



HAL
open science

Etude de la conversion photovoltaïque : effets des résistances parasites des photopiles

P.H. Nguyen, Christine Michel, J. Bottin

► **To cite this version:**

P.H. Nguyen, Christine Michel, J. Bottin. Etude de la conversion photovoltaïque : effets des résistances parasites des photopiles. *Revue de Physique Appliquée*, 1983, 18 (12), pp.775-779. 10.1051/rphysap:019830018012077500 . jpa-00245146

HAL Id: jpa-00245146

<https://hal.science/jpa-00245146>

Submitted on 4 Feb 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Classification
 Physics Abstracts
 84.60J — 72.40

Etude de la conversion photovoltaïque : effets des résistances parasites des photopiles

P. H. Nguyen, C. Michel et J. Bottin

Laboratoire d'Electronique et de Physique des Interfaces, Institut des Sciences de l'Ingénieur de Nancy,
 Parc Robert Bentz, 54500 Vandœuvre, France

(Reçu le 29 juillet 1983, accepté le 13 septembre 1983)

Résumé. — A partir du schéma équivalent électrique habituel nous développons une méthode de calcul du rendement (η) et du facteur de courbe (f) qui tient compte de la résistance série et de la conductance shunt de la photopile. L'effet de ces derniers paramètres est plus drastique sur le rendement que sur le facteur de courbe. Des expressions semi-empiriques en fonction de la résistance réduite et de la conductance réduite sont déduites des calculs de simulation.

Abstract. — From the conventional equivalent circuit of a solar cell we present a method for computing the efficiency (η) and the fill factor (f) as a function of the parasitic series resistance and shunt conductance. The effects of these parameters are more drastic on the efficiency than on the fill factor. Semi-empirical expressions for η and f are deduced from the simulation on computer.

1. Introduction.

Les cellules solaires sont des dispositifs qui convertissent la lumière solaire en énergie électrique. Bien qu'elles ne deviennent que depuis peu intéressantes du point de vue économique, les principes sur lesquels elles sont basées ont été connus depuis longtemps.

En 1839 Becquerel [1] a étudié le courant produit entre deux électrodes métalliques dans un électrolyte avec une électrode illuminée par le soleil. La photoconductivité dans le sélénium fut découverte par Smith [2] en 1873. Peu après, Adams et Day [3] ont étudié l'effet de la lumière sur les courants traversant le sélénium avec des contacts en platine. Ils ont trouvé ultérieurement qu'une force électromotrice pourrait être induite à travers les échantillons lorsqu'ils sont illuminés. L'existence de cette f.é.m. fut confirmée par Fritts [4] qui fabriqua une cellule en Se avec une contre électrode en or et par Minchin [5] dont les cellules furent des structures Al/Electrolyte/Se/Al ayant des phototensions supérieures à 0,5 volt à la lumière du jour. Il semble aussi que Minchin soit la première personne à suggérer que les cellules photovoltaïques ou photopiles pourraient être utilisées pour produire de l'électricité avec la lumière solaire. Et depuis, des études ont été poursuivies sur des cellules en sélénium, oxyde de cuivre et sulfure de cuivre... Le développement de la technologie de diffusion du bore a pro-

duit des cellules stables au silicium à 6 % [6] en 1954. Prince [7] a publié en 1955 la première étude analytique du rendement photovoltaïque et ensuite Loferski [8] a montré qu'il existe une bande interdite optimale de l'ordre de 1,5 eV pour une photopile à homojonction p-n. Ces résultats ont stimulé des études sur d'autres matériaux tels que l'arséniure de gallium, le tellure de cadmium et le phosphore d'indium.

La force mobilisatrice derrière le développement intensif des cellules solaires jusqu'en 1970 fut les programmes spatiaux. Les premières cellules furent mises sur orbite en mars 1958 puisque, à cette époque, elles ont été utilisées pour fournir la puissance électrique dans les missions spatiales. L'année 1973 fut celle de la crise mondiale de l'énergie. Et on reconnaît depuis que les sources d'énergie renouvelables deviendraient primordiales dans les prochaines décennies et le développement des cellules solaires pour l'utilisation terrestre devient de plus en plus répandu.

2. Cellule photovoltaïque idéale.

La première étape dans la conversion de la lumière solaire en énergie électrique est l'absorption de la lumière par le semiconducteur. Lorsqu'un photon d'énergie supérieure à la bande interdite du semiconducteur est absorbé, un électron est excité et passe de la bande de valence à la bande de conduction.

L'absorption de tels photons produit aussi une augmentation de la densité d'électrons dans la bande de conduction et une augmentation exactement égale de la densité de trous dans la bande de valence. Ces densités dépassent les valeurs des concentrations à l'équilibre, les électrons et les trous ont donc tendance à se recombiner. La présence de ces porteurs réduit simplement la résistivité du matériau mais ne peut créer une tension, autrement dit une puissance électrique en sortie, à moins qu'il y ait une non-homogénéité dans le système. Elle est due à une illumination non uniforme, à la présence de matériaux hétérogènes ou au dopage non uniforme de matériau homogène [9]. Cette non-homogénéité implique la séparation de porteurs photogénérés et produit ainsi une phototension alors que le déplacement de ces porteurs et leur recombinaison après séparation produit le photocourant.

Une cellule photovoltaïque est donc un dispositif optoélectronique à semiconducteur qui, sous une excitation optique, produit des paires électron-trous au voisinage d'une jonction dont le champ électrique interne collecte ces porteurs photogénérés. En effet, la conversion photovoltaïque est l'effet inverse de l'électroluminescence, laquelle convertit l'énergie électrique en radiation lumineuse. A l'obscurité, le comportement d'un tel dispositif peut être assimilé à la caractéristique $J \sim \exp(qV/kT) - 1$ d'une jonction p-n idéale. Sous illumination, une composante additionnelle de courant apparaît, ce qui provoque un décalage de la caractéristique le long de l'axe du courant par une quantité $-J_{sc}$, où J_{sc} est la densité de courant de court-circuit et est pratiquement indépendante de la tension. On prend habituellement le signe opposé pour le flux de courant alimentant une charge passive. La forme élémentaire de la caractéristique d'une photopile devient alors,

$$-J = J_{sc} - J_{s1}[\exp(qV/kT) - 1], \quad (1)$$

où J_{s1} est la « densité du courant de saturation à l'obscurité ». Dans les dispositifs où le courant est contrôlé par le flux des porteurs minoritaires, J_{s1} est dû à la génération thermique de ces derniers dans le semiconducteur. On devrait le rendre minimal pour maximiser la tension de sortie de la photopile. C'est le cas où la concentration des porteurs minoritaires dans la base est toujours faible devant celle des porteurs majoritaires.

Cette équation est illustrée par la figure 1. Lorsqu'une charge est reliée à la cellule un courant est délivré à la tension qui dépend de l'impédance de la charge. Si l'impédance est nulle la photopile génère une densité de courant de court-circuit J_{sc} proportionnelle à l'intensité lumineuse. Si la charge est déconnectée il apparaît une tension de circuit ouvert donnée par

$$V_{oc} = (kT/q) \ln (J_{sc}/J_{s1} + 1). \quad (2)$$

La puissance maximale par unité de surface est déli-

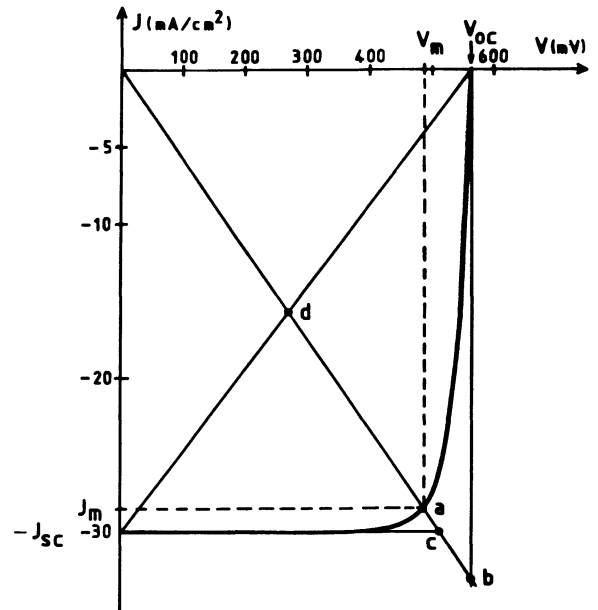


Fig. 1. — Caractéristiques Courant-Tension des différents générateurs : a) cellule photovoltaïque idéale, Eq. 1, b) générateur idéal de tension $V = V_{oc}$, c) générateur idéal de courant $J = J_{sc}$, d) générateur avec une résistance interne constante.

[Current-Voltage characteristics of different generators : a) ideal photovoltaic cell, Eq. 1, b) ideal voltage generator $V = V_{oc}$, c) ideal current generator $J = J_{sc}$, d) generator with a constant internal resistance.]

vrée lorsque l'impédance de charge est correctement adaptée, ce qui donne

$$P_{max} = -J_m V_m = -f J_{sc} V_{oc}. \quad (3)$$

Le facteur de courbe, f , dépend de la forme de la caractéristique courant-tension.

Le point de puissance maximale est défini par $(J, V) = (J_m, V_m)$. Pour un dispositif idéal c.-à-d. sans perte, le facteur f peut être exprimé par

$$f = (V_m/V_{oc}) (1 - [\exp(qV_m/kT) - 1] / [\exp(qV_{oc}/kT) - 1]). \quad (4)$$

Enfin la charge optimale est donnée par

$$R_c^* = -V_m/SJ_m, \quad (5)$$

où S est la surface totale de la jonction.

3. Circuit électrique équivalent.

Un dispositif photovoltaïque réel est généralement plus complexe et ne peut être représenté d'une façon convenable par l'équation 1. Une description plus précise est obtenue en tenant compte des caractéristiques additionnelles suivantes :

(a) Existence de composantes de courant non

idéales du type $\exp(qV/n_j kT)$ où les facteurs d'idéalité sont $n_1 \cong 1$ et $n_2 \cong 2$ ou plus.

(b) Inclusion d'une résistance série R_s pour tenir compte de la différence entre la tension externe et celle qui apparaît à travers la jonction.

(c) Un terme de conductance shunt pour représenter le courant de fuite à travers la jonction.

Ceci peut être représenté par le circuit équivalent de la figure 2. Naturellement, cette représentation n'est pas exacte car une cellule réelle est constituée d'un réseau réparti de cellules élémentaires connectées en parallèle sur une ligne de transmission. Néanmoins, il fournit une précision suffisante dans la plupart des cas et est largement utilisé comme schéma de référence dans l'analyse des performances photovoltaïques.

Les différentes composantes de courant sont définies par

$$I_1 = I_{s1} [\exp \{ B_1 (V - R_s I) \} - 1], \quad (6)$$

$$I_2 = I_{s2} [\exp \{ B_2 (V - R_s I) \} - 1], \quad (7)$$

$$I_{sh} = G_{sh} (V - R_s I), \quad (8)$$

$$I = -I_{ph} + I_1 + I_2 + I_{sh}, \quad (9)$$

où I_{ph} est le générateur idéal de courant représentant le photocourant généré et les paramètres B_1 et B_2 ont leur signification habituelle

$$B_1 = q/n_1 kT \quad \text{et} \quad B_2 = q/n_2 kT. \quad (10)$$

Le courant de court-circuit devient sensiblement inférieur à I_{ph} en valeur absolue si les pertes résistives R_s et G_{sh} sont importantes. En faisant $V = 0$ dans l'équation 9 nous obtenons

$$I_{sc} = \left\{ -I_{ph} + \sum_{j=1}^2 I_{sj} [\exp(-B_j R_s I_{sc}) - 1] \right\} / (1 + R_s G_{sh}). \quad (11)$$

En pratique les termes impliquant I_{s1} et I_{s2} sont très inférieurs à I_{ph} , le courant de court-circuit peut donc être approché par

$$I_{sc} \cong -I_{ph} / (1 + R_s G_{sh}). \quad (12)$$

En faisant $I = 0$ dans l'équation 9, la tension de circuit ouvert est définie maintenant par

$$I_{ph} = I_{s1} [\exp \{ B_1 V_{oc} \} - 1] + I_{s2} [\exp \{ B_2 V_{oc} \} - 1] + G_{sh} V_{oc}. \quad (13)$$

La solution de l'équation 13 peut être évaluée par

$$V_{oc} \leq \text{Min} (V_{oc1}, V_{oc2}, V_{sh}), \quad (14)$$

où $V_{sh} = I_{ph}/G_{sh}$, $V_{ocj} = \{ \text{Ln} (I_{ph}/I_{sj} + 1) \} / B_j$ [$j = 1, 2$] en supposant qu'une composante de courant est prédominante devant les deux autres. Prasad [11] a étudié l'influence du rapport I_{s1}/I_{s2} sur la tension de circuit ouvert. Ses conclusions sont : (i)

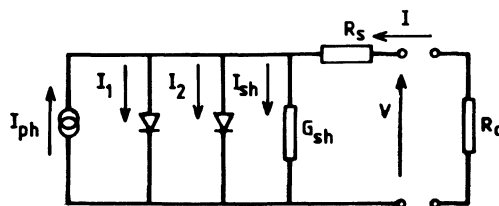


Fig. 2. — Schéma électrique équivalent d'une photopile.

[Equivalent circuit of a solar cell.]

la réduction du V_{oc} est due à la présence d'une composante I_2 non nulle, (ii) typiquement, pour $n_1 = 1$, $n_2 = 2$, $G_{sh} = 0$ et $I_{s1} = 10^{-11}$ A, la valeur de V_{oc} tend vers V_{oc1} pour des rapports I_{s1}/I_{s2} supérieur à 3×10^{-4} , (iii) la réduction de V_{oc} dépend aussi du mode de variation du courant de recombinaison dans la zone de charge d'espace avec la tension appliquée, c.-à-d. cette réduction est nettement plus importante lorsque le courant de recombinaison est du type $[\exp \{ qV/kT \} - 1]$ — ce qui correspond au cas où les pièges superficiels sont présents au voisinage de la jonction [11] que lorsqu'il suit le cas idéal soit $[\exp \{ qV/2 kT \} - 1]$. Cependant Prasad n'a pas tenu compte de la composante I_{sh} dans ses calculs. Ceci nous amène donc à la résolution numérique de l'équation 13 pour étudier l'influence de la conductance shunt sur la tension de circuit ouvert et sur le rendement global de la photopile.

La figure 3 montre la variation de G_{sh} avec V_{oc} ainsi que les bornes supérieures V_{oc1} , V_{oc2} et V_{sh} . Typiquement, avec $n_1 = 1$, $I_{s1} = 10^{-11}$ A, $n_2 = 2$, $I_{s2} = 10^{-6}$ A, $I_{ph} = 0,03$ A et $T = 300$ K, l'abaissement de la tension de circuit ouvert devient supérieur à 3,5 % pour des conductances shunt supérieures à $0,02 \Omega^{-1}$.

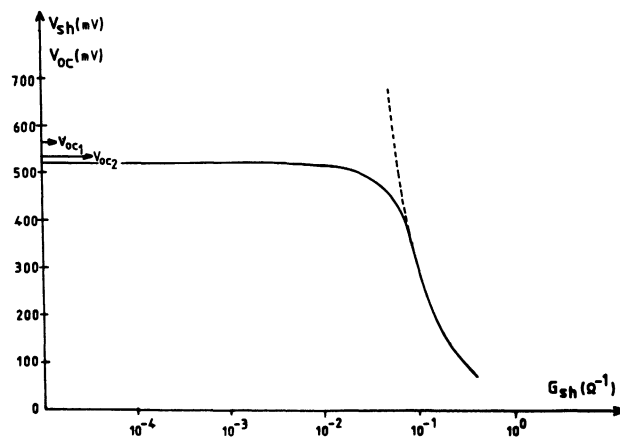


Fig. 3. — Variation typique de V_{oc} en fonction de G_{sh} .

[Typical variation of V_{oc} as a function of G_{sh} .]

Finalement, on peut montrer, après un calcul différentiel simple, que la charge optimale dans le cas du schéma équivalent de la figure 2 devient

$$R_c^* = -V_m/I_m = R_s + 1 \left/ \left[G_{sh} + \sum_{j=1}^2 I_{sj} B_j \exp(B_j \{ V_m - R_s I_m \}) \right] \right. \quad (15)$$

en effet la charge optimale est aussi définie par $-(dV_m/dI_m)$. Kothari *et al.* [12] ont montré une expression analogue concernant le cas d'un seul mécanisme de transport mais en appliquant sur la relation courant-tension, une méthode relativement plus longue c.-à-d. celle des multiplicateurs de Lagrange.

4. Effets des résistances parasites sur la performance des photopiles.

Considérons la résistance série réduite et la conductance shunt réduite définies respectivement par

$$r = -R_s I_{ph}/V_{oc0} \quad \text{et} \quad g = -G_{sh} V_{oc0}/I_{ph} \quad (16)$$

où V_{oc0} est la tension en circuit ouvert du cas idéal, soit $R_s = 0$ et $G_{sh} = 0$. En pratique, pour un fonctionnement normal des cellules solaires, ces paramètres sans dimension peuvent être approchés par

$$r = R_s I_{sc}/V_{oc} \quad \text{et} \quad g = G_{sh} V_{oc}/I_{sc}. \quad (17)$$

Il semble que Green [13] ait été le premier à introduire ces dernières quantités pour étudier principalement leur effet sur le facteur de courbe. Cependant notre objectif est d'étudier l'effet de ces paramètres d'une part, sur le facteur de courbe et d'autre part sur le rendement (η) du dispositif qui est égal au rapport de la puissance maximale débitée (P_{max}) et celle du flux lumineux incident (P_i). Les développements de Taylor limité au 1^{er} ordre autour du cas idéal sont :

$$\eta(r, g) = \eta_0 [1 + (\delta\eta/\delta r)_0 r/\eta_0 + (\delta\eta/\delta g)_0 g/\eta_0] \quad (18)$$

$$f(r, g) = f_0 [1 + (\delta f/\delta r)_0 r/f_0 + (\delta f/\delta g)_0 g/f_0] \quad (19)$$

où η_0 , f_0 sont respectivement le rendement idéal et le facteur de courbe idéal. En effectuant les manipulations algébriques nécessaires, on peut montrer que les dérivées partielles relatives sont liées par

$$(\delta f/\delta r)_0/f_0 = (\delta\eta/\delta r)_0/\eta_0 - \left(\sum_{j=1}^2 I_{sj} B_j \right) V_{oc0}/I_{ph} \quad (20)$$

$$(\delta f/\delta g)_0/f_0 = (\delta\eta/\delta g)_0/\eta_0 - I_{ph}/V_{oc0} \left/ \left[\sum_{j=1}^2 I_{sj} B_j \exp(B_j V_{oc0}) \right] \right. \quad (21)$$

$$(\delta\eta/\delta r)_0/\eta_0 = [(\delta\eta/\delta g)_0/\eta_0]^{-1} = - (V_{oc0}/V_{m0}) (I_{m0}/I_{ph}) \quad (22)$$

où V_{m0} et I_{m0} sont respectivement la tension et le

courant du point de fonctionnement optimal du cas idéal. Ces paramètres sont déterminés par les expressions suivantes :

$$I_{m0} = -I_{ph} + \sum_{j=1}^2 I_{sj} [\exp(B_j V_{m0}) - 1] \quad (23)$$

$$V_{m0} = -I_{m0} \left/ \left(\sum_{j=1}^2 I_{sj} B_j \exp(B_j V_{m0}) \right) \right. \quad (24)$$

Nous avons aussi déterminé η et f numériquement avec une précision de l'ordre de 10^{-4} . Le programme de calcul étant écrit en langage Basic sur TI99/4A peut être adapté sans trop de difficultés à tout autre micro-ordinateur. La figure 4 décrit les paramètres d'entrée et les principales valeurs calculées par le programme « SOLEF2 ».

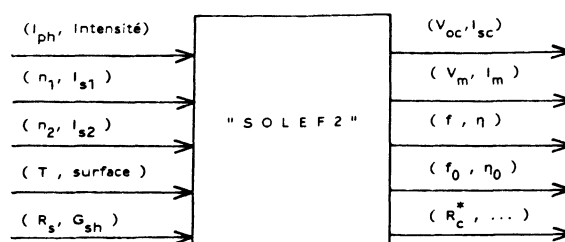


Fig. 4. — Paramètres d'entrée et de sortie du programme « SOLEF2 ».

[Input and output data of the program « SOLEF2 ».]

5. Résultats.

Les résultats suivants concernent les cellules au silicium, à l'arséniure de gallium ou au phosphore d'indium, y compris les dispositifs sous concentration. Ainsi nous avons pu montrer, par simulation, que :

— le rapport $(\delta\eta/\delta r)_0/\eta_0$ de la dérivée partielle du rendement en fonction de r sur le rendement idéal varie entre 1,06 à 1,13,

— la somme $[(\delta\eta/\delta r)_0/\eta_0 + (\delta\eta/\delta g)_0/\eta_0]$ est pratiquement constante.

En effet elle varie entre 1,998 à 2,006. Nous pouvons ainsi déduire une expression semi-empirique simple pour le rendement η du type :

$$\eta = \eta_0 [1 + 1,10 r + 0,90 g]. \quad (25)$$

Cette expression peut être évaluée à mieux de 6% près pour une résistance réduite $0 \geq r > -15\%$ et une conductance réduite $0 \geq g > -15\%$. Dans tous les cas, notre programme calcule les valeurs exactes de f et η pour un ensemble de paramètres d'entrée définis par la figure 4. D'après les équations 20 et 21 et pour un fonctionnement normal sous illumination, nous pouvons déduire une expression semi-empirique

du facteur de courbe

$$f = f_0 \left[1 + 1,1 r + \left\{ 0,9 - I_{ph}/V_{oc0} \left/ \left[\sum_{j=1}^2 I_{sj} B_j \times \exp(B_j V_{oc0}) \right] \right\} g \right]. \quad (26)$$

Hall [14] a présenté une expression empirique similaire mais n'a pas tenu compte de l'effet de la conductance shunt. Green [13] a proposé une relation empirique entre f et la conductance réduite g en négligeant l'effet de la résistance série. Notre expression 26 fait donc la synthèse des effets de r et g et elle correspond à un raisonnement plus rigoureux en tenant compte des mécanismes de transport multiples [15].

Par ailleurs, on peut montrer que, pour un autre modèle [16] de représentation caractérisant le fonctionnement d'une photopile défini par

$$I = -I_{ph} + \sum_{j=1}^2 I_{sj} [\exp \{ B_j ((1 + R_s G_{sh}) V - R_s I) \} - 1] + G_{sh} V \quad (27)$$

au lieu du modèle de la figure 2, les équations 16 à 26

restent valables. Par contre, seule la charge optimale est maintenant définie par

$$R_c^* = \left[1 + R_s \sum_{j=1}^2 I_{sj} B_j \exp(B_j V_{mj}) \right] \left/ \left[G_{sh} + (1 + R_s G_{sh}) \sum_{j=1}^2 I_{sj} B_j \exp(B_j V_{mj}) \right] \right. \quad (28)$$

avec $V_{mj} = B_j [(1 + R_s G_{sh}) V_m - R_s I_m]$.

6. Conclusion.

La comparaison des relations 25 et 26 suggère qu'il est donc plus justifié de considérer directement les effets des résistances parasites sur le rendement que leur influence sur le facteur de courbe, ce qui n'a pas été pris en compte par différents auteurs jusqu'à maintenant. Notre programme de simulation peut être facilement adapté pour le calcul d'autres effets (température, intensité d'illumination, nouvelles structures de photopiles) sur la performance des dispositifs photovoltaïques. On peut l'utiliser entre autre pour générer des caractéristiques théoriques $I_{sc} - V_{oc}$ associées à différents mécanismes de transport.

Bibliographie

- [1] BECQUEREL, E., *Compt. Rend.* **9** (1839) 561.
- [2] SMITH, W., *J. Soc. Telegraph Engineers* **2** (1873) 31.
- [3] ADAMS, W. G. et DAY, R. E., *R. Soc. Proc.* **24** (1876) 163; *Philos. Mag.* **1** (1877) 295.
- [4] FRITTS, Ch. E., *Am. J. Science* **26** (1883) 465; *Lumière Electr.* **15** (1885) 226.
- [5] MINCHIN, G. M., *Philos. Mag.* **35** (1893) 354.
- [6] CHAPIN, D. M., FULLERAND, C. S. et PEARSON, G. L., *J. Appl. Phys.* **25** (1954) 676.
- [7] PRINCE, M. B., *J. Appl. Phys.* **26** (1955) 534.
- [8] LOFERSKI, J. J., *J. Appl. Phys.* **27** (1956) 777.
- [9] HILL, R., *Thin Film Solar Cells*, Chap. 10 du livre *Active and Passive Thin Film Devices* édité par T. J. Coutts (Academic Press) 1978, p. 487-602.
- [10] PRASAD, A., *Solid State Electron.* **25** (1982) 80.
- [11] SAH, C. T., NOYCE, R. N. et SHOCKLEY, W., *Proc. I.R.E.* **45** (1957) 1228.
- [12] KOTHARI, L. S., MATHUR, P. C., KAPOOR, A., SAXENA, P. and SHARMA, R. P., *J. Appl. Phys.* **53** (1982) 5982.
- [13] GREEN, M. A., *Solid State Electron.* **20** (1977) 265. *Solid State Electron.* **24** (1981) 788.
- [14] HALL, R. N., *Solid State Electron.* **24** (1981) 595.
- [15] NGUYEN, P. H. et RAVELET, S., Communication à paraître au congrès international *5th E. C. Photovoltaic Solar Energy Conference* organisé par la C.C.E. à Athènes, Grèce du 17-21 octobre 1983.
- [16] LANDSBERG, P. T., *Solid State Electron.* **18** (1975) 1043.