	Energie des photons (eV)
Ultra-Violet	< 390	> 3,18
Violet	390-455	2,72-3,18
Bleu	455-490	2,53-2,72
Cyan	490-515	2,41-2,53
Vert	515-570	2,18-2,41
Jaune	570-600	2,06-2,18
Orange	600-625	1,98-2,06
Rouge	625-720	1,72-1,98
Infra-Rouge	> 720	< 1,72

24

Diagramme de rayonnement

Le flux lumineux n'est pas homogène tout autour de la LED. La **répartition spatiale** de la puissance émise dépend de la forme de la diode LED : forme de la partie émissive (point, trait...), avec ou sans lentille de concentration, diffusante ou non.

:

Angle d'émission à mi-intensité

Les fabricants précisent souvent l'angle pour lequel l'intensité lumineuse a été réduite de moitié.

Intensité lumineuse

L'intensité lumineuse (mesurée en candelas) est la quantité de lumière émise dans une certaine direction à 1 mètre de distance. Dans les caractéristiques optiques des leds nous l'exprimons aussi en micro-candela (mcd) et se note I_V .