Optimisation du rendement d'une photopile

F. Pelanchon, P. Mialhe, J.-P. Charles

► To cite this version:

F. Pelanchon, P. Mialhe, J.-P. Charles. Optimisation du rendement d'une photopile. *Revue de Physique Appliquée*, 1988, 23 (6), pp.1139-1145. 10.1051/rphysap:019880023060113900 . jpa-00245917

HAL Id: jpa-00245917

<https://hal.science/jpa-00245917>

Submitted on 1 Jan 1988

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
72.40 — 86.30J

Optimisation du rendement d'une photopile

F. Pelanchon ⁽¹⁾, P. Mialhe ⁽²⁾ et J.-P. Charles

Centre d'Electronique de Montpellier, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Place E. Bataillon, 3406 Montpellier, France

⁽¹⁾ Centre de Documentation Universitaire Scientifique et Technique, CEDUST, B.P. 3929, Damas, Syrie

⁽²⁾ Institut Supérieur des Sciences Appliquées et de la Technologie, ISSAT, B.P. 7028, Damas, Syrie

(Reçu le 11 mai 1987, révisé le 27 octobre 1987, accepté le 29 février 1988)

Résumé. — Cette étude en modélisation recherche les conditions sur des paramètres liés à la structure des photopiles au silicium pour obtenir une puissance disponible maximale. Elle montre la possibilité d'obtenir un rendement idéal de conversion photovoltaïque élevé, voisin de 21 % (en supposant une puissance lumineuse incidente de 100 mW.cm^{-2} intégrée sur tout le spectre et totalement absorbée par la photopile), avec une structure dont le facteur de qualité est très supérieur à l'unité et la tension en circuit ouvert inférieure à 700 mV. L'analyse du courant de saturation inverse permet de prévoir ces performances pour des photopiles idéales, mais aussi pour des photopiles dont le facteur de qualité est proche de 2, avec un courant de diffusion minimisé, alors que l'intensité du courant de recombinaison peut atteindre des valeurs de l'ordre de $10^{-8} \text{ A.cm}^{-2}$.

Abstract. — The optimization of solar cell parameters has been the subject of many papers: values corresponding to practical ranges for the internal parameters of a Si cell structure are considered; the efficiency of the cell is related to these parameters through a diode model and a mathematical formulation leads to optimized parameters. This work is a modelling study that aims to determine the best parameter values in order to obtain the maximum efficiency: assuming a 100 mW.cm^{-2} incident light power, integrated over the whole spectrum and completely absorbed by the solar cell, it is shown that a 21 % efficiency may be obtained for a solar cell with an open-circuit voltage lower than 700 mV, a quality factor greater than one, provided that the diffusion current is minimized while the intensity of the recombination current is as high as $10^{-8} \text{ A.cm}^{-2}$.

1. Introduction.

Les photopiles commercialisées actuellement ont encore un rendement trop faible pour que leurs utilisations se développent largement: elles conduisent à un prix de revient du kWh trop élevé comparé à celui des centrales classiques de production d'énergie. Ces photopiles sont fabriquées à partir de silicium monocristallin ou polycristallin en tranches minces et constituées d'une jonction n-p unique.

Hall [1] a publié une analyse des paramètres et des grandeurs physiques qui influencent leur fonctionnement et leurs performances, en soulignant les valeurs extrêmes des concentrations en atomes donneurs et accepteurs; respectivement dans l'émetteur et dans la base des photopiles, compatibles avec la structure cristalline du silicium et avec des valeurs de son coefficient d'absorption qui imposent l'épaisseur de la base et par conséquent une valeur minimale de la longueur de diffusion des porteurs minoritaires.

Une méthode d'optimisation développée par Chen et Wu [2] permet de calculer ensemble les valeurs des paramètres choisies dans un intervalle prédéterminé pour rechercher les structures réalisables afin d'obtenir un rendement maximal.

Plusieurs études qualitatives [3-5] des phénomènes physiques liés au fonctionnement des photopiles prévoient une limite supérieure de leur rendement idéal voisine de 20 %: ces travaux considèrent notamment les moyens permettant de réduire les phénomènes de recombinaison à la surface de l'émetteur, dans la jonction et dans la base par des traitements de surface et des implantations d'ions, par l'amélioration de la structure solide (augmentation de la pureté, diminution du nombre de dislocations, passivation des défauts) afin d'obtenir une jonction idéale avec un courant de saturation inverse déterminé par les phénomènes de diffusion des porteurs.

Une donnée fondamentale dans les travaux sur le rendement des photopiles provient d'un résultat obtenu en utilisant le modèle à une exponentielle pour décrire les caractéristiques des photopiles : une exploitation de ce modèle permet de montrer, pour une famille de photopiles caractérisées par des valeurs de la tension en circuit ouvert dans un intervalle restreint donné, que le rendement idéal est maximal lorsque le facteur de qualité est égal à 1, le courant de saturation inverse étant alors minimal. Ce résultat partiel reflète l'aptitude du modèle à décrire le fonctionnement d'une photopile lorsque la contribution du courant de diffusion au courant de saturation inverse est prépondérante ; sans cette prédominance du courant de diffusion sur le courant de recombinaison dans la zone de charge d'espace, un modèle à deux exponentielles [6] doit être utilisé pour une description précise [7] des caractéristiques.

L'objectif de cette étude est de chercher les conditions sur des paramètres liés à la structure des photopiles pour obtenir un rendement maximal. En utilisant le modèle à une diode, il en ressort la possibilité d'un rendement de conversion photovoltaïque élevé avec un facteur de qualité très supérieur à l'unité.

Cette étude montre la nécessité de considérer une description du fonctionnement en représentant séparément le courant de diffusion et le courant dû aux phénomènes de recombinaison par les centres situés dans la zone de charge d'espace pour rechercher les conditions d'obtention d'une puissance disponible maximale.

Ce travail souligne la possibilité d'obtenir de grandes valeurs de la tension en circuit ouvert pour des valeurs importantes du courant de saturation inverse et conduit à une nouvelle approche du problème de l'optimisation du rendement qui ne fait pas jouer le rôle principal au courant de saturation inverse mais à la tension en circuit ouvert.

Liste des symboles.

I	Intensité du courant dans la charge.
I_m	Intensité du courant au point de puissance maximale.
I_{ph}	Intensité du photocourant.
I_{0i}	Courants de saturation inverse ($i = 1, 2$).
k	Constante de Boltzmann.
n	Facteur de qualité de la diode.
$P(I, V) = I \cdot V$	Puissance délivrée dans la charge.
$P_m = I_m \cdot V_m$	Puissance maximale délivrée dans la charge.
q	Charge de l'électron.
R_s	Résistance série dans le circuit équivalent.
R_{sh}	Résistance shunt dans le circuit équivalent.

T	Valeur de la température (Kelvin).
V	Tension aux bornes de la charge.
V_m	Valeur de la tension au point de puissance maximale.
V_{co}	Tension de circuit ouvert [V_{oc} Open-circuit voltage].

2. Méthodes d'études.

Une photopile se comporte sous éclairage comme un générateur de puissance. Pour une température et un éclairage donnés, la caractéristique courant-tension I - V est habituellement décrite par l'équation implicite :

$$I = h(I, V) \quad (1)$$

avec

$$h(I, V) = I_{ph} - \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} - \sum_i I_{0i} \cdot [\exp(B_i \cdot (V + R_s \cdot I)) - 1] \quad (2)$$

En limitant la sommation à un seul terme, $i = 1$, cette description conduit au modèle à une exponentielle, le plus simple, et introduit les 5 paramètres : n , R_s , R_{sh} , I_{ph} et I_{01} , avec $B_1 = q/(n \cdot k \cdot T)$. La sommation à deux termes $i = 1$ et $i = 2$ introduit un modèle à deux exponentielles. Ce modèle considère séparément les phénomènes de diffusion [I_{02} et $B_2 = q/(k \cdot T)$] et de recombinaison en zone de charge d'espace [I_{01} et $B_1 = q/(n \cdot k \cdot T)$] des porteurs, et introduit 6 paramètres : n , R_s , R_{sh} , I_{ph} , I_{01} , et I_{02} .

Dans les études en modélisation, le facteur de qualité n est un paramètre mathématique introduit pour déterminer une fonction $h(I, V)$ dont le graphe se superpose à la caractéristique expérimentale I - V . De nombreuses études [8] ont proposé des modèles pour relier les valeurs de n aux phénomènes physiques de conduction dans les photopiles et ont montré que n augmente depuis la valeur 1 jusqu'à des valeurs voisines de 2 lorsque la densité des centres de recombinaison en zone de charge d'espace augmente et peut avoir des valeurs supérieures à 2 pour une distribution non uniforme de ces centres.

Des méthodes expérimentales ou numériques [7, 9, 10] permettent de déterminer ces paramètres pour un point de fonctionnement d'une photopile et conduisent à des valeurs d'ordres de grandeur respectifs comparables pour des photopiles de structure analogue.

Pour une photopile décrite en utilisant ces modèles, la puissance disponible P se met sous la forme d'une fonction de I et V liés par l'équation (1). Les valeurs I_m et V_m de l'intensité du courant et de la tension correspondant à une puissance maximale peuvent être obtenues en utilisant la méthode du multiplicateur de Lagrange pour une fonction de

deux variables $P(I, V)$ liées par une relation implicite $I = h(I, V)$; elles sont alors solutions de l'équation (2) et de l'équation :

$$I = (V - R_s \cdot I) \times \left[\sum_i I_{0i} \cdot B_i \cdot \exp(B_i \cdot (V + R_s \cdot I)) + 1/R_{sh} \right] \cdot (3)$$

Pour résoudre numériquement ce système de deux équations implicites, nous avons utilisé à la fois la méthode d'itération de Newton et la technique de substitution.

La puissance maximale P_m est une fonction de 5 (respectivement 6) paramètres dans le modèle à une exponentielle (respectivement deux exponentielles) : n, R_s, R_{sh}, I_{ph} , et I_{01} (resp. I_{01} et I_{02}).

Une étude en modélisation doit tenir compte des propriétés des structures qu'elle considère. La description [9, 10] des caractéristiques courant-tension des photopiles par l'équation (1) amène à déterminer les paramètres pour un fonctionnement donné, en supposant une puissance lumineuse incidente de $100 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ intégrée sur tout le spectre et totalement absorbée par la photopile, et définit ainsi par son application à la fois les ordres de grandeur et une plage de variation de ces paramètres.

3. Résultats.

3.1 OPTIMISATION AVEC LE MODÈLE À UNE EXPONENTIELLE. — En prenant tout d'abord des valeurs très générales pour les paramètres :

$$n \in [1 - 2,4] ; \quad R_{sh} \in [0,1 - 0,4] \, \Omega ;$$
$$R_{sh} \in [400 - 10\,000] \, \Omega ;$$
$$I_{ph} \in [0,02 - 0,04] \, \text{A} \cdot \text{cm}^{-2} ;$$

et
$$I_{01} \in [10^{-7} - 10^{-5}] \, \text{A} \cdot \text{cm}^{-2} ;$$

nous cherchons la plus grande valeur, P_{mm} , de la

puissance maximale $P_m(n, R_s, R_{sh}, I_{ph}, I_{01})$ quand ces paramètres varient dans leur intervalle respectif ; elle est obtenue (égale à $0,0235 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$) pour les valeurs extrêmes : pour R_s et I_{01} minimales, et pour n, R_{sh} et I_{ph} maximales ; il est bien connu que la puissance est grande pour R_s petite, R_{sh} et I_{ph} grands. Le tableau I explicite ces résultats en considérant la variation de la puissance disponible avec un seul paramètre, les 4 autres étant fixés aux valeurs extrémales citées précédemment : il permet de souligner la faible influence des résistances série et shunt, et la grande influence de n, I_{ph} et I_{01} .

Nous pourrions par la suite considérer les valeurs de la résistance série $R_s = 0,1 \, \Omega$, de la résistance parallèle $R_{sh} = 1\,000 \, \Omega$, et de l'intensité du courant photoélectronique I_{ph} égale à $38 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$, pour faire ressortir l'influence des paramètres n et I_{01} . Les procédés actuels de fabrication des photopiles permettent d'obtenir ces valeurs pour les résistances série et parallèle et le courant photoélectronique. La résistance au contact métal-semiconducteur le long de la grille ainsi que la conduction latérale aux bords de l'émetteur fortement dopé ne peut être totalement éliminée ; et dans les photopiles à base de silicium polycristallin, les dislocations et les défauts dans la structure cristalline limitent encore la résistance parallèle à des valeurs voisines de $1\,000 \, \Omega$. Un courant photoélectronique de $38 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ peut être mesuré pour des photopiles actuelles ayant un émetteur de quelques dixièmes de micromètres d'épaisseur, une très faible recombinaison en surface et aux contacts avec la grille, et un très faible facteur de réflexion obtenu par des traitements en surface [11].

Le tableau I fait aussi ressortir les très fortes variations de la tension en circuit ouvert avec n et I_{01} ; V_{co} est liée aux paramètres précédents par l'équation implicite :

Tableau I. — *Modèle à une exponentielle : Variations de I_m, V_m, V_{co} et P_m en fonction d'un seul paramètre, les autres étant fixés aux valeurs définissant P_{mm} ($R_s = 0,1 \, \Omega$; $R_{sh} = 10\,000 \, \Omega$; $n = 2,4$; $I_{ph} = 0,04 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$; $I_{01} = 10^{-7} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$).*

[Single Exponential Model. Values of I_m, V_m, V_{oc}, P_m found varying one parameter only ; the other parameters are set to their value corresponding to the optimum value P_{mm} .]

	$R_s \, (\Omega)$			$R_{sh} \, (\Omega)$			n			$I_{ph} \, (\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$		$I_{01} \, (\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$		
	0,1	0,2	0,4	400	5200	10^3	1,2	2	2,4	0,02	0,04	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}
$I_m \, (\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2})$	34,6	34,6	34,4	33,2	34,5	34,6	34,7	34,6	34,5	18,1	34,6	34,5	33,8	32,7
$V_m \, (\text{mV})$	643	639	635	639	643	643	319	535	643	607	643	643	513	385
$V_{co} \, (\text{mV})$	797	797	797	794	797	797	399	664	797	757	797	797	654	512
$P_m \, (\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2})$	22,2	22,1	21,8	21,2	22,1	22,2	11	18,6	22,2	10	22,2	22,2	17	12,6

$$V_{co} = R_{sh} \cdot \left[I_{ph} + \sum_i I_{0i} \cdot \{1 - \exp(B_i \cdot V_{co})\} \right] \quad (4)$$

obtenue à partir de l'équation (1) écrite pour une intensité nulle du courant. Le résultat d'une étude systématique de ces variations est reproduit dans le tableau II. Il contient le cas de la photopile idéale (facteur de qualité égal à l'unité) : avec des valeurs actuellement réalisées en laboratoire [12] de l'intensité du courant de saturation inverse égale à 10^{-13} A.cm⁻² et de la tension V_{co} égale à 0,690 V, le rendement idéal obtenu est de l'ordre de 22 %. D'autre part, ce résultat permet de souligner que le maintien de la valeur $I_{01} = 10^{-13}$ A.cm⁻² aboutit à des valeurs de la tension en circuit ouvert bien trop grandes parce que non réalisables avec les structures considérées, dès que les valeurs du facteur de qualité deviennent supérieures à l'unité.

La valeur de la tension en circuit ouvert, V_{co} , ne peut pas être considérée comme arbitraire [13] tout au long d'une étude en modélisation : elle dépend de la structure interne de la photopile, des phénomènes de conduction et de recombinaison, et donc de n , R_s , R_{sh} , I_{ph} et I_{01} . Les résultats (Tab. I) montrent que des structures caractérisées par un facteur de qualité supérieur à 2 peuvent avoir un rendement voisin de 21 %, comparable à celui des photopiles idéales, pour un fonctionnement avec un courant de

saturation inverse de l'ordre de 10^{-7} A.cm⁻². Pour préciser la description du fonctionnement de ces structures ; il faut procéder à une optimisation de la puissance maximale qui limite l'intervalle de variation de la tension en circuit ouvert à des valeurs physiquement acceptables compte tenu des phénomènes physiques considérées puisque, par exemple, une valeur de 10^{-7} A.cm⁻² indique un phénomène de recombinaison important qui limite V_{co} à de faibles valeurs.

D'après l'équation (4) la valeur de la tension en circuit ouvert V_{co} augmente avec n , R_{sh} , ou I_{ph} , mais diminue lorsque I_{01} augmente selon la variation donnée par l'équation :

$$\frac{\partial V_{co}}{\partial I_{01}} = \frac{R_{sh} \cdot \{1 - \exp(B_1 \cdot V_{co})\}}{1 + \sum_i R_{sh} \cdot I_{0i} \cdot B_i \cdot \exp(B_i \cdot V_{co})} \quad (5)$$

Les deux variations, celle de P_M et celle de V_{co} sont liées, les conditions permettant d'atteindre de grandes valeurs de P_{mm} imposent de grandes valeurs de V_{co} : les paramètres importants deviennent alors n , I_{01} liés à V_{co} par l'équation (4). Le tableau III contient la recherche de couples (I_{01} , n) pour des valeurs données de la tension en circuit ouvert : plusieurs couples de valeurs correspondent à des structures caractérisées par la même valeur de V_{co} .

Tableau II. — *Modèle à une exponentielle. Valeurs de V_{co} et P_{mm} en fonction de n pour $I_{01} = 10^{-13}$ A.cm⁻², ou de I_{01} pour $n = 1$ ($R_s = 0,1 \Omega$; $R_{sh} = 1\,000 \Omega$; $I_{ph} = 0,038$ A.cm⁻²).*

[Single Exponential Model. Values of V_{oc} and P_m as functions of n and I_{01} .]

n					I_{01} (A cm ⁻²)							
	1	1,1	1,2	1,3	14	10 ⁻¹³	10 ⁻¹²	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁹	10 ⁻⁸	10 ⁻⁷
V_{co} (mV)	690	758	827	896	965	690	630	571	511	452	392	333
P_m (mw cm ⁻²)	21,9	24,1	26,3	28,5	30,7	21,9	19,7	17,6	15,5	13,3	11,3	9,2
$I_{01} = 10^{-13}$ A cm ⁻²					$n = 1$							

Tableau III. — *Modèle à une exponentielle. Valeurs de I_{01} (A.cm⁻²) en fonction de n pour 3 valeurs courantes de la tension en circuit ouvert.*

[Single Exponential Model. Values of I_{01} as a function of n for three values of V_{oc} .]

n	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2	2,2	2,4
V_{co} (mV)								
555	$1,8 \times 10^{-11}$	$6,3 \times 10^{-10}$	$8,2 \times 10^{-9}$	$5,6 \times 10^{-8}$	$2,5 \times 10^{-7}$	$8,1 \times 10^{-7}$	$2,2 \times 10^{-6}$	$4,9 \times 10^{-6}$
605	$2,5 \times 10^{-12}$	$1,3 \times 10^{-10}$	$2,0 \times 10^{-9}$	$1,7 \times 10^{-8}$	$8,4 \times 10^{-8}$	$3,1 \times 10^{-7}$	$8,9 \times 10^{-7}$	$2,2 \times 10^{-6}$
655	$3,7 \times 10^{-13}$	$2,5 \times 10^{-11}$	$5,1 \times 10^{-10}$	$4,9 \times 10^{-9}$	$2,9 \times 10^{-8}$	$1,2 \times 10^{-7}$	$3,7 \times 10^{-7}$	$9,7 \times 10^{-7}$

Fig. 1. — Modèle à une exponentielle. Variations de n et P_m en fonction de I_{01} , pour les trois valeurs de V_{oc} indiquées avec :

$$R_s = 0,1 \, \Omega ; \quad R_{sh} = 1\,000 \, \Omega ; \\ I_{ph} = 0,038 \, \text{A.cm}^{-2}.$$

[Single Exponential Model. Variations of n and P_m against I_{01} for three values of V_{oc} .]

L'ensemble des résultats est visible sur la figure 1 : un rendement de 17 % par exemple peut être obtenu avec des photopiles idéales ($n = 1$, $I_{01} = 10^{-12} \, \text{A.cm}^{-2}$) mais aussi avec des photopiles ayant un facteur de qualité $n = 1,7$ et un courant de saturation inverse $I_{01} = 10^{-7} \, \text{A.cm}^{-2}$, ou $n = 2,4$ et $I_{01} = 5 \times 10^{-6} \, \text{A.cm}^{-2}$ et une tension en circuit ouvert plus grande puisque respectivement de 0,555 V, 0,605 V et 0,655 V sur cet exemple.

L'optimisation de la puissance disponible en utilisant le modèle à 1 exponentielle conduit aux résultats reproduits sur la figure 2 pour des valeurs de la tension en circuit ouvert imposées dans les intervalles précisés. Ces résultats montrent que pour une puissance disponible recherchée, la photopile idéale correspondante à un facteur de qualité égal à l'unité, ne constitue pas la seule structure favorable. Bien entendu, dès que le facteur de qualité augmente, ce modèle prévoit une augmentation de la tension en circuit ouvert.

La recherche de nouvelles structures ne doit pas porter uniquement sur les conditions d'obtention de faibles valeurs de l'intensité du courant de saturation inverse I_{01} de photopiles idéales mais aussi sur les conditions d'une amélioration de la tension en circuit ouvert de photopiles ayant des facteurs de qualité différents de l'unité.

Les valeurs de l'intensité I_{01} dans le domaine 10^{-8} - $10^{-6} \, \text{A.cm}^{-2}$ montrent l'existence d'un courant

Fig. 2. — Modèle à une exponentielle. Variations de I_{01} en fonction de n , pour trois valeurs de la puissance P_m avec :

$$R_s = 0,1 \, \Omega ; \quad R_{sh} = 1\,000 \, \Omega ; \\ I_{ph} = 0,038 \, \text{A.cm}^{-2}.$$

[Single Exponential Model. Variations of I_{01} against n , for three values of P_m .]

de recombinaison faisant intervenir des pièges profonds [14]. Cette étude doit donc être discutée en utilisant le modèle à 2 exponentielles [10] pour optimiser la puissance en fonction des paramètres caractéristiques des photopiles.

3.2 OPTIMISATION AVEC LE MODÈLE À 2 EXPONENTIELLES. — Dans une première étape les valeurs des paramètres varient dans les intervalles réalistes :

$$n \in [1,3-2,7] ; \quad R_s \in [0,1-0,4] \, \Omega ; \\ R_{sh} \in [400-10\,000] \, \Omega ; \\ I_{ph} \in [0,02-0,04] \, \text{A.cm}^{-2} ; \\ I_{02} \in [10^{-13}-10^{-9}] \, \text{A.cm}^{-2} ; \\ I_{01} \in [10^{-9}-10^{-5}] \, \text{A.cm}^{-2}.$$

La valeur optimale P_{mm} ($0,0216 \, \text{W.cm}^{-2}$) de la puissance maximale $P_m(n, R_s, R_{sh}, I_{ph}, I_{01}, I_{02})$ est encore obtenue pour les valeurs extrêmes : minimales pour R_s , I_{01} , I_{02} et maximales pour n , R_{sh} et I_{ph} (une valeur faible de I_{01} indique une faible recombinaison en zone de charge d'espace).

L'influence des variations de R_s , R_{sh} et I_{ph} est ainsi confirmée, ce qui permet de fixer ces paramètres comme précédemment.

Le tableau IV précise les variations de P_m en fonction d'un seul paramètre n , I_{01} ou I_{02} , les autres étant maintenus à leur valeur de puissance optimale : l'influence de I_{02} , courant de diffusion, est prépondérante pour une valeur de n donnée devant celle du courant de recombinaison I_{01} .

Tableau IV. — *Modèle à deux exponentielles. Variations de I_m , V_m , V_{co} et P_m en fonction d'un seul paramètre, les autres étant fixés aux valeurs de puissance optimale : $R_s = 1,0 \, \Omega$; $R_{sh} = 1\,000 \, \Omega$; $I_{ph} = 0,038 \, \text{A.cm}^{-2}$; $I_{01} = 10^{-9} \, \text{A.cm}^{-2}$; $I_{02} = 10^{-13} \, \text{A.cm}^{-2}$; $n = 2,7$.*

[Double Exponential Model. Variations of I_m , V_m , V_{oc} and P_m as functions of one parameter only ; the others are fixed to their values for an optimum power.]

	n			$I_{01} \, (\text{A cm}^{-2})$			$I_{02} \, (\text{A cm}^{-2})$			
	1,3	2	2,7	10^{-9}	10^{-8}	10^{-7}	10^{-13}	10^{-12}	10^{-11}	10^{-10}
$I_m \, (\text{mA cm}^{-2})$	35,1	35,8	35,8	35,8	35,8	35,5	35,8	35,7	35,6	35,4
$V_m \, (\text{mV})$	489	601	603	603	601	599	603	545	489	433
$V_{co} \, (\text{mV})$	586	689	689	689	689	688	689	630	57	511
$P_m \, (\text{mw cm}^{-2})$	17,2	21,5	21,6	21,6	21,5	21,2	21,6	19,5	17,4	15,3

De grandes valeurs de P_m peuvent être obtenues avec une structure caractérisée par un courant de recombinaison I_{01} important et une tension en circuit ouvert compatible avec les structures actuelles (voisine de 0,690 V). Cette modélisation montre que cette dernière propriété est réalisée pour des structures dont le courant inverse I_{02} (diffusion) a des valeurs faibles, de l'ordre de $10^{-13} \, \text{A.cm}^{-2}$, ce qui recouvre les résultats prévus en utilisant le modèle à une exponentielle ; par contre, soulignons que le modèle à une exponentielle prévoit (Tab. I) pour une telle structure une tension en circuit ouvert bien supérieure à celle qui est obtenue ici puisque voisine de 0,790 V, ce qui n'est pas réalisable pour des photopiles en silicium.

Pour une valeur donnée de n dans l'intervalle [1,3-2,7], qui correspond aux valeurs couramment mesurées, la valeur optimale P_{mm} de la puissance P_m recherchée lorsque les intensités des deux courants I_{01} et I_{02} varient dans les intervalles déjà cités correspond constamment aux valeurs minimales simultanées des intensités de ces deux courants ; la figure 3 montre les valeurs de P_m et V_{co} obtenues pour chaque valeur du facteur de qualité n . Avec un courant de recombinaison I_{01} de $10^{-9} \, \text{A.cm}^{-2}$, aucun gain, à la fois sur la tension en circuit ouvert et sur la puissance maximale disponible, ne peut être attendu d'un accroissement du facteur de qualité au-delà de 2,1.

La figure 4 précise les valeurs de la puissance maximale disponible en fonction des intensités des courants de diffusion I_{02} et de recombinaison I_{01} , lorsque l'une des deux est fixée à une valeur minimale, pour différentes valeurs du facteur de qualité (la courbe correspondant à $n = 1$ est celle du modèle à une exponentielle).

Pour les faibles valeurs de n , l'influence du courant de recombinaison I_{01} est très forte.

Fig. 3. — *Modèle à deux exponentielles. Variations de V_{co} et P_m en fonction de n ($R_s = 0,1 \, \Omega$; $R_{sh} = 1\,000 \, \Omega$; $I_{ph} = 0,038 \, \text{A.cm}^{-2}$; $I_{01} = 10^{-9} \, \text{A.cm}^{-2}$; $I_{02} = 10^{-13} \, \text{A.cm}^{-2}$; ces deux valeurs de I_{01} et I_{02} assurent, pour chaque valeur de n , la meilleure valeur de P_m).*

[Double Exponential Model. V_{oc} and P_m as functions of n .]

A partir de $n = 1,8$ (valeurs généralement rencontrées pour des photopiles ayant une recombinaison importante en zone de charge d'espace), le phénomène est inversé : le courant de diffusion I_{02} a une influence importante, alors que celle du courant de recombinaison I_{01} est faible dès que le courant de diffusion est minimisé, principalement pour les valeurs de la puissance maximale supérieures à $0,0185 \, \text{W.cm}^{-2}$.

Une très bonne valeur de la puissance disponible (de l'ordre de $0,021 \, \text{W.cm}^{-2}$) peut être obtenue

Fig. 4. — Modèle à deux exponentielles. Variations de P_m (mW.cm^{-2}) en fonction de I_{01} , A.cm^{-2} (avec $I_{02} = 10^{-13} \text{ A.cm}^{-2}$), et de I_{02} , A.cm^{-2} (avec $I_{01} = 10^{-9} \text{ A.cm}^{-2}$) pour six valeurs de n indiquées ($R_s = 0,1 \Omega$, $R_{sh} = 1\,000 \Omega$, $I_{ph} = 0,038 \text{ A.cm}^{-2}$).

[Double Exponential Model. Variations of P_m against I_{01} (for $I_{02} = 10^{-13} \text{ A.cm}^{-2}$) and against I_{02} (for $I_{01} = 10^{-9} \text{ A.cm}^{-2}$), for six values of n .]

avec un facteur de qualité et un phénomène de recombinaison importants, pourvu que la diffusion soit minimisée.

4. Conclusion.

En utilisant les modèles des photopiles à une exponentielle et à deux exponentielles, il est montré que l'obtention de la valeur optimale de la puissance maximale disponible correspond aux valeurs, minimales pour la résistance série et les intensités des courants de saturation et maximales pour le facteur de qualité, la résistance parallèle et le courant photoélectronique.

Le modèle à une exponentielle permet de prévoir de fortes valeurs de la puissance maximale disponible pour les photopiles idéales mais aussi pour des structures caractérisées par un facteur de qualité bien supérieur à l'unité et par des valeurs du courant de saturation inverse mettant en évidence un courant de recombinaison non négligeable. Ces structures ont été étudiées en utilisant le modèle à deux exponentielles qui permet de distinguer les contributions au courant de saturation inverse, des phénomènes de recombinaison en zone de charge d'espace et de diffusion-recombinaison hors de la zone de charge d'espace.

Il est montré que l'obtention d'un rendement élevé en présence d'un courant de saturation inverse caractérisé par une recombinaison importante en zone de charge d'espace avec une tension en circuit ouvert réaliste est possible lorsque le courant de saturation inverse de diffusion est faible.

Bibliographie

- [1] HALL, R. N., *Solid-State Electron.* **24** (1981) 595-611.
- [2] CHEN, M. J. and WU, C. Y., *Solid-State Electron.* **28** (1985) 751-761.
- [3] SPITZER, M. B. KEAUNEY and TOBIN, J. P., *Proc. 17th Photovoltaic Specialists' Conf.* (Kissimer Florida (IEEE, New York) (1984) pp. 1218-1224.
- [4] AMICK, J. A. and GHOSH, A. K., *J. Electron. Soc.* **130** (1983) 160-164.
- [5] MIALHE, P. and CHARLES, J.-P., *Revue Int. Heliotechnique* **01** (1985) 19-24.
- [6] WOLF, M. and RAUSCHENBACH, H., *Advanced Energy Conversion* **3** (1963) 455-479.
- [7] CHARLES, J.-P., MEKKAOUI-ALAOUI, I., BORDURE, G. and MIALHE, P., *Revue Phys. Appl.* **19** (1984) 851-857.
- [8] MIALHE, P., CHARLES, J.-P., KHOURY, A. and BORDURE, G., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **19** (1986) 483-492.
- [9] CHAN, D. S. H., PHILIPS, J. R. and PHANG, J. C. H., *Solid-State Electron.* **29** (1986) 329-337.
- [10] CHARLES, J.-P., MEKKAOUI-ALAOUI, I., BORDURE, G. and MIALHE, P., *Solid-State Electron.* **28** (1985) 807-820.
- [11] ROHATGI, A., SPIE, *Photovoltaics for Commercial Solar Power Applications*, **706** (1986) 15-21.
- [12] BLANKERS, A. W. and GREEN, M. A., *Appl. Phys. Lett.* **48** (1986) 215-217.
- [13] MITCHELL, K. W., FAHRENBRUCH, A. L. and BUBE, R. H., *Solid-State Electron.* **20** (1977) 559-561.
- [14] SAH, C. T., NOYCE, R. N. and SHOCKLEY, W., *Proc. IRE* **45** (1957) 1228-1243.