Principes de base et principaux paramètres de fonctionnement d'une cellule solaire *

Yves Pauleau

(Laboratoire de physico-chimie minérale et de thermodynamique, Université d'Angers, Faculté des Sciences, 2, boulevard Lavoisier, 49045 Angers Cedex).

Les principes de base et les principaux paramètres intervenant dans le fonctionnement d'une cellule solaire sont étudiés. L'influence des conditions d'élaboration et des propriétés des semiconducteurs sur la durée de vie des porteurs minoritaires, la vitesse de recombinaison en surface, la réponse spectrale, le courant en court-circuit, la tension en circuit ouvert et le rendement de conversion est discutée. L'influence d'autres paramètres de fonctionnement comme l'épaisseur de la couche de semiconducteur, l'existence de radiations, la température de la cellule et l'intensité du rayonnement lumineux incident est aussi examinée.

Liste des symboles utilisés

A_a : Surface active de la cellule ou surface avant de la cellule diminuée de la surface occupée par les contacts métalliques en forme de peigne.
A_0 : facteur de perfection de la cellule.
A_t : surface totale de la face avant de la cellule exposée au rayonnement lumineux.
c : vitesse de la lumière.
D_n, D_p : coefficients de diffusion des porteurs minoritaires.
E_c, E_v, E_r : niveaux d'énergie de la bande de conduction, de la bande de valence et des centres de recombinaison.
E_g largeur de la bande interdite du semiconducteur.
E_{ph} : énergie des photons incidents.
$\mathscr{E}$: champ électrique.
$F(\lambda)$: flux de photons dont la longueur d'onde est comprise entre $(\lambda - 5\ \text{nm})$ et $(\lambda + 5\ \text{nm})$.
FF : rapport entre la puissance maximale réelle que la cellule fournit et la puissance théorique maximale qu'elle pourrait fournir (Fill Factor).
F_{ph} : flux de photons ou nombre de photons incidents par cm^2 et par seconde qui arrivent à la surface du semiconducteur.
F(x) : flux de photons à la profondeur, x.
h : constante de Planck.
I_{ext} : intensité du courant débité par la cellule.
I_m : intensité maximale du courant débité par la cellule.
I_0 : courant de saturation de la diode en polarisation inverse.
I_{obs} : intensité du courant qui traverse la jonction dans l'obscurité lorsqu'elle est polarisée en inverse.
I_{sc} : intensité du courant en court-circuit.
J_n, J_p : courant d'électrons qui se déplacent du côté p vers le côté n et courant de trous qui se déplacent du côté n vers le côté p de la jonction.
J_{ph} : densité du courant créé par le rayonnement lumineux.
J_{surf} : densité de courant en porteurs minoritaires vers la surface du semiconducteur.

* *Extrait de la conférence intitulée « Les matériaux semiconducteurs pour les cellules solaires », présentée à Angers, le 5 décembre 1980, au cours de la réunion de la Section de l'Ouest de la SCF.*

k : constante de Boltzmann.
L_n, L_p : longueurs de diffusion des électrons dans la partie p et des trous dans la partie n.
m_e : masse effective.
n_{no} : concentration en électrons libres du côté n à l'équilibre thermique.
$n_{ph}(E_g)$: nombre de photons incidents par cm^2 et par seconde d'énergie supérieure à E_g.
n_p, n_{po} : concentration en électrons dans la partie p lorsque le semiconducteur est éclairé et lorsqu'il est dans l'obscurité à l'équilibre thermique.
N_c, N_v, N_r : densités effectives des états d'énergie de la bande de conduction, de la bande de valence et des centres de recombinaison.
p_n, p_{no} : concentrations en trous dans la partie n lorsque le semiconducteur est éclairé et lorsqu'il est dans l'obscurité à l'équilibre thermique.
P_{ext} : puissance débitée par la cellule.
P_{in} : puissance du rayonnement lumineux incident.
q : charge élémentaire.
$R(\lambda)$: coefficient de réflexion.
R_L : résistance externe.
R_s : résistances en série.
R_{sh} : résistances en parallèle ou résistances de shunt.
S_n, S_p : vitesses de recombinaison en surface des porteurs minoritaires.
$SR(\lambda)$: réponse spectrale interne.
$SR(\lambda)_{ext}$: réponse spectrale externe.
T : température absolue.
v_{dn}, v_{dp} : vitesses de déplacement des électrons et des trous sous l'action d'un champ électrique, $\mathscr{E}$.
v_{th} : vitesse des électrons qui se déplacent du fait de l'agitation thermique.
V_{ext} : tension aux bornes de la cellule.
V_m : tension maximale aux bornes de la cellule.
V_{oc} : tension en circuit ouvert.
W : largeur de la zone de charge d'espace.
x_j : profondeur de la jonction.
α : coefficient d'absorption du semiconducteur.
λ : longueur d'onde du rayonnement lumineux.
η : rendement de conversion de la cellule.
η_{id} : rendement de conversion idéal.
σ_n, σ_p : sections de capture du centre de recombinaison d'un électron quand le centre est vide et d'un trou quand le centre est rempli.
τ_m : temps qui sépare deux collisions entre électrons.
τ_n, τ_p : durées de vie des porteurs minoritaires.
μ_n, μ_p : mobilités des porteurs.

1. Introduction

Une cellule photovoltaïque, ou cellule solaire, est un dispositif qui transforme directement l'énergie d'un rayonnement lumineux ou du rayonnement solaire en électricité. Au cours des dernières années, les cellules solaires ont été principalement utilisées comme source d'énergie à bord des satellites; aujourd'hui, plus de 500 satellites en orbite autour de la terre sont équipés de cellules solaires au silicium.

La cellule solaire classique (figure 1) est réalisée à partir d'une plaquette, ou substrat, de silicium monocristallin orienté, de 400 µm d'épaisseur et de 5 à 10 cm de diamètre. Le silicium est dopé au bore (conductivité de type p). La résistivité du substrat ou de la base est de l'ordre de 1 à 10 Ω.cm (10^{15} à 10^{16} atomes de bore par cm^3). La couche de type n est obtenue par diffusion du phosphore dans le silicium sur une profondeur de 0,2 à 0,5 µm. Les contacts métalliques (titane-palladium-argent ou titane-argent) sont déposés par évaporation sous vide ou par pulvérisation cathodique sur les deux faces du substrat de silicium. Sur la face arrière, la couche métallique est continue et sur la face avant, elle a la forme d'un peigne obtenue en manquant une partie de la surface du silicium au cours du dépôt de la métallisation. La lumière qui passe entre les doigts métalliques pénètre dans le silicium et peut atteindre la jonction p-n. Une couche antireflet de monoxyde de silicium, SiO, de 80 nm d'épaisseur est déposée entre les doigts métalliques pour éviter la perte d'une partie du rayonnement lumineux par réflexion sur la surface du silicium. La cellule décrite est constituée par une homojonction, c'est-à-dire que les parties n et p de la jonction sont constituées par le même semiconducteur. Il est possible d'utiliser des jonctions métal-semiconducteur (diode Schottky) ou encore des hétérojonctions (les parties n et p étant constituées par deux semiconducteurs différents). Avant de décrire le mécanisme de l'effet photovoltaïque, il est nécessaire de rappeler quelques notions concernant l'absorption d'un rayonnement lumineux par un matériau semiconducteur.

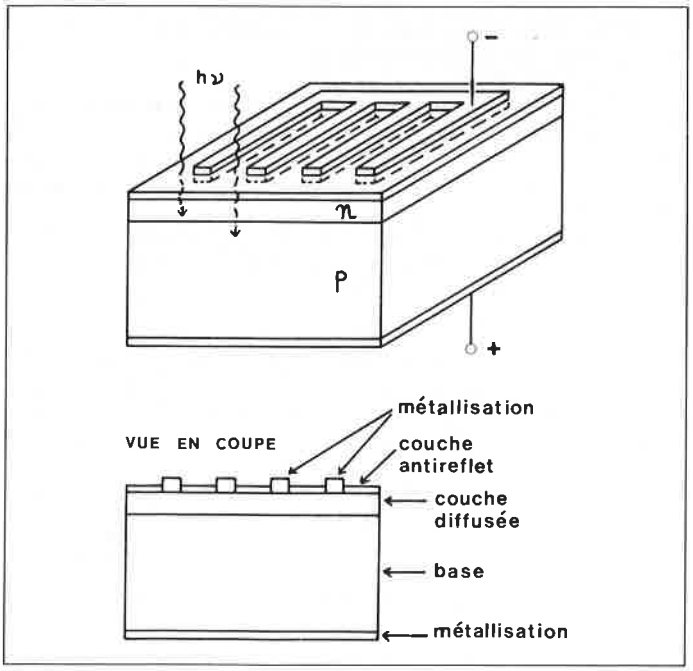

Figure 1. Structure d'une cellule solaire classique au silicium n/p.

2. Absorption d'un rayonnement lumineux par un semiconducteur

La longueur d'onde d'un rayonnement lumineux est liée à l'énergie du photon, E_{ph}, par l'équation suivante :

$$\lambda\,(\mu m) = \frac{1{,}24}{E_{ph}\,(eV)} \qquad (I)$$

Supposons que ce rayonnement monochromatique pénètre dans un cristal semiconducteur d'épaisseur, d, perpendiculairement à sa surface (figure 2). Suivant les valeurs relatives de l'énergie des photons, E_{ph}, et de la largeur de la bande interdite, E_g, du semiconducteur, il y a trois possibilités (figure 2*a*) :

- si $E_{ph} < E_g$, les photons ne sont pas absorbés par le semiconducteur ; autrement dit, le matériau est transparent et laisse passer la totalité du rayonnement ;
- si $E_{ph} = E_g$, les photons sont absorbés par le semiconducteur, c'est-à-dire qu'un photon va transmettre son énergie à un électron de la bande de valence qui passera dans la bande de conduction en laissant un trou dans la bande de valence ; l'absorption du photon aboutit à la création d'une paire électron-trou ;
- si $E_{ph} > E_g$, les photons sont également absorbés par le semiconducteur avec création de paires électron-trou et l'énergie en excès, $(E_{ph} - E_g)$, est dissipée sous forme de chaleur.

Soit F_{ph} le flux de photons incidents, c'est-à-dire le nombre de photons incidents par cm^2 et par seconde qui pénètrent dans le semiconducteur (figure 2*b*). Le nombre de photons absorbés par cm^2 et par seconde, dans une tranche de semiconducteur

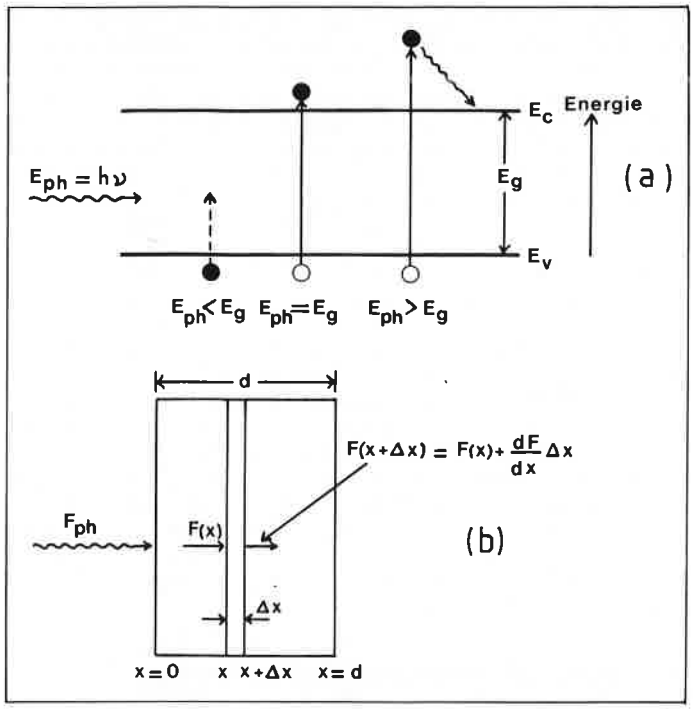

Figure 2. Absorption d'un rayonnement lumineux par un semiconducteur : (a) création des paires électron-trou, (b) absorption du flux de photons incidents.

d'épaisseur Δx située à la profondeur x, est proportionnel au flux de photons, $F(x)$, à la profondeur, x, et à l'épaisseur, Δx, d'où la relation suivante :

$$F(x + \Delta x) - F(x) = \frac{dF(x)}{dx} \Delta x = -\alpha F(x) \Delta x \qquad \text{(II)}$$

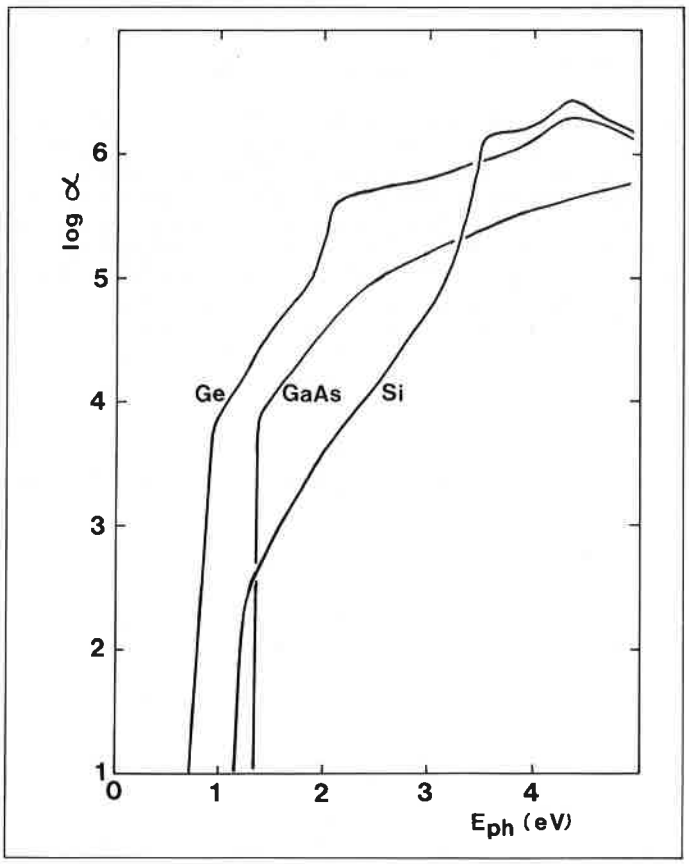

Figure 3. Variations des coefficients d'absorption de quelques semiconducteurs avec l'énergie des photons.

En intégrant l'équation (II), on obtient le flux de photons, $F(x)$, à la profondeur x :

$$F(x) = F_{ph} \exp(-\alpha x) \qquad \text{(III)}$$

Le coefficient de proportionnalité, α, est appelé le coefficient d'absorption du matériau. Sa valeur dépend de la longueur d'onde du rayonnement monochromatique incident (figure 3).

Le silicium dont la largeur de bande interdite est de 1,12 eV n'absorbe que les photons d'énergie supérieure, c'est-à-dire les rayonnements de longueur d'onde inférieure à 1,1 µm. L'arséniure de gallium (E_g = 1,43 eV) n'absorbe que les photons d'énergie supérieure à 1,43 eV ou les rayonnements de longueur d'onde inférieure à 0,9 µm. Le coefficient d'absorption du silicium augmente très progressivement avec l'augmentation d'énergie des photons car c'est un semiconducteur à transition indirecte ; par conséquent, la majeure partie des photons est absorbée et la plupart des paires d'électron-trou sont créées dans une tranche de semiconducteur plus épaisse que dans l'arséniure de gallium qui a un coefficient d'absorption plus élevé (figure 3).

3. L'effet photovoltaïque

Si une jonction p-n est éclairée à l'aide d'un rayonnement lumineux tel que $E_{ph} > E_g$, il y a passage d'un courant électrique dans une résistance externe, R_L, reliée aux bornes de la diode (figure 4*a*). C'est ce qu'on appelle l'effet photovoltaïque. Le mécanisme de conversion de l'énergie lumineuse en électricité comprend les quatre étapes principales suivantes (figure 4*b*) :

1. Absorption des photons et création des paires électron-trou, de part et d'autre de la jonction p-n.
2. Diffusion des électrons et des trous vers la zone de charge d'espace de largeur W. Il n'y a que les porteurs créés à une distance de cette zone inférieure aux longueurs de diffusion, L_n et L_p, qui l'atteindront avant de se recombiner.

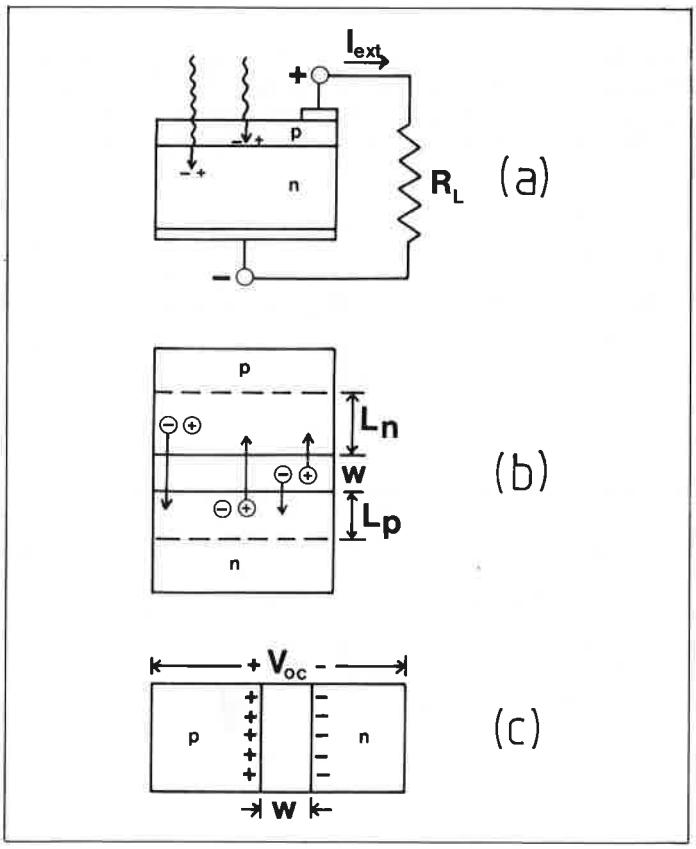

Figure 4. Conversion de l'énergie lumineuse en électricité : (a) la cellule solaire avec le circuit électrique externe, (b) diffusion des électrons et des trous, (c) apparition de la tension en circuit ouvert, V_{oc}.

3. Séparation des paires électron-trou dans la zone de charge d'espace par le champ électrique interne.
4. Si la diode est en circuit ouvert, il y accumulation des électrons et des trous aux bornes de la jonction (figure 4*c*) avec apparition d'une tension, c'est la tension en circuit ouvert, V_{oc}, à laquelle correspond une intensité nulle dans le circuit extérieur.

Si les bornes de la diode sont reliées à une résistance externe, R_L, il y a passage du courant dans la résistance (figure 4*a*); la diode est un générateur de courant; la borne positive correspond au côté p et la borne négative au côté n de la jonction. Les caractéristiques intensité-tension de la cellule solaire seront décrites dans le paragraphe 9. Si la résistance externe est nulle, les bornes de la jonction sont en court-circuit. La tension aux bornes est nulle mais l'intensité du courant dans le circuit extérieur est maximale; c'est le courant en court-circuit, I_{sc}.

Les porteurs (électrons et trous) créés par la lumière au cours de la première étape du mécanisme peuvent être collectés et contribuer au passage du courant électrique dans le circuit extérieur ou bien ils peuvent être détruits par recombinaison à la surface et à l'intérieur du semiconducteur (recombinaison directe ou par l'intermédiaire d'un centre de recombinaison). La probabilité de recombinaison des porteurs créés à une distance de la zone de charge d'espace ou de la jonction supérieure à L_n et L_p est très grande (la largeur de la zone de charge d'espace W est très faible par rapport aux longueurs de diffusion des porteurs (1)).
Les longueurs de diffusion des porteurs minoritaires sont directement liées à leurs durées de vie (1). En effet, on a :

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} \qquad \text{(IV } a\text{)}$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} \qquad \text{(IV } b\text{)}$$

Les coefficients de diffusion, D_n et D_p, sont liés à la mobilité des porteurs par l'équation d'Einstein (1) :

$$\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{D_n}{\mu_n} = \frac{kT}{q} \qquad \text{(V)}$$

Sous l'action d'un champ électrique, $\mathscr{E}$, les électrons et les trous diffusent à l'intérieur du semiconducteur dans des directions opposées et les vitesses de déplacement en fonction du champ électrique sont fournies par les équations suivantes (1) :

$$\vec{v}_{dn} = -\mu_n \vec{\mathscr{E}} \qquad \text{(VI } a\text{)}$$

$$\vec{v}_{dp} = \mu_p \vec{\mathscr{E}} \qquad \text{(VI } b\text{)}$$

La mobilité des électrons est donnée par l'équation suivante (1) :

$$\mu_n = \frac{q\tau_m}{m_e} \qquad \text{(VII)}$$

La mobilité des trous est fournie par une équation analogue.

4. Durée de vie des porteurs minoritaires

Il est évident que le nombre de porteurs minoritaires collectés sera d'autant plus élevé que les longueurs de diffusion seront grandes, c'est-à-dire que les durées de vie seront grandes. Il est possible de calculer la durée de vie des porteurs minoritaires (2). Par exemple, la durée de vie des trous dans la partie de conductivité de type n est fournie par l'équation suivante :

$$\tau_p = \left(\frac{1}{\sigma_p v_{th} N_r}\right)\left[1 + \frac{N_c}{n_{no}} \exp\left(-\frac{E_c - E_r}{kT}\right) + \frac{\sigma_p N_v}{\sigma_n n_{no}} \exp\left(-\frac{E_r - E_v}{kT}\right)\right] \qquad \text{(VIII)}$$

v_{th} est la vitesse de déplacement des électrons du fait de l'agitation thermique qui dépend de la température (1) :

$$1/2\ m_e v_{th}^2 = 3/2\ kT \qquad \text{(IX)}$$

La durée de vie des porteurs (équ. VIII) décroît si les concentrations en dopant, n_{no}, et en centres de recombinaison, N_r, augmentent. En pratique, pour un semiconducteur dont la concentration en dopant a une valeur donnée, la durée de vie des porteurs minoritaires peut prendre différentes valeurs qui dépendent des conditions d'élaboration du cristal semiconducteur, de la durée, de la température de recuit et de la vitesse de refroidissement du cristal. Pour une cellule solaire, la durée de vie des porteurs minoritaires dépend aussi du traitement subi par la surface du semiconducteur en cours de fabrication, de la température de diffusion du dopant dans la base, de la vitesse de refroidissement et de la présence ou de l'absence de paliers de température au cours des opérations de recuit des contacts métalliques. Pour le silicium, l'influence de ces différents paramètres a été attribuée au comportement de l'oxygène dans le matériau. Dans le cas de l'arséniure de gallium de type n, on a constaté que la durée de vie des trous est plus grande si le matériau est dopé au silicium plutôt qu'à l'étain, au soufre, au sélénium ou au tellure car l'atome de silicium s'adapte mieux au réseau cristallin de GaAs que les autres atomes et ainsi le nombre de centres de recombinaison est plus faible. La durée de vie des porteurs minoritaires est plus faible dans les semiconducteurs à transition directe comme GaAs que dans les semiconducteurs à transition indirecte comme le silicium.

5. Vitesse de recombinaison en surface

Les paires électron-trou sont détruites par recombinaison à la surface et à l'intérieur du semiconducteur. Ces recombinaisons en surface sont dues notamment à la présence des états de surface provenant des liaisons non saturées (liaisons pendantes) des atomes de surface, des précipités métalliques et de la couche d'oxyde naturel. La vitesse à laquelle disparaissent les porteurs électron-trou à la surface du semiconducteur est appelée la vitesse de recombinaison en surface, S. La densité du courant en porteurs minoritaires en direction de la surface du semiconducteur est proportionnelle à la vitesse de recombinaison en surface :

$$J_{surf} = qS_p(p_n - p_{no}) \text{ semiconducteur de type n} \qquad \text{(X } a\text{)}$$

$$J_{surf} = qS_n(n_p - n_{po}) \text{ semiconducteur de type p} \qquad \text{(X } b\text{)}$$

Pour éviter de trop grandes pertes en porteurs, cette densité de courant, J_{surf}, doit avoir une valeur minimale. Par conséquent, la vitesse de recombinaison en surface est un paramètre important du fait que le nombre de porteurs créés pour une longueur d'onde donnée est maximal à la surface du semiconducteur, puis décroît exponentiellement avec la profondeur, et son influence est plus grande dans le cas d'un semiconducteur ayant un fort coefficient d'absorption (comme GaAs). Pour une cellule solaire au silicium ou à l'arséniure de gallium, la vitesse de recombinaison en surface est de l'ordre de 10^5 à 10^6 cm.s^{-1}. Certains traitements de décapage du silicium peuvent réduire cette vitesse à 10^2 cm.s^{-1} dans quelques cas.

6. Courant créé par un rayonnement monochromatique

La vitesse de création des paires électron-trou par un rayonnement monochromatique de longueur d'onde λ peut être calculée en fonction de la profondeur à laquelle elles apparaissent dans le semiconducteur (1, 2). On peut calculer, également en fonction de la profondeur, les valeurs de $(p_n - p_{no})$ et de $(n_n - n_{po})$ qui correspondent à l'augmentation de la concentration en porteurs minoritaires due à l'absorption du rayonnement lumineux (1, 2). Les augmentations relatives de la concentration en porteurs minoritaires, c'est-à-dire les rapports $(p_n - p_{no})/p_{no}$ et $(n_p - n_{po})/n_{po}$ peuvent être représentées (figure 5) en fonction du rapport x/x_j, où x est la distance qui sépare la jonction du lieu de création des paires électron-trou et x_j est la profondeur de la jonction (distance entre la jonction et la face avant de la cellule). Pour les faibles longueurs d'onde (rayonnement de forte énergie), le coefficient d'absorption est élevé; la majeure partie des paires

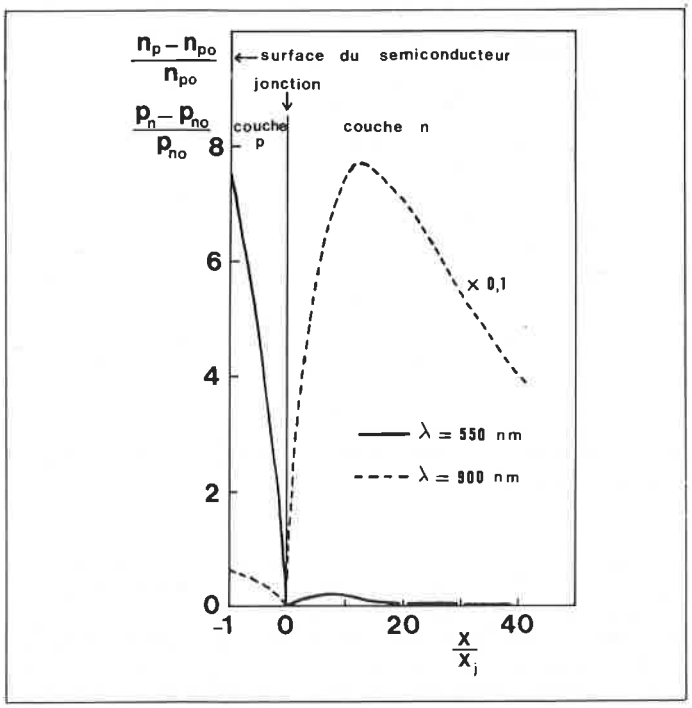

Figure 5. Augmentation relative de la concentration en porteurs en fonction du rapport entre la distance, x, (qui sépare le lieu de création de la paire électron-trou de la jonction), et la profondeur de la jonction, x_j, lorsque la cellule absorbe un rayonnement monochromatique.

électron-trou est créée dans une couche de semiconducteur de faible épaisseur près de la surface (figure 5, $\lambda = 550$ nm). Pour les grandes longueurs d'onde (rayonnement de faible énergie), le coefficient d'absorption est petit ; l'absorption a lieu essentiellement dans la partie du semiconducteur de conductivité de type n (figure 5, $\lambda = 900$ nm) située à une profondeur plus grande. A partir de ces données, le courant de trous qui passent du côté n vers le côté p, J_p, ainsi que le courant d'électrons qui passent du côté p vers le côté n de la jonction, J_n, peuvent être calculés en fonction notamment du flux de photons, $F(\lambda)$, du coefficient de réflexion, $R(\lambda)$, du coefficient d'absorption, $\alpha(\lambda)$, des longueurs de diffusion, L_n et L_p, et des coefficients de diffusion, D_n et D_p, des porteurs minoritaires ainsi que des vitesses de recombinaison en surfaces, S_n et S_p, et de la profondeur de jonction, x_j (1, 2).

7. Réponse spectrale

A chaque photon incident de longueur d'onde suffisamment faible pour créer une paire électron-trou ne correspond pas un électron et un trou pouvant être collectés et contribuer au passage du courant dans le circuit extérieur à la cellule. On appelle réponse spectrale interne ou rendement de collection, SR, le rapport entre le nombre de paires électron-trou collectées lorsque la cellule est en court-circuit et le nombre de photons qui pénètrent dans le semiconducteur. Ce rapport s'exprime de la façon suivante :

$$SR(\lambda) = \frac{J_p(\lambda) + J_n(\lambda)}{qF(\lambda)[1 - R(\lambda)]} \qquad \text{(XI)}$$

La réponse spectrale externe, SR_{ext}, est définie par le rapport entre le nombre de paires électron-trou collectées et le nombre de photons incidents, c'est-à-dire que :

$$SR(\lambda)_{ext} = \frac{J_p(\lambda) + J_n(\lambda)}{qF(\lambda)} \qquad \text{(XII)}$$

et

$$SR(\lambda)_{ext} = SR(\lambda)[1 - R(\lambda)] \qquad \text{(XIII)}$$

La valeur de la réponse spectrale dépend, par conséquent, de la longueur d'onde du rayonnement incident (ou de son énergie). La réponse spectrale interne d'une cellule au silicium n/p ainsi que les contributions individuelles de la base (type p) et de la couche diffusée (type n) peuvent être représentées en fonction de l'énergie du rayonnement incident (figure 6). Aux faibles énergies, le coefficient d'absorption est faible et la majorité des paires électron-trou est créée dans la base mais lorsque l'énergie du photon augmente et devient supérieure à 2,4 eV, les paires sont créées dans la couche diffusée, c'est-à-dire, à une profondeur plus faible.

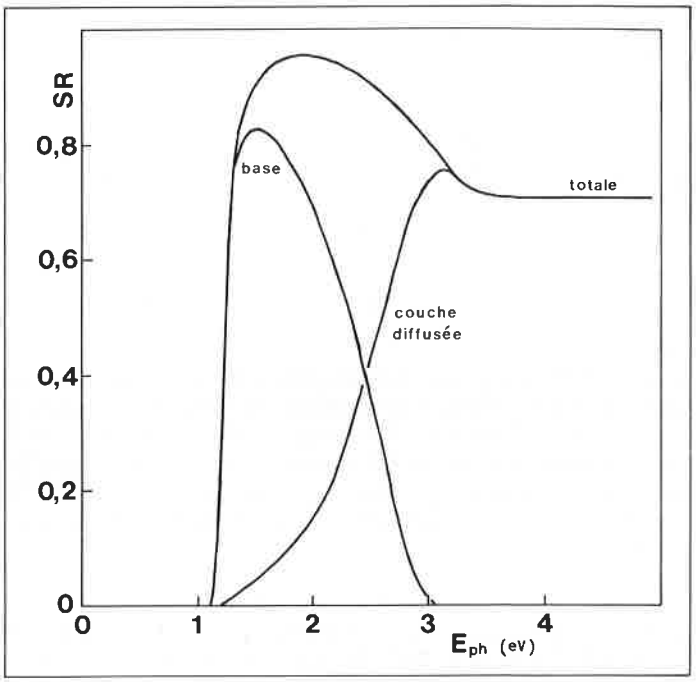

Figure 6. Réponse spectrale interne calculée d'une cellule au silicium n/p en fonction de l'énergie des photons et contributions individuelles de la base et de la couche diffusée.

L'allure de la courbe, qui représente la réponse spectrale en fonction de l'énergie des photons (figure 6), est comparable à celle de la courbe qui traduit les variations de l'augmentation relative de la concentration en porteurs minoritaires en fonction du rapport x/x_j (figure 5).

La réponse spectrale interne d'une cellule au silicium n/p uniformément dopé peut être représentée en fonction de l'énergie du rayonnement incident pour différentes valeurs de la résistivité de la base et de la vitesse de recombinaison en surface (figure 7). En augmentant la concentration en dopant dans la base (ou en utilisant un substrat de silicium de résistivité plus faible), on abaisse la durée de vie et la longueur de diffusion des porteurs minoritaires dans la base ce qui augmente les pertes en porteurs créés à une certaine profondeur dans le silicium et, par conséquent, dégrade la réponse spectrale à basse énergie. Avec des photons de grande énergie, la majorité des paires électron-trou est créée près de la surface car le coefficient d'absorption est élevé. Par conséquent, les pertes dues à de grandes vitesses de recombinaison en surface ou les pertes dues à de faibles durées de vie dans la zone diffusée (de type n) seront importantes. Au-delà d'une énergie de 3,5 eV, la réponse spectrale dépend entièrement de la région de surface (de type n). Pour les faibles valeurs de la vitesse de recombinaison en surface, S_p, la réponse spectrale se stabilise à une valeur assez grande (valeur de saturation) indépendante de la longueur d'onde du rayonnement lumineux.

La présence d'un revêtement antireflet sur la surface du semiconducteur évite la perte d'une partie du rayonnement lumineux par réflexion et améliore la réponse spectrale. Le pourcentage de lumière réfléchie dépend de l'angle d'incidence et

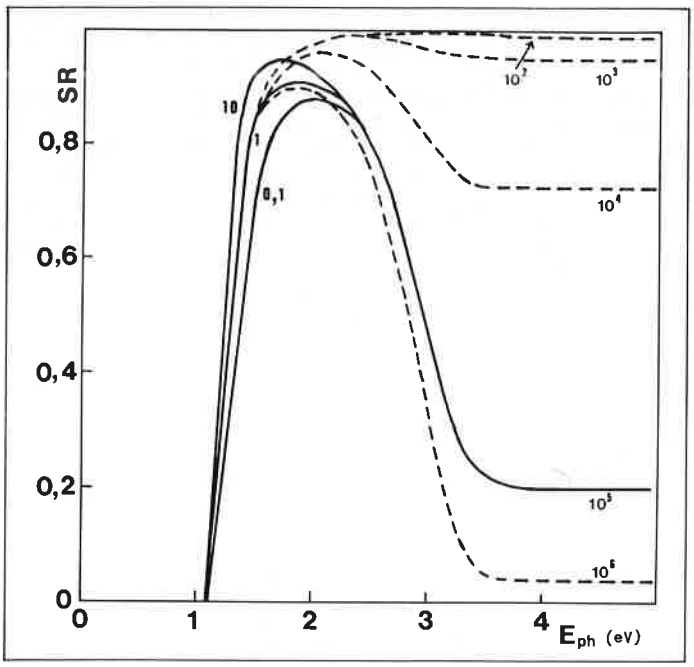

Figure 7. Réponse spectrale interne calculée d'une cellule au silicium n/p en fonction de l'énergie des photons ; courbes en trait continu : résistivité de la base = 0,1 ; 1 et 10 Ω.cm et vitesse de recombinaison en surface = 10^5 cm.s^{-1} ; courbes en trait discontinu : vitesse de recombinaison en surface = 10^2, 10^3, 10^4 et 10^6 cm.s^{-1} et résistivité de la base = 1 Ω.cm.

de la constante diélectrique du matériau. En incidence normale, le coefficient de réflexion, R(λ), est fourni par la relation suivante :

$$R = \frac{(n-1)^2 + (\lambda\alpha/4\pi)^2}{(n+1)^2 + (\lambda\alpha/4\pi)^2} \qquad \text{(XIV)}$$

avec $n = n_2/n_1$, n_1 et n_2 étant les indices de réfraction de l'air et du semiconducteur. Pour le silicium, le terme $(\lambda\alpha/4\pi)^2$ est négligeable et n = 3,5 pour une longueur d'onde de 1,1 μm ; par conséquent, 30 % environ de la lumière incidente est réfléchie. Pour réduire la valeur du coefficient de réflexion, on peut utiliser un revêtement dont l'indice de réfraction a une valeur comprise entre n_1 et n_2, la valeur idéale étant $\sqrt{n_1 n_2}$. Le monoxyde de silicium, SiO, et les oxydes de titane et de tantale, TiO_2 et Ta_2O_5, sont les revêtements antireflets les plus utilisés.

8. Le courant en court-circuit

L'intensité du courant en court-circuit, I_{sc}, est une caractéristique importante pour une cellule solaire et on montrera (paragraphe 9) que cette intensité est égale à l'intensité du courant créé par le rayonnement lumineux qui est appelé le photocourant. La densité de ce photocourant, J_{ph}, est fournie en fonction de la longueur d'onde par la relation suivante (2) :

$$J_{ph}(\lambda) = qF(\lambda)SR(\lambda)_{ext} \qquad \text{(XV)}$$

Si on utilise un rayonnement polychromatique comme le rayonnement solaire, on aura la relation :

$$J_{ph}(\lambda) = q \int_0^{\infty} F(\lambda)\ SR(\lambda)_{ext}\ d\lambda \qquad \text{(XVI)}$$

F(λ) est le nombre de photons du rayonnement solaire incident par cm^2 et par seconde dont la longueur d'onde est comprise entre (λ − 5 nm) et (λ + 5 nm) ; ce flux de photons est fonction de la longueur d'onde (figure 8). L'abréviation, AMO, signifie Air Mass O ; le spectre solaire correspondant (figure 8) a été obtenu à

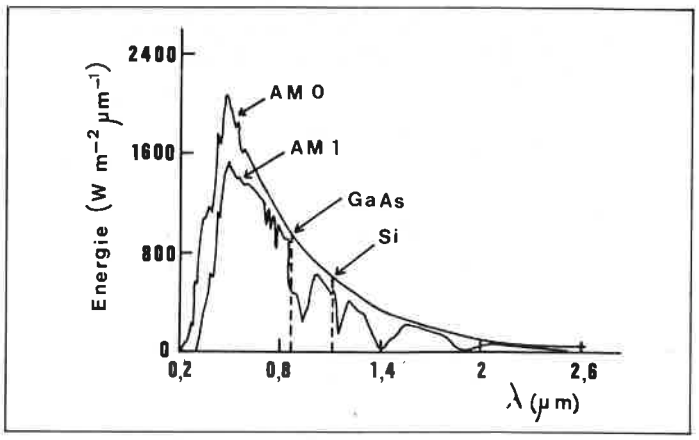

Figure 8. Spectre solaire dans les conditions d'éclairement AM 0 et AM 1.

l'extérieur de l'atmosphère. L'abréviation, AM1, signifie Air Mass 1 ; le chiffre 1 est la valeur de la sécante (inverse du cosinus) de l'angle que font les rayons du soleil avec la normale à la surface de la terre. Le spectre solaire correspondant aux conditions AM1 a été obtenu sur terre au niveau de la mer, par temps clair, le soleil étant au zénith (l'angle entre les rayons du soleil et la normale est nul). Dans les conditions AM2 (Air Mass 2), le spectre solaire est obtenu sur terre au niveau de la mer, par temps clair et pour un angle de 60° entre les rayons du soleil et la normale à la surface de la terre.

Le nombre total de photons disponibles, au niveau de la mer, obtenu en intégrant la courbe de la figure 8, est de $4{,}8 \times 10^{17}$ cm^{-2} s^{-1}. Compte tenu de leurs largeurs de bande interdite respectives, le nombre maximal de photons que peut absorber le silicium est de $3{,}7 \times 10^{17}$ cm^{-2} s^{-1} et l'arséniure de gallium de $2{,}5 \times 10^{17}$ cm^{-2} s^{-1}. Autrement dit, 77 % des photons solaires peuvent produire des paires électron-trou dans le silicium et 52 % seulement dans l'arséniure de gallium. Par conséquent, les semiconducteurs, qui ont une largeur de bande interdite élevée (comme GaAs), fournissent des courants en court-circuit d'intensité plus faible que les semiconducteurs à faible largeur de bande interdite (comme Si). Ceci ne signifie pas, pour autant, que le silicium est un semiconducteur plus intéressant que l'arséniure de gallium, car les matériaux dont la largeur de bande interdite est élevée fournissent des tensions en circuit ouvert plus grandes.

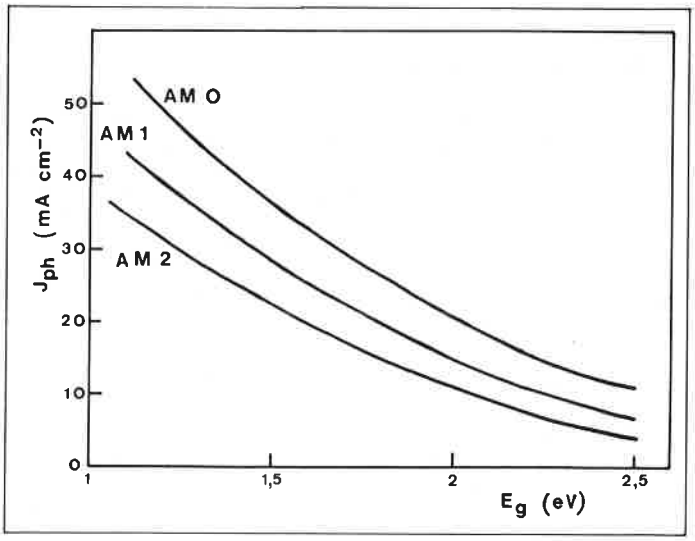

Figure 9. Densité du courant en court-circuit idéal ou du photocourant en fonction de la largeur de bande interdite du semiconducteur pour une réponse spectrale égale à 1 et dans différentes conditions d'éclairement.

La densité du courant en court-circuit peut être représentée en fonction de la largeur de bande interdite (figure 9) dans le cas idéal où la réponse spectrale est égale à 1 pour tous les photons d'énergie supérieure à E_g et à zéro pour tous les photons d'énergie inférieure à E_g. En pratique, la valeur de l'intensité du courant en court-circuit, I_{sc}, est toujours inférieure à la valeur idéale (figure 9) à cause des pertes dues aux recombinaisons à la surface et à l'intérieur du semiconducteur. En réduisant les vitesses de recombinaison en surface et en augmentant les longueurs de diffusion des porteurs minoritaires dans la couche diffusée et dans la base, ces pertes devraient être réduites et l'intensité du courant devrait tendre vers la valeur idéale. Ceci est difficile à réaliser concrètement car ces paramètres dépendent fortement des propriétés du semiconducteur et des procédés d'élaboration et de fabrication des cellules. Il y a essentiellement deux possibilités pour réduire les pertes par recombinaison et pour améliorer la valeur de l'intensité du courant en court-circuit ; elles consistent à réduire la profondeur, x_j, de la jonction et à réaliser des bases avec un dopage non uniforme (2). L'influence des grandes vitesses de recombinaison en surface et des faibles durées de vie devient moins importante lorsque la profondeur de la jonction est faible car la majeure partie du courant provient alors des paires électron-trou créées dans la base (figure 10).

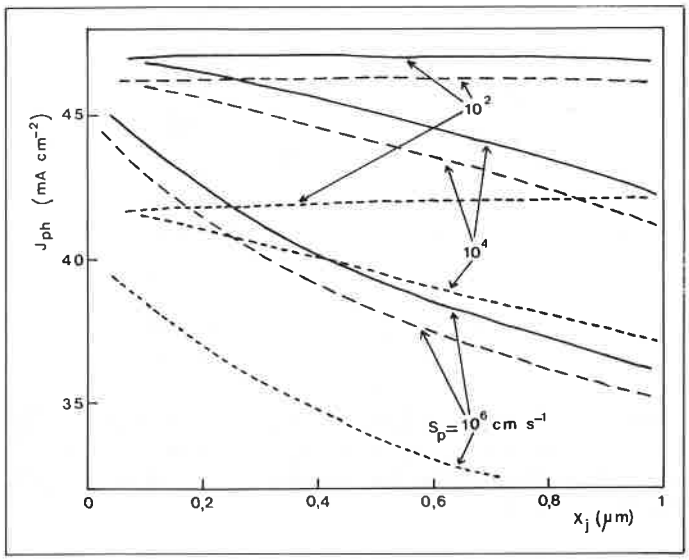

Figure 10. Densité du photocourant ou du courant en court-circuit calculée en fonction de la profondeur de la jonction pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison en surface et différentes résistivités de la base ; courbes en trait continu : 10 Ω.cm, courbes en trait discontinu : 1 Ω.cm et courbes en pointillé : 0,1 Ω.cm.

9. Circuit électrique équivalent à une cellule solaire

Le mécanisme de l'effet photovoltaïque est représenté schématiquement sur la figure 4*b*. Lorsque la jonction p-n est éclairée par le rayonnement solaire, il apparaît à l'intérieur de la diode un courant d'électrons qui se déplacent vers le côté n et un courant de trous qui se déplacent vers le côté p de la jonction. La diode est traversée par un courant analogue à celui qui circule dans la diode en polarisation inverse. L'intensité, I_{ext}, du courant disponible aux bornes de la cellule et qui traverse le circuit extérieur est égale à l'intensité, I_{ph}, du courant créé par la lumière (photocourant) diminuée de l'intensité, I_{obs}, du courant interne à la diode polarisée en inverse dans l'obscurité ; l'intensité, I_{obs}, est fournie par la relation suivante (3-5) :

$$I_{obs} = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \qquad \text{(XVII)}$$

V est la tension appliquée aux bornes de la jonction et I_0 est le courant de saturation de la diode en polarisation inverse.

Le circuit électrique équivalent à la cellule solaire est représenté schématiquement sur la figure 11. Dans ce circuit, interviennent des résistances en série, R_s, et des résistances en parallèle ou résistances de shunt, R_{sh}. Les résistances en série proviennent des résistances de contact et des résistances de la base et de la couche diffusée. Les résistances en parallèle sont introduites dans le circuit pour rendre compte des pertes de courant qui circule en surface par les bords de la cellule et qui s'écoule par diffusion le long des dislocations et des joints de grains du semiconducteur. L'intensité, I_{ext}, du courant débité par la cellule est liée à la tension, V_{ext}, aux bornes de la cellule par l'équation suivante :

$$I_{ext}\left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) = I_{ph} - \frac{V_{ext}}{R_{sh}} - I_{obs} \qquad \text{(XVIII)}$$

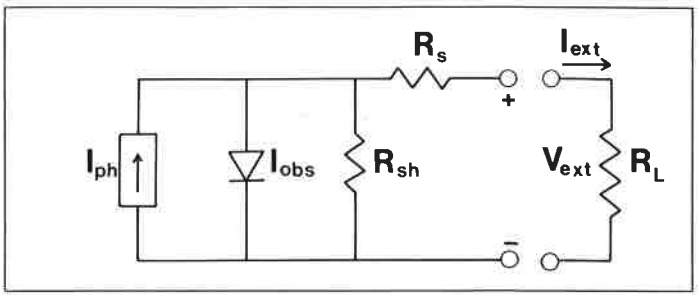

Figure 11. Circuit électrique équivalent à une cellule solaire.

En négligeant l'influence des résistances en série et en parallèle, l'équation (XVIII) s'écrit plus simplement :

$$I_{ext} = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV_{ext}}{A_0 kT}\right) - 1 \right] \qquad \text{(XIX)}$$

A_0 est le facteur de perfection de la cellule dont la valeur minimale est 1 pour une cellule parfaite. D'après l'équation (XIX), l'intensité du courant en court-circuit est égale à :

$$I_{sc} = I_{ph} \qquad \text{(XX)}$$

et la tension en circuit ouvert est fournie par l'expression suivante :

$$V_{oc} = A_0 \frac{kT}{q} \operatorname{Log}\left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1\right) \qquad \text{(XXI)}$$

Par conséquent, l'intensité du courant en court-circuit est directement proportionnelle à l'énergie des photons tandis que la tension en circuit ouvert est proportionnelle au logarithme de l'énergie des photons.

La caractéristique intensité-tension d'une cellule solaire au silicium de 4 cm^2 de surface éclairée dans différentes conditions est représentée sur la figure 12. Dans les conditions d'éclairement AM1, la puissance reçue sur le sol est de 1 kW/m^2, c'est-à-dire, 1 sun. La puissance électrique disponible aux bornes de la cellule est égale à :

$$P_{ext} = I_{ext}V_{ext} = I_{ph}V_{ext} - I_0 V_{ext}\left[\exp\left(\frac{qV_{ext}}{A_0 kT}\right) - 1\right] \qquad \text{(XXII)}$$

La puissance maximale est fournie par l'expression suivante :

$$P_{ext}(\max) = I_m V_m \qquad \text{(XXIII)}$$

La cellule solaire peut débiter cette puissance maximale, $P_{ext}(\max)$, à condition que la valeur de la résistance R_L du circuit extérieur soit correctement ajustée. Cette adaptation est très importante pour une utilisation correcte des systèmes photovoltaïques. Le

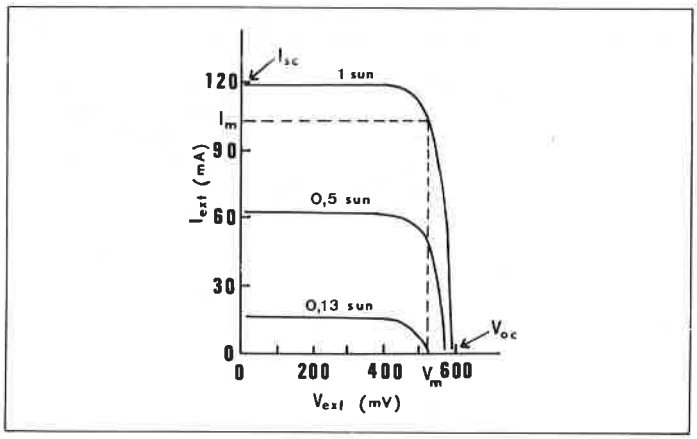

Figure 12. Caractéristiques intensité-tension d'une cellule solaire classique au silicium de 4 cm² de surface pour différentes valeurs de la puissance du rayonnement solaire (1 sun = 1 kW/m²).

rapport FF entre la puissance maximale réelle que la cellule fournit et la puissance théorique maximale qu'elle pourrait fournir (Fill Factor) caractérise la qualité de la cellule :

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} \qquad \text{(XXIV)}$$

Ce rapport FF doit avoir la valeur la plus élevée possible.

Optimiser une cellule solaire consiste à faire en sorte que I_m tende vers I_{sc} et V_m vers V_{oc} (c'est-à-dire à faire tendre les rapports I_m/I_{sc}, V_m/V_{oc} et FF vers 1) et à avoir les valeurs de I_{sc} et de V_{oc} les plus grandes possibles. En considérant le spectre solaire (figure 8), on observe que l'intensité du courant en court-circuit, I_{sc}, décroît si la largeur de la bande interdite du semiconducteur augmente. De plus, le courant de saturation de la diode en polarisation inverse, I_0, est proportionnel à $\exp(-E_g/kT)$ (1). Par conséquent, la tension en circuit ouvert, V_{oc}, est directement proportionnelle à la largeur de bande interdite. Si, lorsque la largeur de bande interdite augmente, I_{sc} décroît et V_{oc} croît, la puissance théorique maximale que peut débiter la cellule ($I_{sc} \times V_{oc}$) passe par un maximum. De plus, la tension en circuit ouvert, V_{oc}, augmente avec l'augmentation de la concentration en dopant, c'est-à-dire que le courant de saturation I_0 diminue si la concentration en dopant augmente et, si I_0 diminue, la tension V_{oc} augmente (équation (XXI). L'intensité du courant en court-circuit, I_{sc}, est relativement indépendante de la concentration en dopant. La puissance délivrée par la cellule devrait, par conséquent, croître de façon continue avec l'augmentation de la concentration en dopant. En pratique, on constate que la tension V_{oc} et la puissance de la cellule passent par une valeur maximale pour une concentration en dopant inférieure à 10^{17} at/cm³. Si la concentration en dopant est plus grande, le courant de recombinaison dans la charge d'espace de la jonction devient significatif lorsque la cellule est dans l'obscurité et la tension, V_{oc}, décroît.

Une augmentation des résistances en série entraîne une diminution de la valeur de I_{sc}, au contraire, la valeur de V_{oc} reste constante (figure 13 *a*). Une diminution de la valeur des résistances en parallèle provoque une diminution de V_{oc} mais la valeur de I_{sc} reste constante (figure 13*b*). L'optimisation de la cellule consiste aussi à avoir de très faibles résistances en série et de très grandes résistances en parallèle. En pratique, la résistance en parallèle, R_{sh}, est suffisamment grande pour n'avoir aucune influence sur l'allure de la caractéristique intensité-tension lorsque l'énergie du rayonnement lumineux est supérieure ou égale à 1 kW/m². En revanche, aux faibles énergies et à basse température, les résistances en parallèle prennent de l'importance. L'influence des résistances en série, R_s, est importante pour les rayonnements de grande énergie et à haute température. Pour diminuer la valeur des résistances en série, on peut utiliser un semiconducteur fortement dopé et des

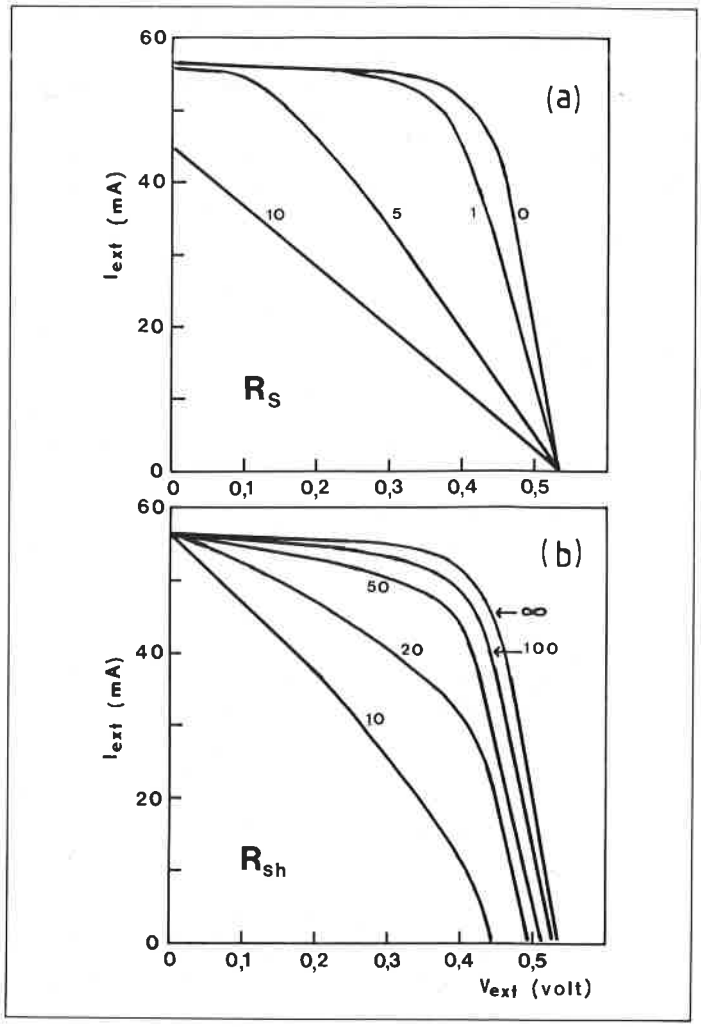

Figure 13. Caractéristiques intensité-tension d'une cellule solaire au silicium : (a) influence des résistances en série (10, 5, 1 et 0 Ω), (b) influence des résistances en parallèle (∞, 100, 50, 20 et 10 Ω).

jonctions p-n profondes mais alors on réduit la durée de vie et la longueur de diffusion des porteurs minoritaires et, par conséquent, la réponse spectrale. Il est donc nécessaire d'adopter un compromis qui consiste à utiliser une couche diffusée peu épaisse et fortement dopée et à optimiser la forme des contacts de manière à avoir une faible résistance (ohmique) de contact en ne métallisant que 5 à 10 % de la face avant de la cellule qui est exposée au rayonnement lumineux. La résistance en série peut être abaissée, par exemple, en augmentant le nombre de doigts métalliques et en diminuant leur largeur ainsi que l'écart entre les doigts.

10. Rendement de conversion

Le rendement de conversion η d'une cellule solaire est défini par le rapport suivant :

$$\eta = \frac{I_m V_m}{P_{in}} \qquad \text{(XXV)}$$

La puissance du rayonnement incident P_{in} est fournie par l'équation suivante :

$$P_{in} = A_t \int_0^{\infty} F(\lambda) \frac{hc}{\lambda} d\lambda \qquad \text{(XXVI)}$$

En considérant que l'influence des résistances en série et en

parallèle est négligeable, l'expression du rendement de conversion s'écrit de la façon suivante :

$$\eta = \frac{FF\left(\frac{A_0 kT}{q}\right) \text{Log}\left(\frac{I_{sc}}{I_0}+1\right) qA_a \int_0^\infty F(\lambda)\ SR(\lambda)_{ext}\, d\lambda}{A_t \int_0^\infty F(\lambda)\ \frac{hc}{\lambda}\, d\lambda} \qquad \text{(XXVII)}$$

A_t est la surface totale de la face avant de la cellule qui est éclairée par le rayonnement et A_a est la surface active, c'est-à-dire la surface non métallisée de la face avant.
Le rendement de conversion de la cellule dépend de la largeur de bande interdite du semiconducteur utilisé. De façon à déterminer la valeur optimale de la largeur de la bande interdite, on calcule le rendement de conversion limite, η_{id}, en se plaçant dans les conditions idéales qui consistent à admettre que tous les photons d'énergie supérieure ou égale à la largeur de bande interdite du semiconducteur sont absorbés, que tous les porteurs créés par ces photons sont collectés et contribuent au passage du courant dans le circuit extérieur, que l'influence des résistances en série et en parallèle est négligeable, que la quantité de lumière réfléchie sur la surface de la cellule ainsi que la surface occupée par les doigts métalliques sont négligeables. Le rendement de conversion limite ou idéal, η_{id}, est fourni par l'expression suivante :

$$\eta_{id} = \frac{FFA_a q n_{ph}(E_g)\ \frac{kT}{q}\ \text{Log}\left[\frac{q n_{ph}(E_g)}{J_0}+1\right]}{A_t \int_0^\infty F(\lambda)\ \frac{hc}{\lambda}\, d\lambda} \qquad \text{(XXVIII)}$$

$n_{ph}(E_g)$ représente le nombre de photons incidents par cm^2 et par seconde et d'énergie supérieure à E_g; $qn_{ph}(E_g)$ est la densité du courant en court-circuit qui est représentée en fonction de E_g dans la figure 9. Le rendement de conversion idéal varie avec la largeur de bande interdite du semiconducteur (figure 14); sa valeur est maximale pour $E_g = 1{,}5$ eV. Le rendement de conversion d'une cellule sera d'autant plus élevé que l'intensité du courant en court-circuit, la tension en circuit ouvert et le rapport FF seront élevés.

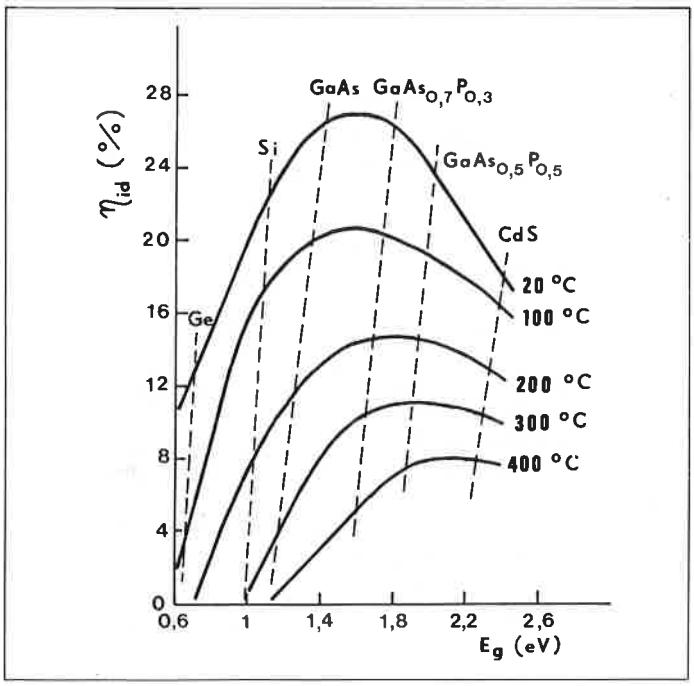

Figure 14. Rendement de conversion idéal calculé en fonction de la largeur de bande interdite du semiconducteur.

Pour obtenir une forte intensité de courant en court-circuit, il faut que la réponse spectrale soit élevée (valeur proche de 1) dans le domaine visible et infrarouge. Pour avoir une grande tension en circuit ouvert, il faut que la diode soit traversée par un faible courant en polarisation inverse dans l'obscurité et il faut de très grande résistance en parallèle. La valeur du rapport FF est élevée à condition que le courant qui traverse la diode en polarisation directe dans l'obscurité soit faible, que la valeur du facteur de perfection tende vers 1, que les résistances en série soient faibles (moins de 1 Ω pour 1 cm^2) et que les résistances en parallèle soient fortes (supérieures à 10^4 Ω). Les semiconducteurs à largeur de bande interdite élevée donnent une tension et un rapport FF dont les valeurs théoriques sont plus grandes que celles fournies par les semiconducteurs à largeur de bande interdite plus faible alors que ces derniers fournissent des intensités de courant plus élevées. Le rendement de conversion passe, par conséquent, par un maximum (figure 14).

Il est possible de comparer les rendements de conversion limites fournis par différents semiconducteurs, mais pour cela il est nécessaire d'admettre que la mobilité et la durée de vie des porteurs minoritaires, la concentration en dopant, la densité des états de surface ont des valeurs identiques pour tous les matériaux. En réalité, les longueurs de diffusion, les durées de vie des porteurs, le fait que le semiconducteur soit à transition directe ou indirecte sont des paramètres qui ont une grande influence sur le rendement des cellules de sorte que le rendement réel d'une cellule peut être situé soit au-dessus, soit au-dessous de la courbe idéale (figure 14). Le silicium ($E_g = 1{,}12$ eV), GaAs ($E_g = 1{,}43$ eV) et CdTe ($E_g = 1{,}5$ eV) sont des semiconducteurs dont la valeur de la largeur de bande interdite les situe très près du maximum du rendement de conversion idéal.

11. Autres paramètres

Dans des conditions particulières d'utilisation, il est nécessaire de tenir compte d'autres paramètres de fonctionnement comme l'épaisseur de la couche de semiconducteur, l'existence de radiations, la température de la cellule ou l'intensité du rayonnement lumineux incident (2).

La réduction de l'épaisseur du semiconducteur aboutit à une diminution du coût de la cellule et du rapport entre la puissance fournie et la masse du dispositif. Mais cette réduction d'épaisseur peut entraîner des pertes de puissance dues, d'une part à la transmission complète à travers la couche de semiconducteur des rayonnements de grandes longueurs d'onde et, d'autre part, au plus grand nombre de recombinaisons des porteurs au niveau du contact ohmique de la face arrière du dispositif. L'intensité du courant en court-circuit, I_{sc}, d'une cellule solaire au silicium subit une réduction (par rapport à sa valeur maximale) de 8 %, 30 % ou 75 % lorsque l'épaisseur de silicium est de 100, 10 ou 1 µm. Pour une cellule solaire à l'arséniure de gallium, la diminution du courant n'est appréciable que si l'épaisseur devient inférieure à 2 µm.

Les cellules solaires utilisées à bord des engins spatiaux sont soumises à l'effet de radiations cosmiques qui peuvent créer des défauts de structure dans le semiconducteur. Les particules de faible énergie créent des dommages au voisinage de la jonction ce qui augmente le courant dans l'obscurité, I_{obs}, et abaisse la tension en circuit ouvert, V_{oc}. Les particules de grande énergie pénètrent plus profondément dans le semiconducteur et atteignent la base. La présence des défauts créés dans cette partie provoque une diminution de la durée de vie des porteurs (augmentation du nombre de centres de recombinaison) et de l'intensité du courant en court-circuit, I_{sc}.

L'influence de la température et de l'intensité du rayonnement lumineux incident doit être envisagée pour les applications spatiales et pour les utilisations terrestres avec systèmes optiques de concentration du rayonnement solaire. Les longueurs de diffusion des porteurs minoritaires (équations (IV, VIII et IX) augmentent avec l'augmentation de la température du semiconducteur et, par conséquent, l'intensité du courant en court-

circuit, I_{sc}, augmente. Cette augmentation est plus forte dans le cas de l'arséniure de gallium que pour le silicium. En revanche, la tension en circuit ouvert, V_{oc}, décroît fortement avec l'augmentation de température car l'intensité du courant, I_{obs}, qui traverse la jonction dans l'obscurité augmente. Le rendement de conversion des cellules solaires au silicium diminue avec l'élévation de la température (0,04 à 0,06 %/°C) de sorte que les cellules deviennent pratiquement inutilisables au-dessus de 200 °C. Le rendement des cellules à l'arséniure de gallium reste constant ou même peut s'améliorer légèrement avec l'augmentation de température, mais au-delà de 80 °C, il décroît (0,02 à 0,03 %/°C) et ces cellules sont inutilisables au-dessus de 350 °C. L'intensité du courant en court-circuit, I_{sc}, est proportionnelle à l'intensité du rayonnement lumineux (équation XX) tandis que la tension en circuit ouvert, V_{oc}, varie de manière logarithmique avec l'intensité lumineuse (équation XXI). Les cellules solaires au silicium et à l'arséniure de gallium ont un rendement de conversion qui augmente légèrement avec l'augmentation de l'intensité du rayonnement incident jusqu'à un point où l'amélioration de la tension en circuit ouvert ne compense plus la diminution du rapport FF (équation XXIV) à cause de l'influence des résistances en série. Pour des applications terrestres, l'intensité du rayonnement solaire peut être multipliée de façon avantageuse, par un facteur 100 pour des cellules au silicium ou par un facteur 1 000 pour des cellules à l'arséniure de gallium, en utilisant un système optique de concentration.

12. Conclusion

Bien que le silicium ne soit pas, *a priori*, le semiconducteur le plus intéressant, il fait l'objet actuellement d'un très gros effort de recherche. L'élaboration de monocristaux de silicium de pureté électronique par la méthode Czochralski est bien maîtrisée et les plaquettes de silicium découpées dans les barreaux obtenus par cette méthode sont utilisées depuis longtemps pour la réalisation de circuits intégrés. Le coût de production élevé et le faible rendement de conversion des cellules réalisées à partir du silicium monocristallin de pureté électronique constituent actuellement les principaux obstacles à leur utilisation comme source d'énergie terrestre. Les programmes de recherche en cours et notamment le programme américain du Département de l'énergie ont pour objectifs essentiels de réduire le coût des matériaux en développant de nouveaux procédés d'élaboration, de réduire le coût de fabrication des cellules, des panneaux et autres accessoires en développant la production industrielle et d'augmenter le rendement de conversion en améliorant la quantité des matériaux et la conception des cellules et en utilisant des dispositifs optiques pour concentrer le rayonnement solaire. Le programme américain prévoit, pour 1986, la production industrielle et la commercialisation de la première génération de panneaux solaires à faible coût équipés de cellules au silicium. Les recherches devraient aboutir, entre 1986 et 2000, à la mise au point de la deuxième génération de capteurs équipés de cellules constituées par d'autres semiconducteurs. Un certain nombre d'articles de synthèse (6-10) faisant le point sur l'état actuel des recherches concernant les matériaux semiconducteurs pour cellules solaires sont parus récemment.

Bibliographie

(1) E. S. Yang, « Fundamentals of semiconductor devices », McGraw-Hill Ed., New York (1978).
(2) H. J. Hovel, « Solar cells, semiconductor and semimetals », vol. 11, A. C. Beer and R. K. Willardson Ed., Academic Press, New York (1975).
(3) S. M. Sze, « Physics of semiconductor devices », John Wiley and Sons Ed., New York (1969).
(4) A. S. Grove, « Physique et technologie des dispositifs à semiconducteur », Dunod Ed., Paris (1971).
(5) P. Leturcq et G. Rey, « Physique des composants actifs à semiconducteurs », Dunod Ed., Paris (1978).
(6) H. J. Hovel, *Chemtech*, 1979, **9** (3), 191.
(7) H. J. Hovel, *Solar energy mater.*, 1980, **2**, 277.
(8) S. Pizzini, *Mater. Chem.*, 1979, **4**, 335.
(9) M. Rodot, *Le Vide*, Les couches minces, « Proceedings of 8th International vacuum Congress », Suppl. n° 201, vol. 1, 1980, p. 685.
(10) M. Sittig, « Solar cells for photovoltaic generation of electricity, materials, devices and applications », Noyes Data Corp. Ed., Park Ridge (1979).

A nos lecteurs

L'actualité chimique vous parvient, souvent, alors que les dates de certaines réunions, qui y sont annoncées, sont dépassées.
Nous avons pu constater, en interrogeant les abonnés de diverses régions de France, que la livraison de notre revue peut demander 15 jours voire 3 semaines.
Le Ministère des P.T.T. reconnaît volontiers que, si l'acheminement des hebdomadaires se fait « normalement », la distribution des mensuels, en revanche, s'effectue dans des délais, le plus souvent, trop longs.
En conséquence, nous demandons à tous ceux qui désirent annoncer des réunions par le canal de *L'actualité chimique*, de tenir compte de ces délais et de faire, en sorte, que les réunions annoncées paraissent au moins un mois à l'avance dans notre revue.
Nous rappelons que la sortie des presses de *L'actualité chimique* est fixée au 10 de chaque mois (entre le 15 et le 20 juin pour le fascicule de juin-juillet). La Rédaction doit recevoir les textes des annonces 3 semaines avant cette date.