



INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY  
UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION



INTERNATIONAL CENTRE FOR THEORETICAL PHYSICS  
34100 TRIESTE (ITALY) - P.O. B. 586 - MIRAMARE - STRADA COSTIERA 11 - TELEPHONES: 224281/2 3 4 5 6  
CABLE: CENTRATOM - TELEX 460392-1

SMR/112 - 13

IV<sup>e</sup> SEMINAIRE SUR L'ENERGIE SOLAIRE

(10 - 21 septembre 1984)

#### LES PHOTOPILES

M. AVEROUS  
Laboratoire d'Infrarouge  
Université des Sciences et Techniques  
du Languedoc  
Place Eugène Bataillon  
34060 Montpellier  
France

Ces notes sont préliminaires. Vous trouverez les copies qui vous manquent et des supplémentaires au Bureau 231.

## Les photopiles

### Aspects historiques

Effet photovoltaïque : SMITH (1878)

Photopiles: production d'énergie électrique  
par transformation du rayonnement  
solaire

1<sup>re</sup> Photopile:

Bell laboratories

Princc 1954

rendement  $\eta \approx 6\%$

1 habitation alimentée par photopiles  
SKylab

1978  $\rightarrow$  puissance installée : 99 centaines  
de Kwatts

1982  $\rightarrow$  Compagnie Municipale d'Électricité  
de Sacramento (Californie)  
Centrale photovoltaïque (P.V.) de  
100 Megawatts-crête  
Coût investissement moyen : 2700 \$ / kW  
Filère Nucléaire : 2000-2500 \$ / kW

# Disponibilité de l'énergie Solaire

Energie Solaire incidente

$3 \cdot 10^{18}$  kWh/an

(Rapport MITRE)

Consommation mondiale d'énergie

$6 \cdot 10^{13}$  kWh/an

Surface de photopiles nécessaire ( $\eta = 10\%$ )

$300 \times 1000 \text{ km}^2$

(Territoire désertiques)

En France, d'après les courbes d'ensolaillement

1 générateur de  $30 \text{ m}^2$  peut alimenter  
une famille de 4 personnes.

Formes d'énergie	Procédés de Transformation				
Rayonnement Solaire					
	↓ Végétaux (0.01) ↓	↓ Cellules photo- chimiques ( $\eta$ faible) ↓	↓ Collecteurs solaires à concentration ↓	↓ ↓	↓ Cellules Photo- voltaïques ↓
Energie chimique					
	↓ Chaudière (0.75) ↓	↓ Piles à combustible ↓	↓ ↓	↓ ↓	↓
Energie thermique					
	↓ Moteurs thermiques (0.2) ↓		↓ Moteurs thermiques (0.1) ↓	↓ Thermopile Diodes thermo- voltaïques (0.6) ↓	↓
Energie Mécanique					
	↓ Générateurs (0.9) ↓	↓	↓ Générateurs (0.9) ↓	↓ ↓	↓
Energie électrique	0.0015	$\eta$ très faible	0.05	0.03	0.13

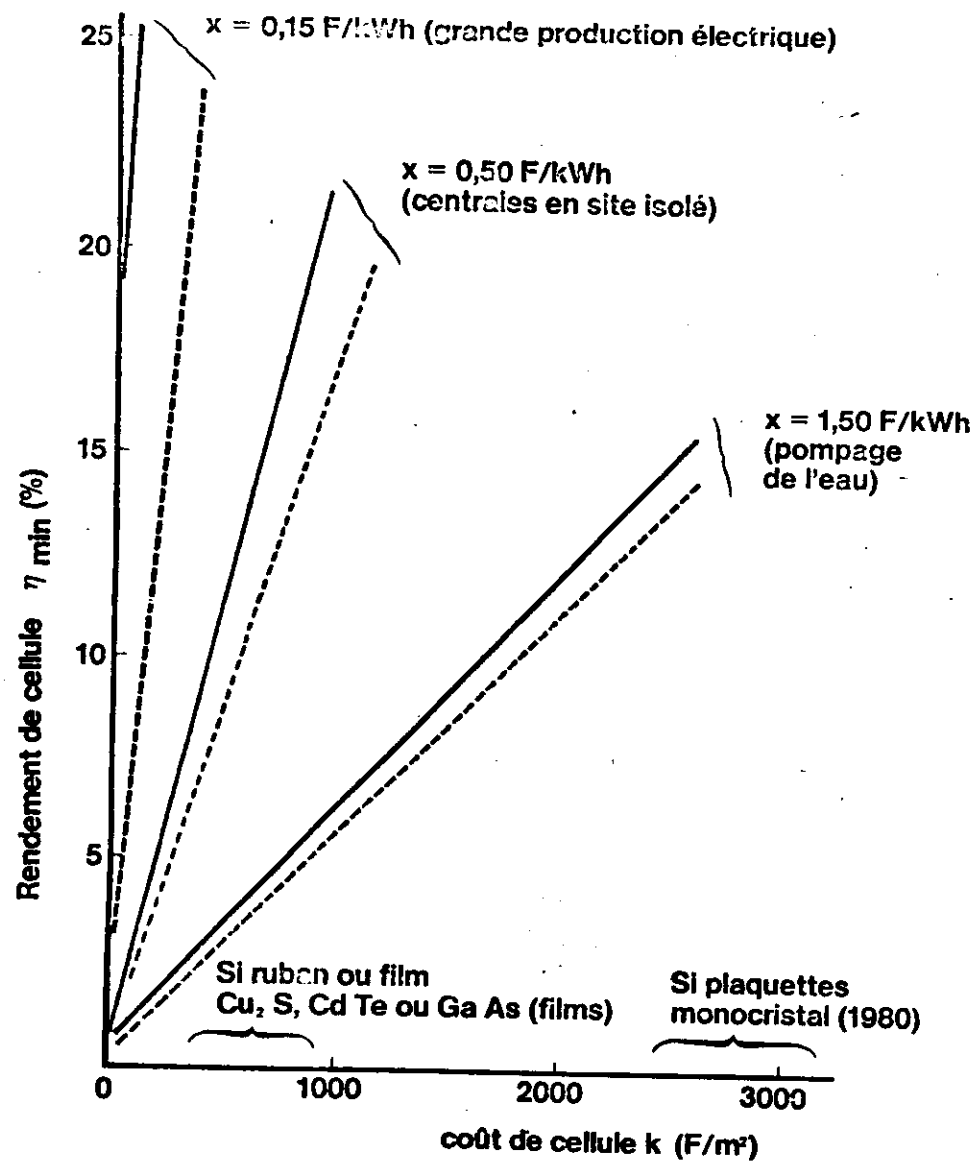
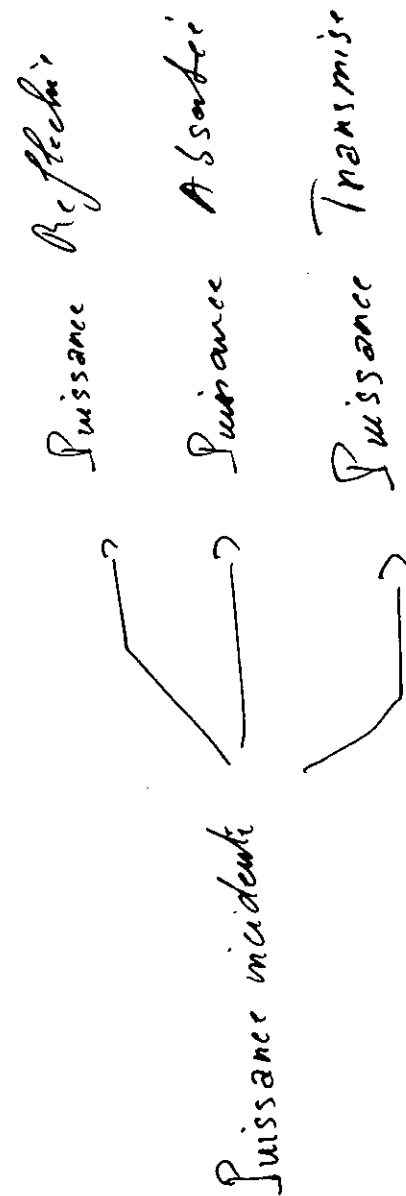


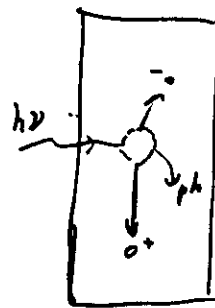
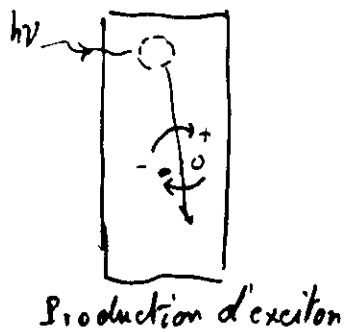
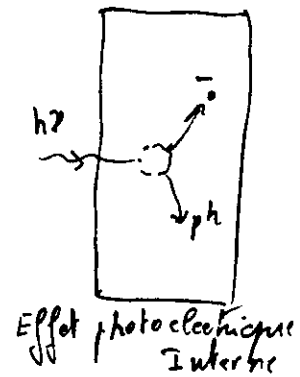
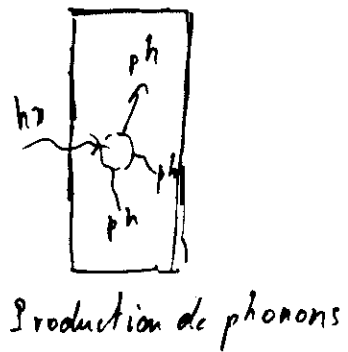
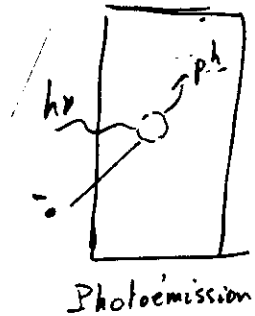
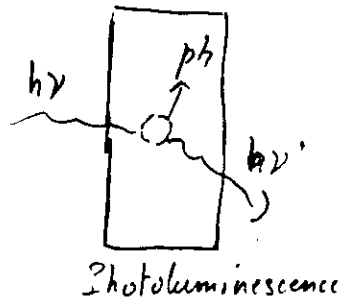
Fig.1



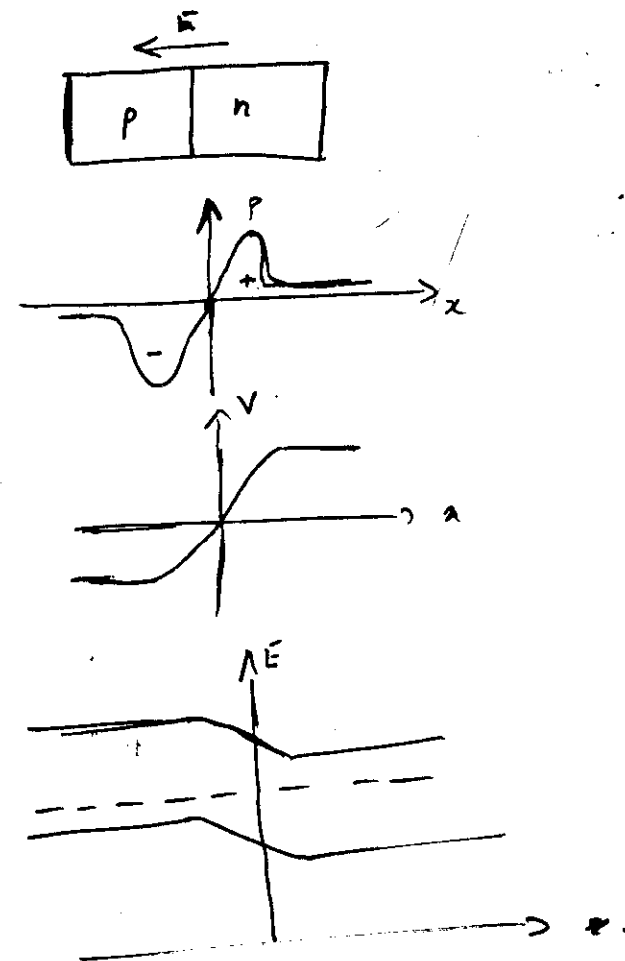
loi de conservation de l'énergie

$$P_R + P_A + P_T = P_I$$

# Puissance Absorbée



différents types d'interaction photon - réseau



1-1- Jonction non polarisée -

1-1-1- Jonction non polarisée -

1-1-1-1- Jonction non polarisée F-N non polarisée, la figure (1) nous montre les courbes d'énergie, le potentiel, et la densité de charge en fonction de la jonction.

Pour décrire le bilan des courants dus aux électrons et aux trous, les électrons sont les porteurs minoritaires du côté P, il y a une certaine quantité qui arrivent au niveau de la bande de valence, ils se déplacent le potentiel  $E_1$  créé par les charges d'accepteurs à la hauteur de la jonction (donneurs localisés du côté N et accepteurs localisés du côté P) et se dirigent vers le côté P de la jonction. Les trous sont les porteurs majoritaires du côté P, ils doivent franchir la barrière de potentiel  $E_1$  pour aller vers le côté N. Seule une petite quantité a une énergie supérieure ou égale à  $e\phi_1$  atteint le côté N. Il en sera de même pour les électrons et les trous qui vont circuler du côté N au côté P. Les électrons (dans des pannes majoritaires et les trous, les porteurs minoritaires).

Nous obtenons :

- $I_1$  = courant d'électrons du côté p au côté n
- $I_2$  = courant des trous du côté p au côté n
- $I_3$  = courant d'électrons du côté n au côté p
- $I_4$  = courant des trous du côté n au côté p

- $n_1$  = densité d'électrons du côté p
- $p_1$  = densité de trous du côté p
- $n_2$  = densité d'électrons du côté n
- $p_2$  = densité de trous du côté n

$I$  = courant total du côté p à n.

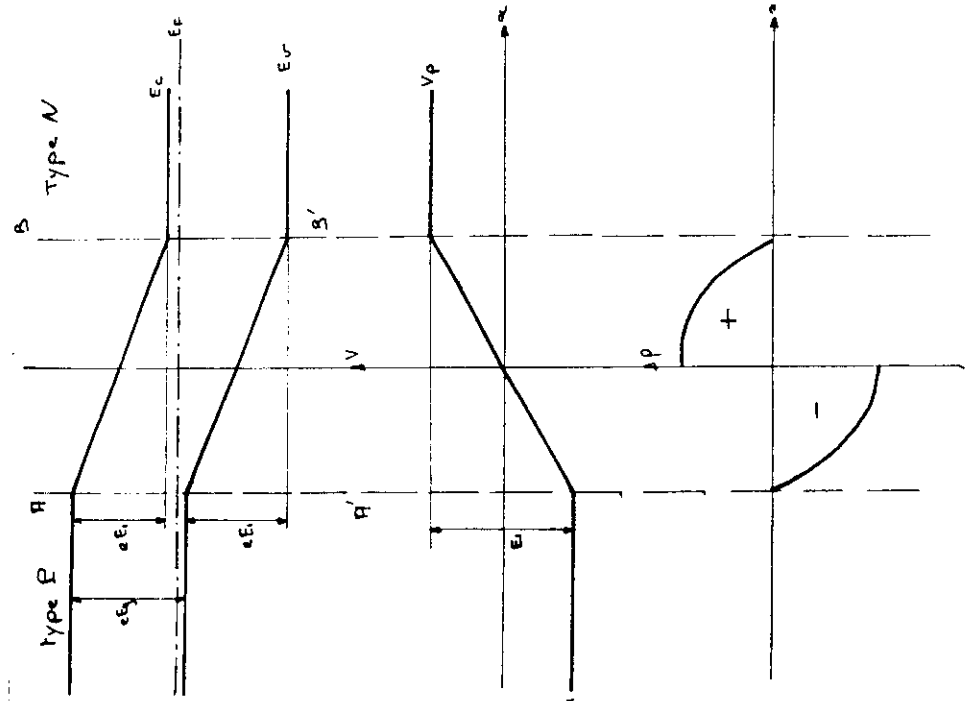


Fig 1. Diode non polarisée

$$I_1 = e n_1 v_1$$

$$I_2 = e p_1 v_2$$

$$I_3 = e n_2 v_3$$

$$I_4 = e p_2 v_4$$

$$I_5 = e n_3 v_5$$

$k_1, k_2, k_3, k_4$  étant des constantes.

Le courant total est :

$$I = -I_1 + I_2 + I_3 - I_4$$

$$= e (k_1 n_1 + k_2 p_1) + e (k_3 n_2 + k_4 p_2) e^{-e\phi_1/kT}$$

Il apparaît que les courants de diffusion dus aux porteurs minoritaires sont équilibrés par les courants de conduction dus aux porteurs majoritaires.

Pour équilibre :  $I = 0$  donc :

$$(k_1 n_1 + k_2 p_1) = (k_3 n_2 + k_4 p_2) e^{-e\phi_1/kT} \quad (1)$$

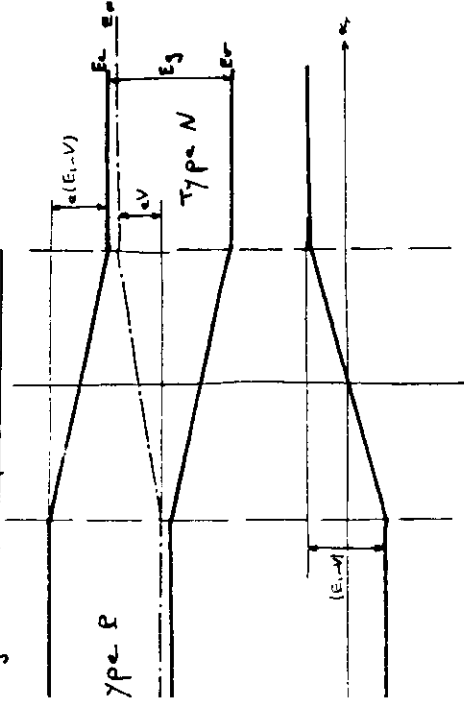
1-1-2- Jonction polarisée -

Appliquons une tension positive  $V$  du côté P, le côté N étant relié à la masse. Les courants  $I_1$  et  $I_2$  dus aux porteurs minoritaires ne sont pas modifiés. Ils descendent toujours la barrière de potentiel qui est devenue  $e\phi_1 - V$ . Cette diminution de potentiel a accru le nombre de porteurs minoritaires circulant à travers la jonction. En effet, un plus grand nombre possède maintenant une énergie suffisante  $e(\phi_1 - V)$  pour remonter la barrière de potentiel.

$$I = -q \cdot n_1 + kT/q + (kT/q) \cdot e^{-e(E_1 - V)/kT} \quad (2)$$

La figure 16 ci-dessus montre les niveaux d'énergie et le potentiel à la barrière de la jonction.

Fig 2. Diode polarisée en direct



Si la tension appliquée aux bornes de la diode est négative, et assez grande, la barrière de potentiel augmentera et les porteurs majoritaires ne posséderont pas une énergie assez grande :  $e(E_1 - V)$  pour franchir la barrière de potentiel et leur contribution à la formation du courant sera négligeable.

Le courant sera régi à :

$$I = -(K_1 n_1 + kT/q) = -I_0 \quad (3)$$

La figure 3 nous représente les niveaux d'énergie et le potentiel à la barrière de la jonction.

Fig 3. Réjection du courant inverse -

Le courant inverse est limité par la diffusion. Les vitesses moyennes de diffusion des électrons et des trous sont respectivement égales à  $D_n/L_n$  et  $D_p/L_p$ .

On obtient le courant :

$$I_0 = q \left[ \frac{D_n}{L_n} \cdot n_p + \frac{D_p}{L_p} \cdot p_n \right] \quad \begin{matrix} n_p \text{ électrons dans P} \\ p_n \text{ trous dans N} \end{matrix}$$

qui s'écrit encore :

$$I_0 = q n_i^2 \left[ \frac{D_n}{L_n} \frac{1}{N_A} + \frac{D_p}{L_p} \frac{1}{N_D} \right]$$

$$I_0 = q N_A \cdot N_D \cdot e^{-\frac{E_g}{kT}} \left[ \frac{D_n}{L_n} + \frac{D_p}{L_p} \right] \quad (5)$$

Le courant inverse est une fonction exponentielle de la bande interdite.

I-2-Energie d'un photon -

Un rayon de lumière solaire est la superposition d'ondes électromagnétiques de fréquences différentes. C'est aussi un faisceau de photons dont l'énergie est liée à sa longueur d'onde.

Nous avons :

$$E = h \cdot \nu$$

$$\text{et } \nu = \frac{c}{\lambda}$$

(6)

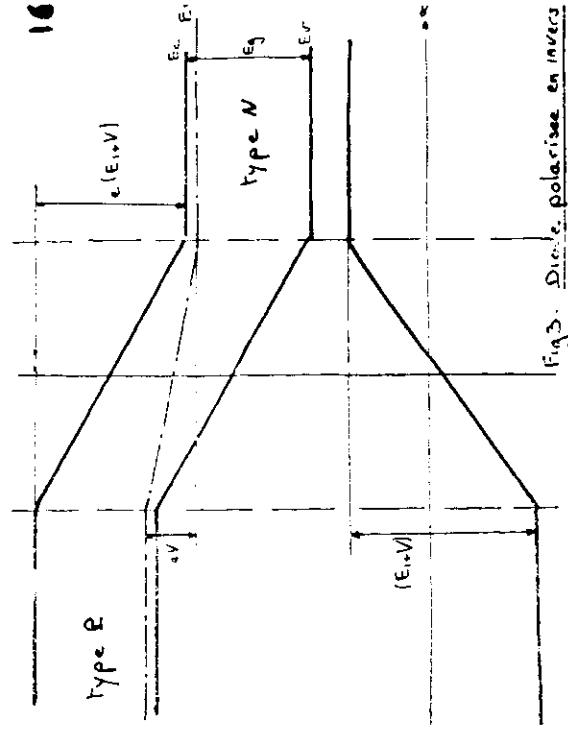


Fig 3. Diode polarisée en inverse

Le courant  $I_0$  est le courant inverse maximum des porteurs minoritaires qui traversent la jonction (courant de saturation dû à génération et recombinaison).

Les équations (1) et (3) portées sous l'équation (2) nous donnent :

$$I = I_0 \left[ e^{eV/kT} - 1 \right] \quad (4)$$

C'est l'équation la caractéristique de la diode. La figure 4 nous montre l'allure caractéristique  $I = f(V)$  d'une diode.

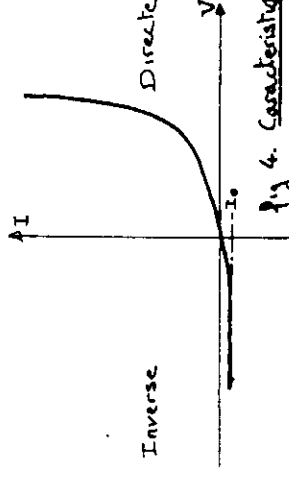


Fig 4. Caractéristique  $I = f(V)$  d'une diode

Si on veut exprimer l'énergie en électron-volt : eV

$$E = eV = \frac{h \cdot \nu}{\lambda}$$

$$\text{soit } \nu = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{h}{e} = \frac{1240}{\lambda} \text{ volts} \quad (7)$$

$\lambda$  est le symbole de l'Angstrom =  $10^{-10}$  m, et  $\lambda$  est la longueur d'onde en Angstrom.

La constante 1240 représente la longueur d'onde d'un photon qui a une énergie de 1eV.

$\phi$  est l'intensité du faisceau lumineux en Watts/m<sup>2</sup>.  $N$  est le nombre de photons dont l'énergie totale est  $\phi$  joules.

Pour un faisceau monochromatique

$$N = \frac{\phi}{h \cdot \nu} = \frac{\phi \cdot \lambda}{1240} = 5,64 \cdot 10^{-14} \phi [\lambda] \text{ /mots-}\AA$$

I-3-Effet photovoltaïque -

I-3-1-Analyse du phénomène -

L'effet photovoltaïque permet la conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Il se définit comme l'apparition d'une différence de potentiel dans un semiconducteur éclairé.

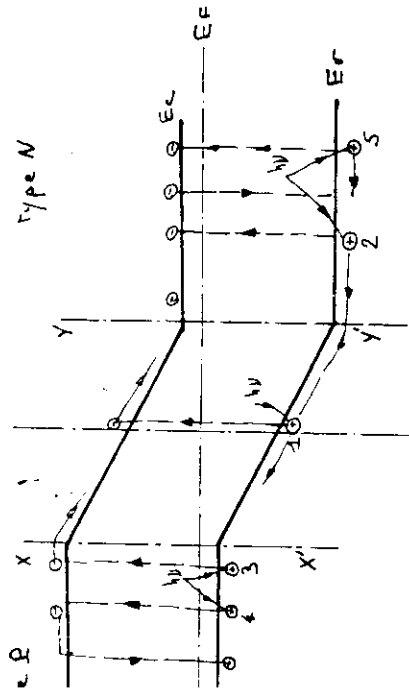


Fig 5. Mécanisme physique de production du courant photovoltaïque

Soit la figure n° 5 qui représente une jonction p-n recevant un rayonnement lumineux d'énergie suffisante  $h\nu > E_g$ .

Un photon peut entrer en collision avec un électron libre, un électron de la bande de valence ou un trou et lui céder son énergie. Vu la densité de porteurs majoritaires  $[10^{16} / m^3]$  pour les semi-conducteurs fortement dopés qui est environ  $1/10$  000 de celle des électrons de valence, la probabilité de collision d'un photon avec un électron de valence sera fortement prédominante.

Quand un photon entre en collision avec un électron de la bande de valence et lui cède une énergie égale ou supérieure à  $E_g$ , l'électron est extrait de la bande de valence et monte dans la bande de conduction laissant un trou derrière lui.

Ce phénomène de création de paires (électron-trou) a lieu en différents points de la jonction.

Si on jette des électrons dans une jonction p-n, on crée un champ électrique, car les électrons se déplacent vers le p et les trous vers le n. On crée ainsi un champ électrique et un courant de charge positive au côté n et négative p.

Si la paire électron-trou est créée du côté n, n° 3 de la figure, et que le p et le n sont des matériaux de même type, la paire se déplace vers la jonction, et la traversée, il y a encore transfert de charge positive du côté n au côté p, l'énergie de la particule majoritaire est un général insuffisante pour franchir la barrière de potentiel.

Si la paire électron-trou est créée du côté p, n° 3 de la figure, et que l'électron se déplace vers la jonction, il attire le côté n et à nouveau il y a transfert de charge positive du côté n au côté p.

Les porteurs minoritaires ainsi créés peuvent aussi s'éloigner de la jonction et se recombiner avec un porteur majoritaire, n° 4 et 5 de la figure.

Les porteurs minoritaires sont la principale composante du courant photovoltaïque. Les porteurs majoritaires sont peu nombreux à franchir la barrière de potentiel. Leur contribution à la formation du courant est faible.

La distance de la particule minoritaire photocréée à la jonction se mesure en longueur de diffusion  $L_d$ . Elle représente la distance moyenne de paires d'un porteur minoritaire avant sa recombinaison avec une particule majoritaire. La longueur de diffusion représente donc la distance en dessous de laquelle un photon absorbé a une forte probabilité de se convertir en courant électrique à travers la jonction. Les valeurs de  $L_d$  varient de  $10^{-4}$  à  $10^{-6}$  m.

## I-32- Caractéristique d'une cellule photovoltaïque -

On court-circuite les deux bornes d'une cellule photovoltaïque.

La diffusion à travers la jonction des particules minoritaires photocréées produit le courant de court-circuit  $I_{CC}$ . Pour un faisceau lumineux monochromatique  $I_{CC}$  est proportionnel à l'intensité lumineuse.

Bien que les courants,  $I_1, I_2, I_3, I_4$  définis précédemment existent leur contribution au courant photovoltaïque est nulle.

Si nous disposons une résistance aux bornes de la jonction il apparaît une tension  $V$  sur cette charge. Cette tension correspond à une polarisation directe et diminue la barrière de potentiel au niveau de la jonction. Un plus grand nombre de particules majoritaires traversent la jonction.  $I_2$  et  $I_3$  augmentent alors que les courants de minoritaires  $I_1, I_4, I_{CC}$  ne sont pas modifiés. Ils descendent toujours la barrière de potentiel.

Le courant est égal à

$$I_L = I_{CC} + I_1 + I_4 - I_2 - I_3$$

soit

$$I_L = I_{CC} - I_0 \left[ e^{eV/kT} - 1 \right] \quad (9)$$

Cette équation nous permet de donner le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque (fig. 6). Un générateur de courant égal à  $I_{CC}$ , en parallèle avec une diode qui malheureusement laisse passer le courant photovoltaïque.

La caractéristique  $I = f[V]$  est représentée pour plusieurs intensités lumineuses (fig. 7). Nous voyons que le courant photovoltaïque est proportionnel à l'intensité lumineuse.

## I-33- Tension en circuit ouvert $V_0$ -

Avec le courant de charge  $I_L = 0$ , l'équation (9) devient :

$$I_{CC} = I_0 (e^{eV/kT} - 1)$$

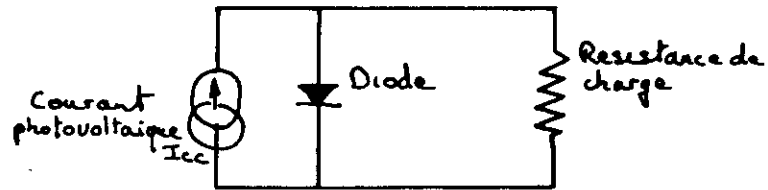


Fig 6 schema equivalent d'une cellule photovoltaïque

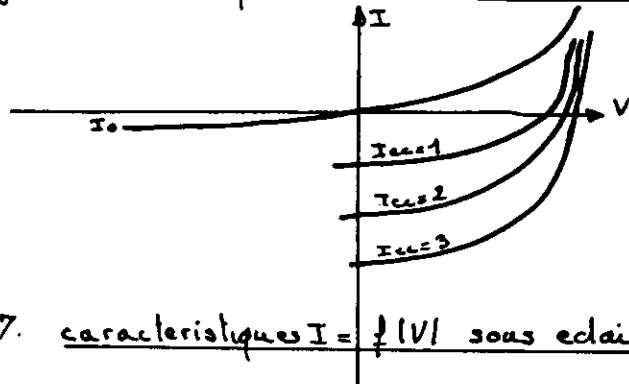


Fig 7. caracteristiques  $I = f(V)$  sous eclaircement [2]

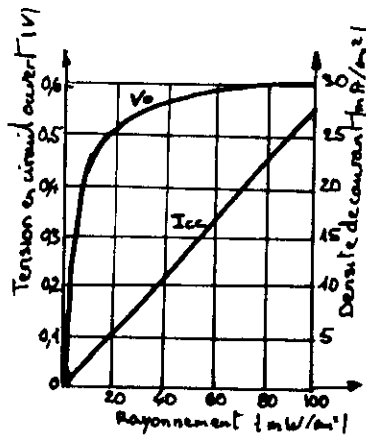


Fig 8 Variation de la tension en circuit ouvert et du courant de court-circuit en fonction de l'intensité lumineuse [2]

$$\text{Soit } \frac{eV_0}{kT} = \lg \left[ \frac{I_{CC}}{I_0} + 1 \right] \quad V_0 = V_T \cdot \lg \left[ \frac{I_{CC}}{I_0} + 1 \right] \quad (10)$$

avec  $V_T = \frac{kT}{e}$  est le potentiel thermique.

Si T reste constant  $V_0$  croît comme le logarithme de  $I_{CC}$  comme nous le montre la figure (8).

### I 34 Rendement optimum et puissance maximum -

L'énergie arrivant sous forme d'un faisceau lumineux indépendant des conditions de sortie, le point de fonctionnement qui donne la puissance maxi. sera le même que celui qui donne le rendement maxi.

Pour une tension V, le courant est donné par (9). On obtient une puissance égale à :

$$P = V \left[ I_{CC} - I_0 \left( e^{V/V_T} - 1 \right) \right] \quad (11)$$

En annulant la dérivée on obtient la maximum de puissance.

$$0 = I_{CC} - I_0 \left[ e^{V/V_T} - 1 \right] - \frac{VI_0}{V_T} e^{V/V_T}$$

$$\text{soit } e^{V/V_T} \left[ \frac{V_m}{V_T} + 1 \right] = \left[ \frac{I_{CC}}{I_0} + 1 \right] \quad (12)$$

Ceci est l'équation implicite donnant la valeur de la tension  $V_m$  à la puissance maximum.

Le courant correspondant est :

$$I_m = \frac{I_{CC} + I_0}{1 + \frac{V_m}{V_T}} \cdot \frac{V_m}{V_T} \quad (13)$$

La figure (9) nous donne trois rapports :

$$\frac{V_m}{V_0}, \quad \frac{I_m}{I_{CC}} \quad \text{et} \quad \frac{P_m}{V_0 \cdot I_{CC}}$$

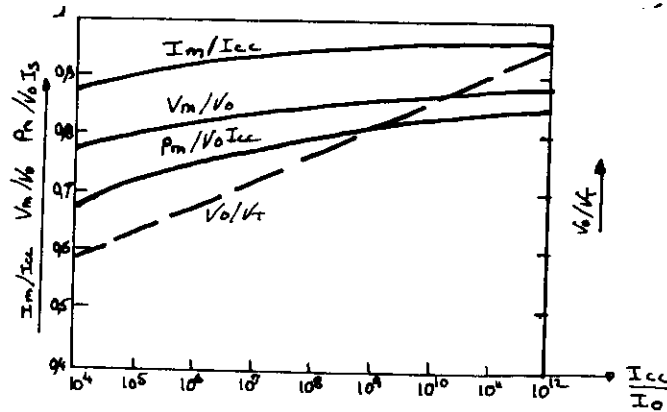


Fig 9. Puissance Fournie maxi et point de fonctionnement optimum [2]

$V_m$ ,  $I_m$ ,  $P_m$  représentent la tension, le courant et la puissance fournis à la charge au point de fonctionnement correspondant à la puissance maxi.

Le rapport entre la puissance maxi.  $V_m I_m$  et le produit  $V_o \cdot I_{CC}$  s'appelle le facteur de courbe ou facteur de remplissage.

$$F.C. = \frac{V_m \cdot I_m}{V_o \cdot I_{CC}} \quad (14)$$

La courbure des caractéristiques  $I = f[V]$  nous permet de fournir beaucoup de puissance à la charge. Pour une même tension en circuit ouvert  $V_o$  et un même courant de court circuit  $I_{CC}$  les caractéristiques incurvées de la figure 7 nous donnent 2 à 3 fois plus de puissance que si elles étaient linéaires.

### I 3.5 Rendement de conversion -

Le rendement de conversion est défini

$$\eta = \frac{V I}{N_e E_{ph}} \quad (15)$$

$VI$  = puissance fournir à la charge

$E_{ph}$  est l'énergie moyenne des photons en eV

$N$  est le nombre de photons par seconde.

Le produit  $N_e E_{ph}$  représente la puissance lumineuse incidente.

Posons :

$K_1$  = fraction de photons incidents qui traversent la surface du cristal

$K_2$  = fraction de photons qui libèrent un électron de valence tel que les porteurs minoritaires traversent la jonction.

On obtient :

$$I_{CC} = e N K_1 K_2$$

$$\text{soit } \eta = k_1 k_2 \cdot \frac{V I}{E_{ph} I_{CC}} \quad (16)$$

Finalement nous obtenons

$$\eta_m = k_1 k_2 \cdot \frac{V_m}{V_m + V_T} \cdot \frac{V_m}{E_{ph}} \quad (16)$$

Cette équation montre que le rendement de conversion est égal au produit de 4 rapports, tous inférieurs à l'unité.

La température intervient sur le fonctionnement de la cellule photovoltaïque : le rendement diminue lorsque la température augmente. En effet, le niveau de Fermi se déplace vers le centre de la bande interdite quand la température s'élève. Ceci amène une diminution de  $E_1$  ainsi que de la tension disponible en sortie. De même  $I_0$  croît avec la température. Ces deux considérations entraînent bien une diminution du rendement.

La figure 10, nous montre le rendement d'une cellule solaire en fonction du saut d'énergie pour différentes températures.

### I 3.6 Pertes de puissance - [ 8 ]

1 - Réflexion en surface.

2 - Variation du coefficient d'absorption en fonction de l'énergie à deux conséquences.

a) seuls les photons ayant une énergie  $h\nu$  égale ou supérieure à celle requise pour créer une paire électron-trou ( $h\nu > E_g$ ) sont absorbés par la pile (on néglige l'absorption par porteurs libres). La partie exploitable du spectre solaire dépend du semiconducteur.

b) Etant donné la valeur finie du coefficient d'absorption d'une part, l'épaisseur réduite de la pile d'autre part, certains photons capables de créer des paires électron-trou traversent la pile sans être absorbés. Cette perte d'absorption devient importante pour des longueurs d'onde proche du gap.

3 - Les paires électron-trou sont créées dans le volume de la pile, pour contribuer à la puissance recueillie les porteurs minoritaires doivent diffuser jusqu'à la jonction. A cause de longueur de diffusion des porteurs minoritaires, tous les porteurs photocréés ne sont pas collectés.

4 - A priori,  $V_{CO}$  peut atteindre  $E_g/q$ , mais en pratique, on a  $V_{CO} < E_g/q$ .

5 - Par suite, de la nature exponentielle de la caractéristique théorique, la tension de la pile fonctionnant au point de puissance maximale est inférieure à la tension en circuit ouvert. De même le courant correspondant à ce point est inférieur au courant de court-circuit.

Malheureusement, il existe dans une pile réelle d'autres mécanismes de pertes de puissance qui en principe peuvent être éliminés mais en pratique sont imposés par la technologie.

1/ Recombinaison des porteurs par l'intermédiaire d'états de surface.

2/ Recombinaison au niveau du contact ohmique arrière.

Recombinaison des porteurs dans le volume :

$\gamma$  compris la zone de charge d'espace.

### I-33- Spectre solaire -

La figure 11 nous montre le spectre solaire ainsi que la part du spectre solaire utilisée pour la génération de paire électron-trou pour des matériaux de différentes bandes interdites. Nous remarquons que plus la largeur de bande interdite est petite, plus l'énergie perdue près de la crête du spectre est grande.

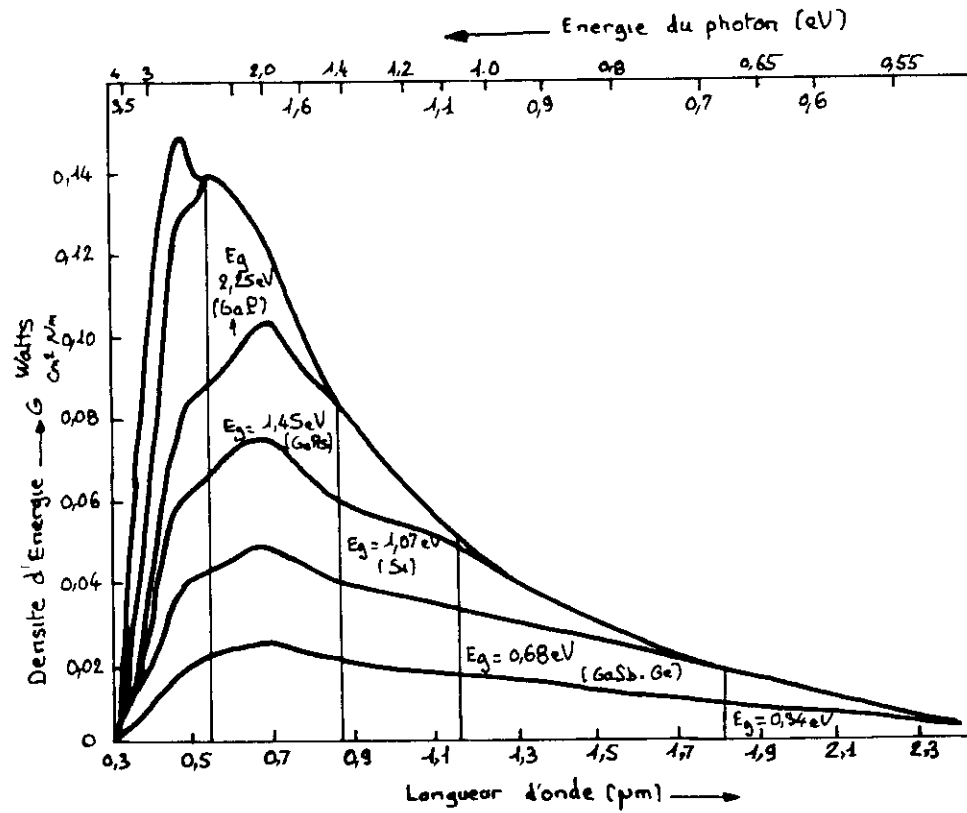
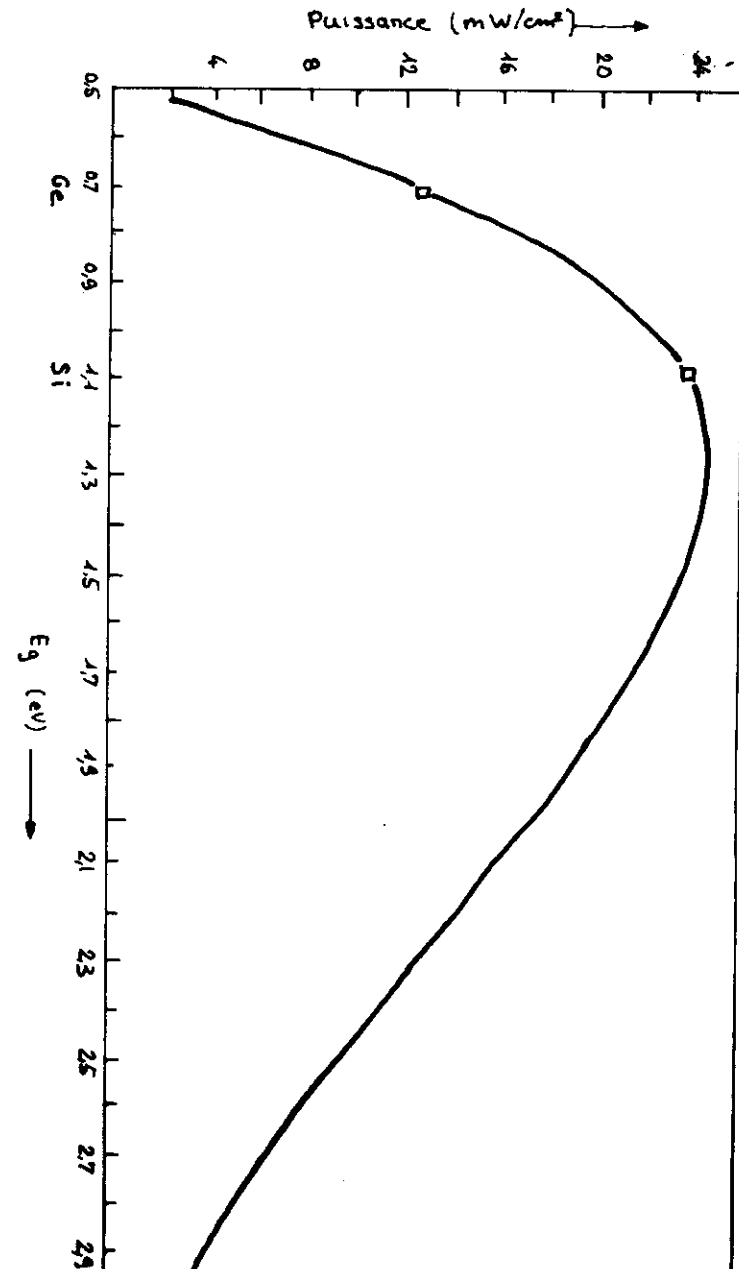


Fig. n° 11. Spectre solaire [16]

Fig. 12

Puissance maximale convertie en fonction du "gap"  $E_g$  du semiconducteur



La figure n° 12 nous montre la puissance maximale convertie en fonction du gap  $E_g$  du semiconducteur.

Cette figure nous montre que gap optimum se situe aux environs de 1,4 eV;

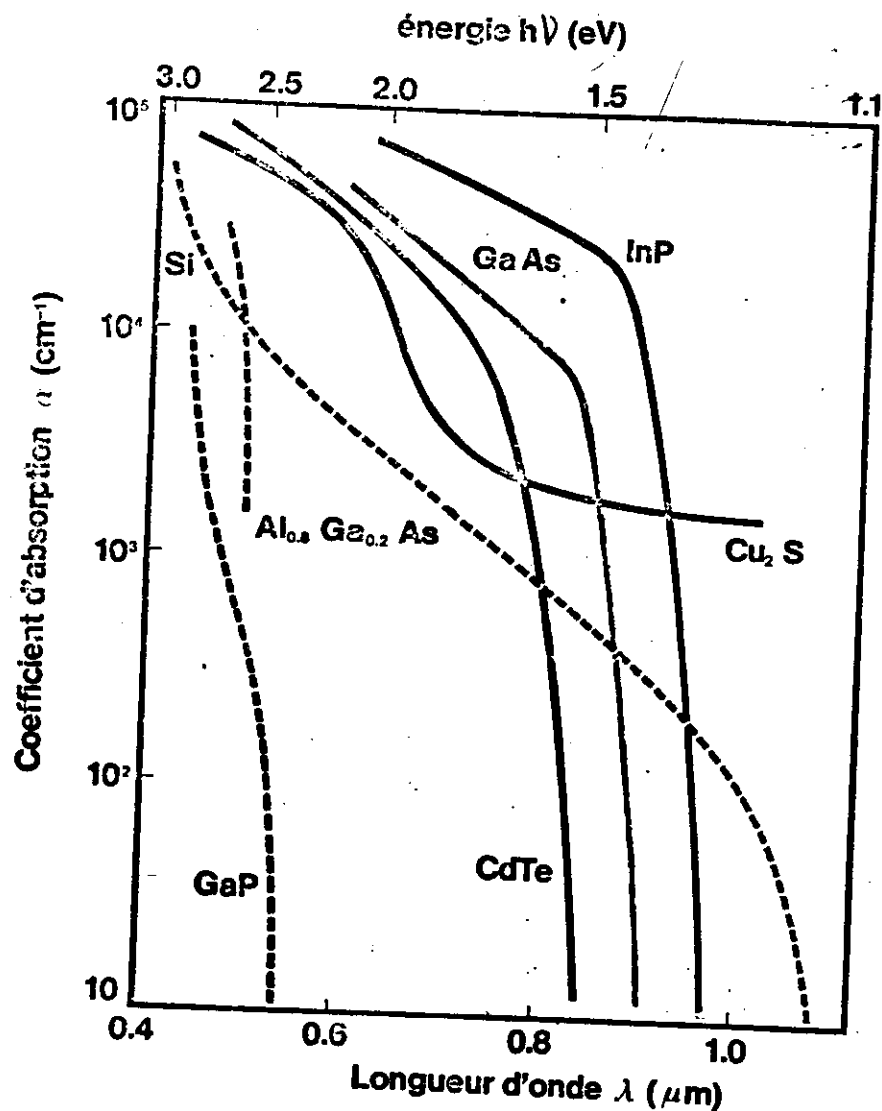
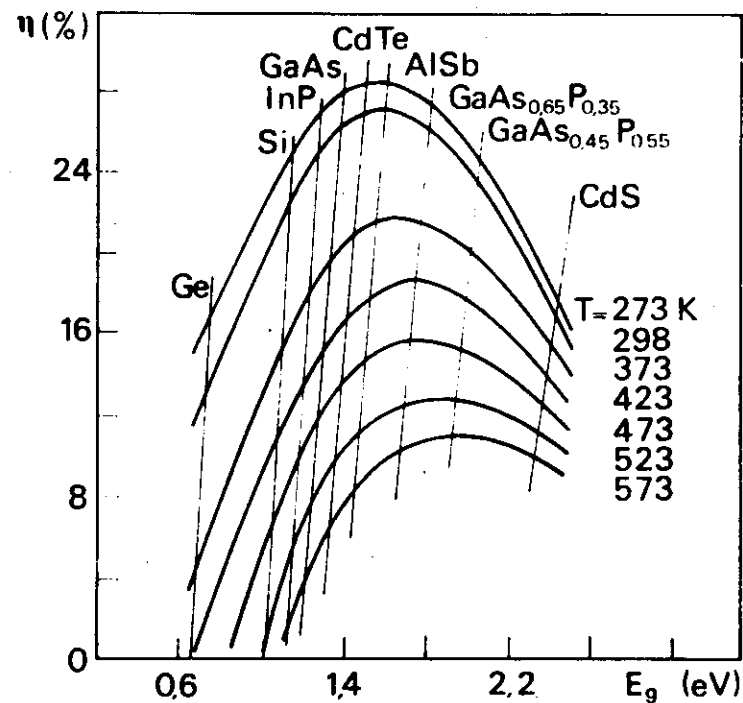
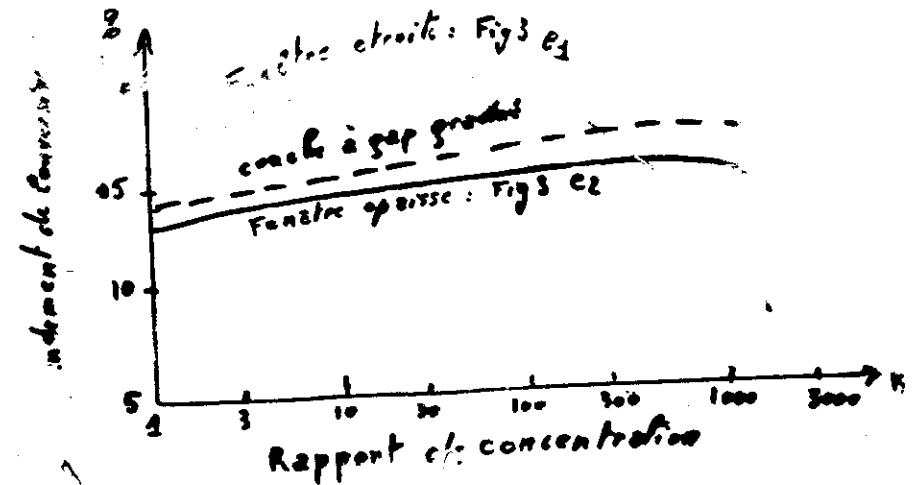
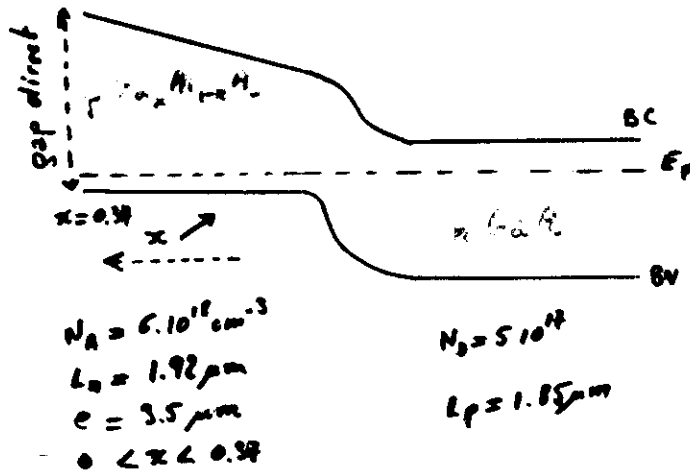
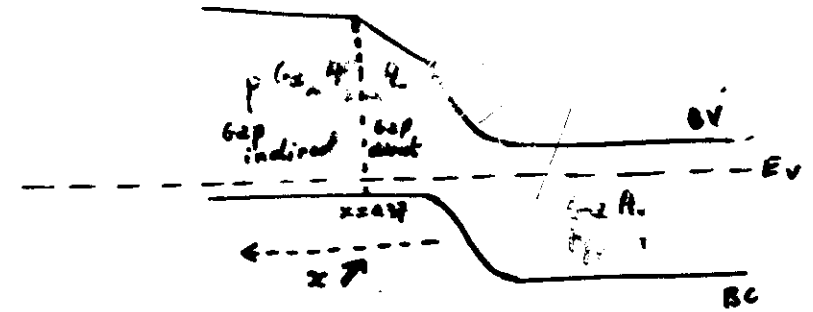
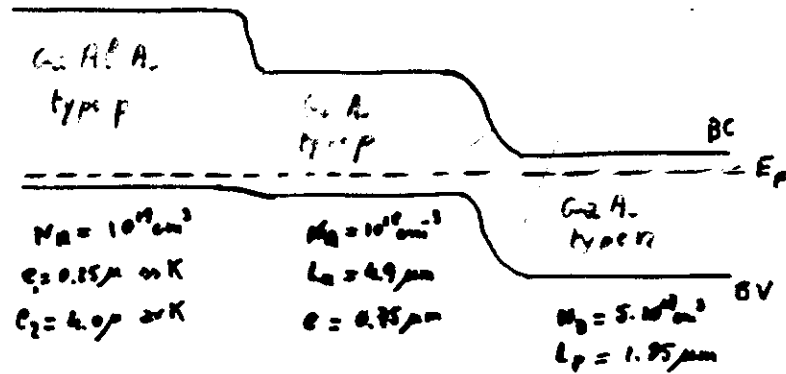


Fig. 13



Rendement théorique d'une cellule solaire en fonction de la température et de la largeur de bande interdite du semiconducteur. (cas de jonctions P-N idéales) [1b].

Fig. 14



Ref: J.W. BRIDGES, R. DAVIS, B.T. DEBNEY and R.W. KERN  
Photovoltaic Energy Conference Luxembourg Sep 77

