

Optimisation et Conception d'une Grille Collectrice Appliquée aux Photopiles Fonctionnant sous Haute Concentration Solaire

A. Cheknane¹, B. Benyoucef¹, J.P. Charles² et R. Zerdoum³

¹ Laboratoire de Matériaux et Energies Renouvelables, Université Abou Bakr Belkaïd, B.P. 119, Tlemcen, Algérie

² LMOPS, SUPELEC, 2 rue Edouard Belin, 57070 Metz, France

³ Riyadh College of Technology, Department of Electronics, Riyadh 11551, Kingdom of Saudi Arabia

Résumé - L'objectif du présent travail est d'optimiser les dimensions géométriques de la grille de collecte des cellules solaires sous forte concentration. A ce sujet, une étude bidimensionnelle fixe le dessin des masques de la grille. Notre optimisation s'articulera sur deux modèles de grille, un modèle linéaire et un autre circulaire. Dans cette dernière, nous proposons un modèle mathématique qui sert à la minimisation des pertes de puissance, par conséquent l'amélioration du rendement de conversion. Le taux d'ombre constitue une forme de perte pour les deux modèles. Sa minimisation ne doit pas être réalisée au détriment du coefficient de transparence. Donc, nous sommes amenés, dans notre étude, à choisir un compromis, en introduisant ainsi le taux de conduction qui représente les pertes par effet Joule. A partir du point d'intersection des deux courbes (le taux de conduction et le taux d'ombre en fonction de la dimension à optimiser), nous déduisons les dimensions optimales de la grille.

Abstract - The aim of this work is to optimize the geometrical dimensions of the collecting grid of solar cells under high concentration. On this subject, a two-dimensional study fixes the drawing of the grid masks. Our optimization goes on two forms, the first is linear and the the second one is circular. In the latter, we propose a mathematical model which is used for minimization of the power losses, consequently the amelioration of efficiency. The shadow rate constitutes a form of loss for the two models. Its minimization should not be carried out with the detriment of the transparency coefficient. Therefore, we are brought, in our study, to choose a compromise, thus to introduce the conduction rate which represents the losses by Joule effect. From the intersection point of the two curves (the conduction rate and the shadow rate according to the dimension to be optimized), we deduce the optimal grid dimensions.

Mots Clés: Grille - Résistance série - Cellule solaire.

1. INTRODUCTION

En l'absence de matériaux semi-conducteurs transparents et suffisamment conducteurs, nous sommes amenés pratiquement à collecter les porteurs sur une grille métallique n'utilisant qu'une très faible partie de la surface métallique de la cellule. Le rôle de cette grille est de réduire la résistance série de la couche diffusée et d'amener le courant le plus directement possible au contact assurant la connexion entre les cellules unitaires [1].

Dans cet article, nous allons, tout d'abord, montrer l'influence de la concentration solaire sur le rendement énergétique, en tenant compte de la résistance série R_s de la cellule [2]. Ensuite, nous étudierons théoriquement la conception des masques.

Notre étude portera essentiellement sur la distance inter-doigts et la largeur des lignes métalliques qui seront choisies de telle sorte que les pertes (pertes dues au courant horizontal dans l'émetteur, pertes de conduction dans les doigts métalliques, perte due à l'ombrage créé par la grille) de puissances produites par la chute de tension soient minimales.

2. INFLUENCE DE LA CONCENTRATION SOLAIRE ET EFFET DE LA RESISTANCE SERIE

La concentration du rayonnement solaire, en raison d'un renforcement de la génération optique, produit une augmentation de la densité du courant de court-circuit. Cette modification induit aussi la valeur de la tension de circuit ouvert légèrement supérieure à celle mesurée sous rayonnement non concentré. On se place dans le cas où l'injection reste faible.

Si l'on considère que la résistance shunt R_{SH} tend vers l'infini, la caractéristique courant tension est donnée par l'équation suivante :

$$I = CI_{ph} - I_S \left[\exp\left(\frac{q(V + R_S I)}{n_f k T}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

Les figures 1 et 2 montrent l'influence de la concentration solaire sur le rendement des photopiles solaires de type silicium (n^+/p), et de type $SnO_2/SiO_2/Si$ (n) pour différentes valeurs de R_S . Les paramètres physiques sont regroupés dans le tableau 1.

Tableau 1: Paramètres physiques des photopiles Si (n/p) et $SnO_2/SiO_2/Si$ (p)

Matériau	I_{CC} (mA/cm ²)	V_{CO} (V)	L_D (μ m)
Si (n/p)	27.4	0.555	500
$SnO_2/SiO_2/Si$ (n)	27.5	0.45	29

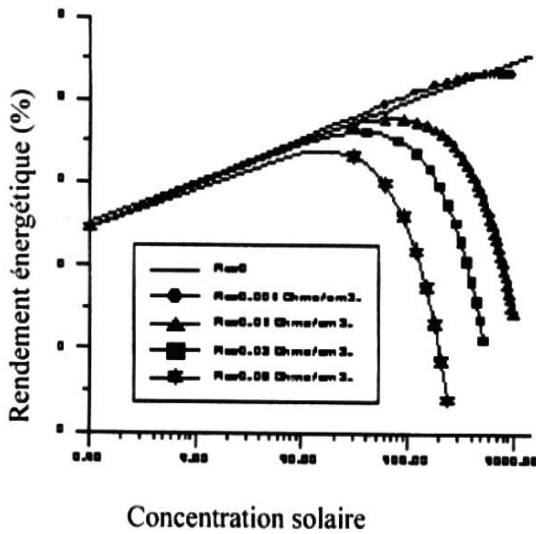


Fig. 1: Variation du rendement de conversion avec la concentration solaire pour différentes résistances série pour une photopile au silicium

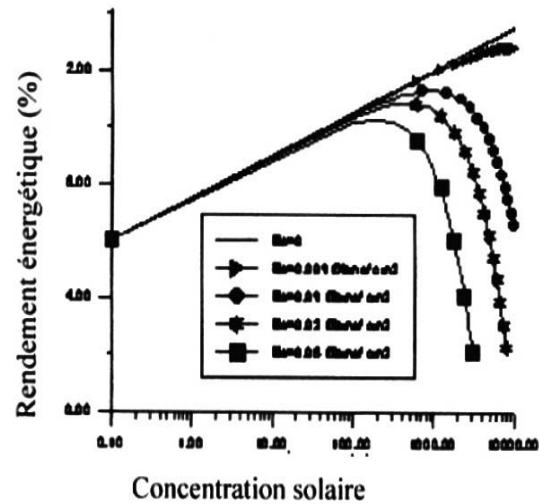


Fig. 2: Variation du rendement de conversion avec la concentration solaire pour différentes résistances série pour une photopile $SnO_2/SiO_2/Si$ (n)

Le rendement à C soleils s'écrit :

$$\eta(C) = \eta(1) \left(1 + \frac{n k T}{q V_{CO}(1)} \text{Log}(C) \right) \quad (2)$$

où $\eta(1)$ et $V_{CO}(1)$ se rapportent à un soleil.

La relation linéaire entre $\eta(C)$ et $\text{Log}(C)$ est évidente sur les figures 1 et 2.

La relation suivante fait apparaître l'influence de la résistance série sur le rendement:

$$\eta(C)_{R_S} = \eta(1) \left[1 + \frac{n k T}{q V_{CO}(1)} \text{Log}(C) - \frac{R_S C^2 I_{CC}^2}{C P_i} \right] \quad (3)$$

Pour les faibles valeurs de C , l'accroissement du premier terme n'est pas compensé par les pertes dues à la résistance série. Par conséquent, le rendement varie quasi-linéairement avec $\text{Log}(C)$.

Pour les fortes concentrations, les pertes dues à la résistance série, augmentent et ne sont pas compensées par le terme $\eta(1) \frac{n k T}{q} \frac{\text{Log}(C)}{V_{CO}(1)}$.

Le rendement $\eta(C)_{R_S}$ présente un maximum qui dépend de R_S et C .

3. OPTIMISATION DE LA CONCEPTION DE LA GRILLE POUR LES PHOTOPILES A FORTES CONCENTRATIONS SOLAIRES

Le problème se subdivise, donc, en deux parties principales. Le premier étant le choix de la structure de grille. Cependant, il n'existe pas de méthode mathématique générale de prévision de la meilleure forme, bien que Napoli et al. [3] ont montré qu'une structure croisée de lignes de grille est toujours moins performante que la structure en lignes droites. La figure 3 présente quelques formes géométriques de grilles rencontrées dans la littérature [4]. Le second, est d'optimiser la structure choisie de telle manière que la largeur et l'épaisseur des lignes de la grille entraînent une perte minimale de puissance ou une amélioration de la puissance de sortie.

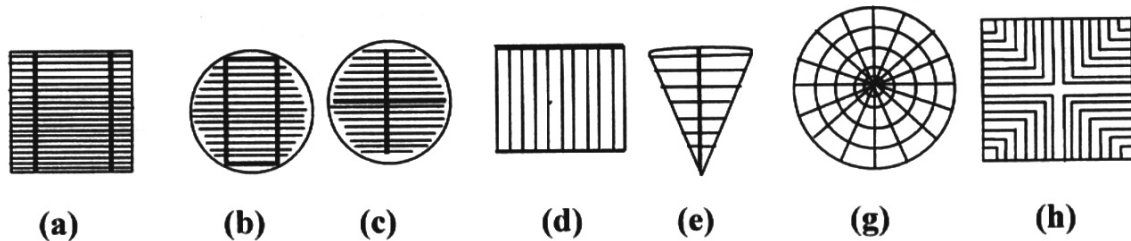


Fig. 3: Exemples de géométrie de grille épousant la forme de la surface

Le but de notre étude dans cette section est de faire une comparaison quantitative entre la structure linéaire simple et une structure plus complexe.

Il y a trois sources de pertes dues à la résistance série: résistance de couche superficielle, résistance de la grille et la résistance de contact métal/semi-conducteur [5, 6]. L'ombrage de la grille contribue aussi à la perte de puissance. Il est supposé ici que, pour les cellules à faible surface, le bus principal de collecte se situe à l'extérieur de la zone illuminée et donc, dans ce cas, il peut être large/épais de telle sorte à rendre les pertes négligeables.

3.1 Grille linéaire

La structure de la grille linéaire montrée sur la figure 3(d) est la plus simple structure de grille et elle forme, pour nous la base de calcul pour les structures les plus complexes.

Nous supposons, en premier lieu, que la surface de devant qui porte la grille est éclairée d'une manière homogène et en second lieu, que le photocourant ainsi produit s'écoule uniformément dans la couche superficielle jusqu'à ce qu'il atteigne les lignes collectrices de la grille.

3.1.1 Perte due à la résistance de couche entre deux doigts

La résistance carrée ou bien résistance par carrée d'une couche est la résistance qu'on mesure entre deux électrodes larges de l et distantes de l . Cette résistance est indépendante de la distance L .

Calcul de perte due à la résistance de couche avant

Le courant qui passe à travers l'émetteur entre deux doigts et collecté à mi-distance par la grille est fonction de la distance par rapport à l'axe de symétrie OO' :

$$I(y) = J_m \frac{B}{2} y \quad (4)$$

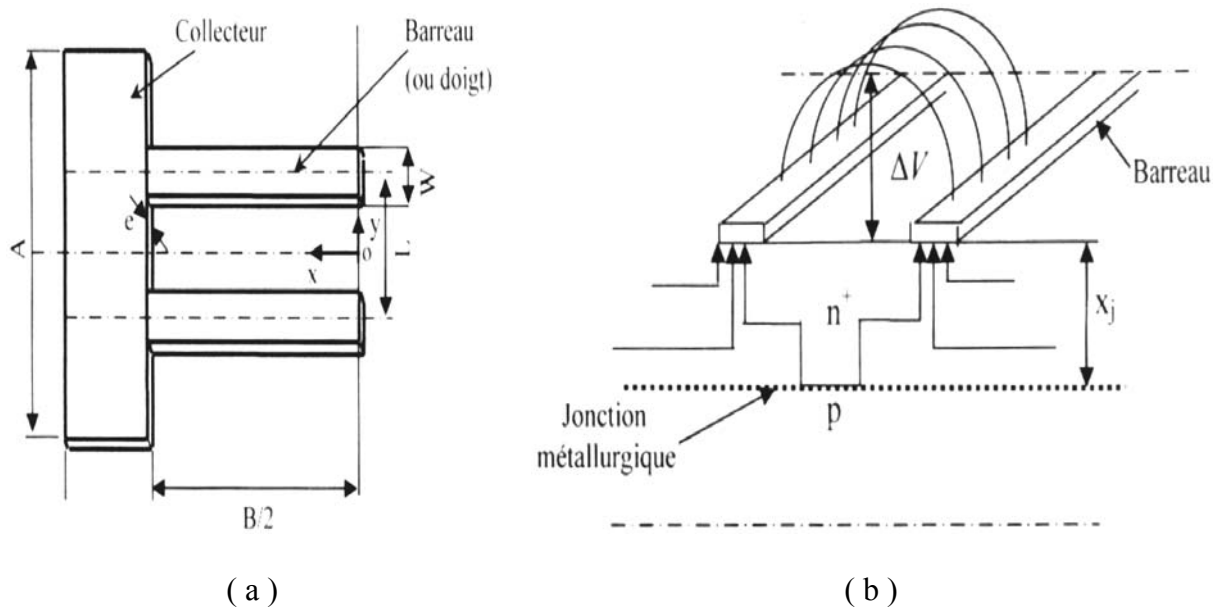


Fig. 4: a) Motif de grille linéaire, b) Collection du courant par les doigts [4]

La résistance élémentaire de la couche est donnée par la relation suivante :

$$dR = 2\rho_S \frac{dy}{B} \quad (5)$$

Cet élément de résistance introduit une chute de tension qui s'exprime par [4] :

$$\Delta V = \int_0^{L/2} I(y) dR \quad (6)$$

soit :

$$\Delta V = \rho_S \frac{J_m L^2}{8} \quad (7)$$

Tant que ΔV reste inférieur au potentiel thermodynamique U_T (26 millivolts à 20 °C) [7], on peut admettre que la résistance de couche ne dégrade pratiquement pas les performances électriques de la pile solaire. Dans ces conditions, l'espacement L entre les doigts doit satisfaire la condition suivante :

$$L < \sqrt{\frac{8U_T}{\rho_S J_m}} \quad (8)$$

La puissance dissipée dans l'élément de résistance dR est donnée par :

$$dP_C = I^2(y) dR \quad (9)$$

$$P_C = \int_0^{L/2} dP_C = \rho_S \frac{J_m^2 B L^3}{48} \quad (10)$$

Nous déduisons le facteur de perte de puissance de la couche avant par la relation suivante:

$$\tau_C = \frac{P_C}{P_f} = \rho_S \frac{J_m L^2}{12 V_m} \quad (11)$$

P_f est la puissance qui pourrait fournir la photopile dans un demi-motif sans pertes de puissance telle que :

$$P_f = V_m J_m S_{1/2 \text{ motif}} = V_m J_m \frac{B}{4} \quad (12)$$

3.1.2 Perte de puissance dans la métallisation de grille

La métallisation de la grille de collecte dans les cellules solaires entraîne une perte de puissance. De ce fait le bon choix du matériau est tributaire de la minimisation de ces pertes.

(a) Perte de puissance des doigts

Le courant qui passe dans un doigt, dépend de la distance x par rapport à l'axe de symétrie OO' :

$$I(x) = J_m L x \quad (13)$$

La résistance élémentaire d'un doigt est donnée par :

$$dR = \rho_M \frac{dx}{W_e} \quad (14)$$

La puissance totale perdue dans un doigt est :

$$dP_b = I^2(x) \cdot dR \quad (15)$$

$$\text{Soit : } P_b = \int_0^{B/2} dP_b = \rho_M \frac{J_m^2 L^2 B^3}{24 W_e} \quad (16)$$

(b) Perte de puissance de la ligne collectrice

Certains auteurs calculent la puissance dissipée le long de la ligne collectrice, en supposant une distribution uniforme des doigts infiniment étroits [8]. Dans ce cas, si le courant est recueilli en un seul point ou en deux extrémités de cette ligne, le courant qu'y passe est fonction de y :

$$I(y) = J_m y \frac{B}{2} \quad (17)$$

La résistance élémentaire de la ligne collectrice est :

$$dR = \rho_M \frac{dy}{d.e} \quad (18)$$

Dans ce cas, la puissance totale dissipée s'exprime par :

$$P_{lc} = 2 \int_0^{L/2} I^2 (y) \cdot dR = \rho_M \frac{J_m^2 B^2 L^3}{48 d \cdot e} \quad (19)$$

Le taux de perte de puissance due à la métallisation de la grille se calcule ainsi :

$$\tau_m = \frac{P_{lc} + P_b}{P_f(1\text{motif})} = \rho_M \frac{J_m L B^2}{12 W e V_m} + \rho_M \frac{J_m B L^2}{24 V_m d \cdot e} \quad (20)$$

3.1.3 Perte de puissance due à la résistance de contact entre le métal et le semi-conducteur

La grille de collecte métallique assure le contact métal/semi-conducteur qui, à son tour, crée une résistance de contact donnée par la relation suivante :

$$R_C = \frac{\rho_C}{S} \quad (21)$$

S : Surface de contact (cm²)

$$R_C = \frac{2\rho_C}{WB} \quad (22)$$

D'où la puissance perdue due à ce contact métal/semi-conducteur :

$$P_{ms} = I^2 R_C = \rho_C \frac{J_m^2 L^2 B}{2W} \quad (23)$$

Le taux de perte qui correspond au contact métal/semi-conducteur dans les doigts est donné par l'expression suivante :

$$\tau_{ms} = \frac{\rho_C J_m L}{W V_m} \quad (24)$$

3.1.4 Calcul de taux de perte de puissance par conduction

Le taux de perte par conduction est le rapport entre la puissance totale P_T perdue par effet Joule à la puissance fournie donnée par l'équation (12) :

$$\tau_R = \frac{P_T}{P_f} \quad (25)$$

$$\text{où } P_T = P_C + P_b + P_{lc} + P_{mc} \quad (26)$$

$$\text{Ce qui donne : } \tau_R = \rho_S \frac{J_m L^2}{24 V_m} + \rho_M \frac{J_m L B^2}{12 W e V_m} + \rho_M \frac{J_m B A^3}{24 d \cdot e L V_m} + \rho_C \frac{J_m L}{W V_m} \quad (27)$$

3.1.5 Perte due à l'effet d'ombre

Du point de vue optique, le taux de couverture ou d'ombre doit être faible, car la surface cachée par la métallisation est inactive. Du point de vue électrique, le drainage des photoporteurs doit se faire avec le minimum de chute de tension dans le semi-conducteur comme dans le métal. Par conséquent, il y a un compromis entre ces deux situations, qui

tendent à améliorer le rendement de conversion énergétique. A titre d'exemple, le taux de couverture pour une photopile industrielle au silicium cristallin de 100 cm^2 de surface totale, est environ 6 à 9 % [9].

Le taux d'ombre est défini comme le rapport de la surface métallisée à la surface totale :

$$\tau_0 = \frac{S_m}{S_t} \quad (28)$$

avec : $S_m = W.B$ et $S_t = L \frac{B}{2}$

d'où : $\tau_0 = 2 \frac{W}{L}$ (29)

Les dimensions optimales sont celles qui rendent minimales τ_0 et τ_R soit $\tau_0 = \tau_R$ [10], ce qui sera réalisé plus bas.

3.1.6 Optimisation des dimensions géométriques de la grille

Nous avons énoncé précédemment dans cet article que les dimensions optimales sont celles qui rendent les taux d'ombre et conduction, minimaux.

Nous optimisons la longueur d'espacement L entre deux doigts consécutifs. De ce fait nous traçons les courbes représentatives des fonctions $\tau_o(L)$ et $\tau_R(L)$ sur le même repère (Fig.5). Ensuite nous déduisons graphiquement la longueur d'espacement optimal L_{OP} , qui est l'abscisse du point d'intersection des deux courbes.

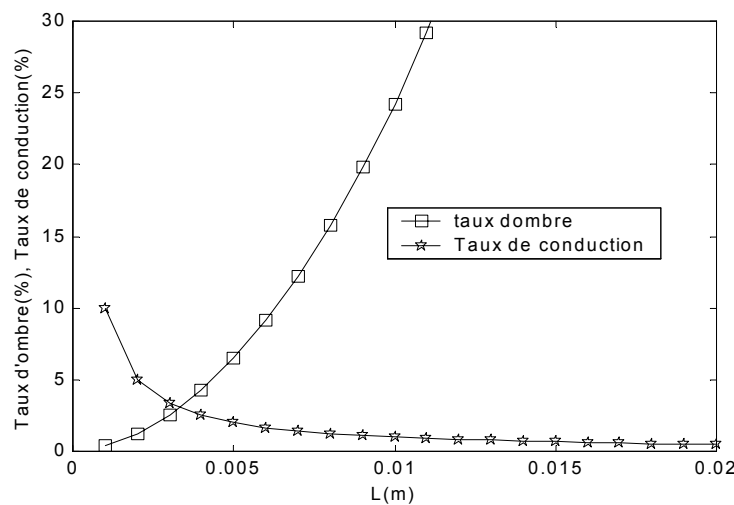


Fig. 5: Variation des taux d'ombre et de conduction avec la longueur d'espacement L

Cette opération graphique se réalise d'une manière précise par une simple manipulation sur le logiciel Matlab. Les résultats obtenus par optimisation sont donnés dans le tableau 2 :

Tableau 2: Résultats de l'optimisation de la longueur d'espacement L entre deux doigts consécutifs

L_{OP} (cm)	τ_{oop} (%)	τ_{ROP} (%)	R_s (Ω/cm^2)	T
0.331	3.03	3.03	1.73	0.952

Nous constatons que, d'après le tableau 2, l'optimisation entraîne une diminution de la résistance série et du coefficient de transparence T. Le rendement de conversion énergétique sous 100 soleils s'améliore ainsi à une valeur de 16.73 %.

Etant donné le facteur prédominant, la résistance de la couche avant augmente parce que le dopage augmente ou bien l'épaisseur de la zone avant diminue.

3.2 Grille circulaire

Nous proposons dans ce cas un modèle dont le motif est représenté sur la figure 6. Le motif est constitué de deux doigts et de n collecteurs pour axe de symétrie Ox. Les rayons $r_1, r_2, r_3, \dots, r_n$ constituent une progression arithmétique de premier terme r_1 et de raison r_1 .

La puissance qui pourrait être fournie sans aucune perte dans un motif est donnée par :

$$P_f = V_m J_m n^2 r_1^2 \quad (30)$$

Afin d'améliorer le rendement de conversion énergétique des photopiles présentant des grilles circulaires semblables à celle que nous étudions ici, nous procédons de la même manière que dans le modèle linéaire étudié précédemment. C'est-à-dire pour optimiser les dimensions géométriques de la grille, nous optons à minimiser les taux d'ombre et conduction.

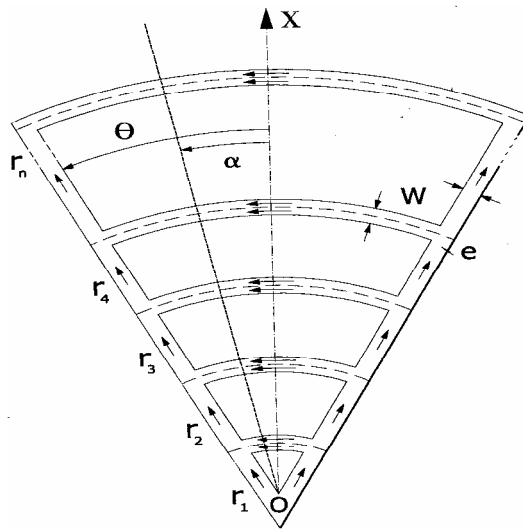


Fig. 6: Motif d'une grille circulaire

3.2.1 Perte de puissance due à la résistance de la couche avant

Le courant dans la couche active (émettrice) est fonction de l'angle α formé avec l'axe Ox:

$$I(\alpha) = J_m S_{\text{active}} \quad (31)$$

avec :

$$S_{\text{active}} = S_{\text{total}} - S_{\text{nCol}} \quad (32)$$

$$S_{\text{total}} = \frac{\alpha}{2} \left(r_n + \frac{W}{2} \right)^2 \quad (33)$$

$$S_{\text{nCol}} = \frac{\alpha}{2} W \sum_{k=1}^n r_k = \frac{\alpha}{4} W n (n+1) \quad (34)$$

Par conséquent : $I(\alpha) = J_m \frac{\alpha}{2} A$ (35)

avec : $A = 2n^2 r_1^2 + W n(1-n)r_1 + \frac{W^2}{4}$ (36)

La résistance élémentaire de la couche se calcule par : $dR = \rho_S (1+B) d\alpha$ (37)

avec : $B = \frac{n(n-1)r_1 - W(n-1)}{2(r_1 - W)}$ (38)

Nous calculons la puissance dissipée dans la résistance R (pour un demi motif) et nous trouvons :

$$P_{\text{dis}} = \int_0^{\theta} I^2(\alpha) \cdot dR = \rho_S \frac{J_m^2 A^2 (1+B)\theta^3}{48} \quad (39)$$

Le rapport entre cette puissance dissipée et la puissance fournie (Eq. 30) donne le taux de perte de puissance dû à la résistance de la couche avant, qui s'exprime par :

$$\tau_{\text{ch}} = \rho_S \frac{J_m^2 A^2 (1+B)\theta^2}{24 \cdot V_m n^2 r_1^2} \quad (40)$$

3.2.2 Pertes dans la métallisation de la grille

a) Doigts

Le courant qui passe dans un doigt de largeur W et d'épaisseur e dépend du rayon r :

$$I(r) = J_m \theta r^2 \quad (\text{pour un motif}) \quad (41)$$

L'élément de résistance se calcule par :

$$dR = \rho_M \frac{dr}{W \cdot e} \quad (42)$$

Nous calculons la puissance perdue dans un doigt par la relation suivante :

$$P_{\text{dis}} = \int_0^{r_n} I^2(r) dR = \rho_M \frac{J_m^2 \theta^2 n^5}{5 W e} r_1^5 \quad (43)$$

b) Collecteurs

En se référant au paragraphe 3.1.2 (b), nous calculons la puissance perdue dans les collecteurs constituant le motif :

$$dP_{\text{dis}} = \sum_{k=1}^n dP_k \quad (44)$$

Considérons un collecteur d'ordre k, nous évaluons le courant qui le traverse par :

$$I_k(\alpha) = J_m \frac{\alpha}{2} r_k^2 \quad (45)$$

La résistance élémentaire calculée pour un collecteur d'ordre k, est :

$$dR = \rho_M \frac{r_k}{W e} d\alpha \quad (46)$$

Cette résistance élémentaire est le siège d'une perte de puissance dont l'expression est donnée par :

$$P_{\text{dis}} = \sum_1^n \left(\int_0^{2\theta} I^2_k(\alpha) dR_k \right) = \frac{2}{3} \rho_M \frac{J_m^2 \theta^3}{W e} \sum_1^n r_k^5 \quad (47)$$

Par conséquent, le taux de perte de puissance due à la métallisation de la grille se calcule par la relation suivante :

$$\tau_b = \rho_M \frac{J_m \theta n^3 r_1^3}{5 W e V_m} + \frac{2}{3} \rho_M \frac{J_m \theta^2}{W e V_m n^2 r_1^2} \sum_1^n r_k^5 \quad (48)$$

3.2.3 Perte de puissance due au contact métal/semi-conducteur

D'après l'équation (21), nous pouvons écrire :

$$R_{\text{contact}} = \frac{\rho_C}{S_T} \quad (49)$$

où S_T est la surface totale du contact métal/semi-conducteur, elle est donnée par :

$$S_T = S_{\text{doig.}} + S_{\text{col.}} \quad \text{Avec} \quad S_{\text{col.}} = 2W \cdot \theta \cdot \sum_1^n r_k, \quad S_{\text{doig.}} = 2W r_n$$

$S_{\text{doig.}}$: surface du contact entre le métal du doigt et le semi-conducteur,

$S_{\text{col.}}$: surface du contact entre le métal de collecteur et le semi-conducteur.

$$\text{Par conséquent : } R_C = \frac{\rho_C}{2W\theta \sum_1^n r_k + 2W \cdot r_n} \quad (50)$$

La puissance dissipée dans cette résistance est donnée par la relation suivante:

$$P_{\text{dis}} = \rho_C \frac{J_m^2 r_1^4 n^3 \theta^2}{2W r_1 + W\theta(n+1)} \quad (51)$$

D'où le taux de perte de puissance causée par le contact métal/semi-conducteur dans la photopile est :

$$\tau_{\text{ms}} = \frac{\rho_C J_m r_1^2 n \theta}{[2W r_1 + W\theta(n+1)] V_m} \quad (52)$$

Le calcul de différents taux de pertes permet de déduire le taux de perte de puissance par conduction τ_R qui est donné par :

$$\tau_R = \tau_{\text{ch}} + \tau_b + \tau_{\text{ms}} \quad (53)$$

3.2.4 Perte de puissance due à l'effet d'ombre

La définition du taux d'ombre nous permet de le calculer par :

$$\tau_0 = \frac{S_m}{S_t} \quad (54)$$

avec : $S_t = r_1^2 n^2 \theta$: Surface métallisée par la grille de collecte.

$$S_m = S_{\text{midoigt}} + S_{\text{mCol}} = 2 n r_1 W + \theta \sum_1^n \left[\left(r_k + \frac{W}{2} \right)^2 - \left(r_k - \frac{W}{2} \right)^2 \right] = W \theta n (n+1) r_1$$

représente la surface totale de la couche avant.

Par conséquent :

$$\tau_0 = \frac{2W + W\theta(n+1)}{\theta r_1 n} \quad (55)$$

3.2.5 Optimisation des dimensions géométriques

Le calcul de la résistance série sans optimiser les dimensions géométriques de la grille de collecte donne une valeur élevée. Par conséquent, le rendement de conversion énergétique décroît. Nous optimisons le premier rayon (r_1).

La figure 7 représente les variations du taux d'ombre et du taux de conduction avec le rayon r_1 pour différentes résistances carrées. L'intersection de leurs courbes donne le rayon optimal r_{1op} .

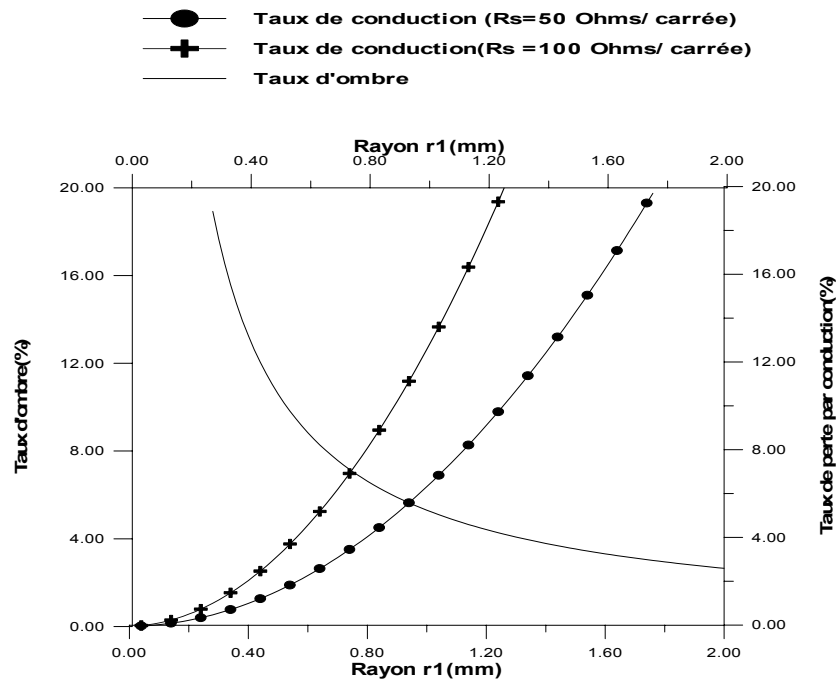


Fig. 7: Variation du taux d'ombre et du taux de conduction avec le rayon r_1 du premier collecteur

Les dimensions et les paramètres électriques des matériaux silicium et argent utilisés dans notre optimisation dans une photopile de surface 4 cm^2 , sont donnés dans le tableau 3 :

Tableau 3: Dimensions et paramètres électriques utilisés dans l'optimisation du rayon r_1

n	W (μm)	e (μm)	θ ($^\circ$)	ρ_M ($\Omega \cdot \text{cm}$)	ρ_C ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)
5	20	4	20	$1.6 \cdot 10^{-6}$	10^{-5}

Nous déduisons d'après la figure 7 :

- $\tau_{\text{ROP}} (\%) = \tau_{\text{OOP}} (\%) = 5.45 \%$ pour un rayon optimal $r_{1\text{op}} = 1 \text{ mm}$ ($\rho_S = 50 \Omega/\text{carrée}$)
- $\tau_{\text{ROP}} (\%) = \tau_{\text{OOP}} (\%) = 7 \%$ pour un rayon optimal $r_{1\text{op}} = 0.7 \text{ mm}$ ($\rho_S = 100 \Omega/\text{carrée}$)

Les rayons optimaux sont utilisés pour le calcul de R_S . Le tableau 4 résume les valeurs des différentes résistances qui composent R_S .

Tableau 4: Valeurs des résistances composant la résistance série

	R_{CA} (Ω)	R_M (Ω)	R_C (Ω)	R_S (Ω/cm^2)
$\rho_S = 50 \Omega/\text{cm}^2$ $r_{1\text{op}} = 1 \text{ mm}$	9.09	$9.32 \cdot 10^{-7}$	$4.43 \cdot 10^{-7}$	2.27
$\rho_S = 100 \Omega/\text{cm}^2$ $r_{1\text{op}} = 0.7 \text{ mm}$	18.53	$6.52 \cdot 10^{-7}$	$6.34 \cdot 10^{-7}$	4.63

Les valeurs calculées du rendement de conversion pour 100 soleils qui correspondent aux résistances séries trouvées : 16.293 % pour $R_S = 2.27 \Omega/\text{cm}^2$ et 15.98 % pour $R_S = 4.63 \Omega/\text{cm}^2$.

4. CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons proposé un modèle mathématique, à fin d'optimiser les dimensions de la grille collectrice d'une photopile solaire fonctionnant sous haute concentration solaire. Cette optimisation nécessite donc le bon choix de la géométrie de la grille, ainsi que de son matériau de fabrication. L'étude faite sur les deux modèles géométriques de la grille (linéaire et circulaire), appliquées pour deux photopiles de même surface (4 cm^2), permet de conclure que :

- Le modèle linéaire (pour $\rho_S = 50 \Omega/\text{cm}^2$, le taux d'ombre = 3.03 % et la résistance série = $1.73 \Omega/\text{cm}^2$) est plus performant que celui du modèle circulaire (pour $\rho_S = 50 \Omega/\text{cm}^2$, le taux d'ombre = 6 % et la résistance série = $2.27 \Omega/\text{cm}^2$)
- La résistance série est influencée principalement par la résistance de la couche avant pour les deux modèles étudiés.
- La réduction de la résistance série se fera au détriment du coefficient de transparence de la grille. Il s'agit donc de faire un compromis entre la valeur de résistance série et celle de taux de transparence de la photopile, pour l'obtention d'un rendement énergétique élevé.
- La résistance de la métallisation de la grille vient en deuxième position. Nous pouvons réduire sa valeur en augmentant simplement l'épaisseur des doigts.
- Le taux d'ombre constitue une forme de perte pour les deux modèles. Sa minimisation ne doit pas être réalisée au détriment du coefficient de transparence. Donc, nous sommes amenés, dans notre étude, à choisir un compromis, en introduisant ainsi un autre facteur de perte dit 'taux de conduction' qui représente les pertes par effet Joule. A partir du point d'intersection des deux courbes (taux de conduction et le taux d'ombre) nous déduisons les dimensions géométriques de la grille de collecte optimisées.

Enfin, nos résultats ont été encourageants par rapport à ceux de la littérature, notamment [1, 11].

NOMENCLATURE

A	Longueur du collecteur (m)	P_{lc}	Puissance perdue dans la ligne Collectrice (W)
B	Longueur du barreau (m)	P_b	Puissance perdue dans un doigt (W)
e	Epaisseur du barreau	P_{dis}	Puissance perdue due au contact métal/semi-conducteur (W)
x	Abscisse (m)	ρ_S	Résistance de couche (Ω/\square)
x_j	Profondeur de la jonction (m)	ρ_M	Résistivité du métal ($\Omega.cm$)
L	Distance entre barreaux (m)	ρ_C	résistance spécifique du contact ($\Omega.cm^2$)
L_{OP}	Distance optimale entre barreaux	T	Coefficient de transparence
y	Ordonnée (m)	τ_C	Facteur de perte due à la résistance de couche
I	Courant électrique (A)	τ_m	Taux de perte due à la métallisation de la grille
I_{PH}	Photocourant (A)	τ_R	taux de perte de puissance par conduction (pertes par effet Joule)
I_S	Courant de saturation	τ_{Rop}	Taux optimal de perte de puissance par conduction
I_{CC}	Courant de court-circuit	τ_0	Taux d'ombre
$I_{CC}(1)$	Courant de court-circuit sous 1 Soleil	τ_{00p}	Taux d'ombre optimal
J_m	Densité de courant à la puissance maximale ($A.m^{-2}$)	τ_C	Facteur de perte puissance de la couche avant
Q	Charge d'électron (Coulomb)	S_m	Surface métallisée (métal de la grille) (m^2)
V	Voltage (V)	S_t	Surface frontale totale de la cellule solaire (m^2)
V_{CO}	Tension de circuit ouvert (V)	S_{nCol}	Surface correspondant au $n^{ième}$ collecteur (m^2)
$V_{CO}(1)$	Tension de circuit sous 1 soleil	S	Surface du contact (m^2)
V_m	Tension à la puissance maximale (V)	$S_{1/2motif}$	Surface d'un demi motif (m^2)
n_f	Facteur d'idéalité	S_{COL}	Surface du collecteur (m^2)
$\frac{kT}{q}=U_T$	Potentiel thermodynamique (26 millivolts à 20 °C)	r_k	Rayon d'ordre k (m)
L_D	Longueur de diffusion (m)	r_{1op}	Rayon optimal d'ordre 1 (m)
ΔV	Variation de potentiel (V)	n	Ordre du $n^{ième}$ collecteur
FF	Facteur de forme	R_S	Résistance série (Ω)
η	Rendement énergétique de Conversion	R_{SH}	Résistance shunt (Ω)
P_I	Puissance incidente ($W.m^{-2}$)	R_{CA}	Résistance de la couche avant (Ω)
P_f	Puissance fournie (W)	R_M	Résistance de la métallisation de la grille (Ω)
P_C	Perte due à la résistance de couche (W)	R_C	Résistance du contact métal/semi-conducteur (Ω)

REFERENCES

- [1] F. Theres, "*Les Cellules Photovoltaïques au Silicium et à l'Arséniure de Gallium : Modèles de Fonctionnement, Expérimentation et Application aux Générateurs sous Concentration*", Thèse de Doctorat, Toulouse, 10/10/1980.
- [2] A. Kaminski, J.J. Marchand and A. Laugier, "*I-V Methods to Extract Junction Parameters with Special Emphasis on Low Series Resistance*", Solid State Electronics, Vol. 43, pp. 741-745, 1999.
- [3] L.S. Napoli, G.A. Swartz, S.G. Liu, N. Klein, D. Fairbanks and D. Tamutus, "*High-Level Concentration of Sunlight on Silicon Solar Cells*", RCA Review, Vol. 38, p. 76, March 1977.
- [4] M. Orgeret, "*Les Piles Solaires, le Composant et ses Applications*", Edition Masson, 1985.
- [5] B. Thuillier, "*Caractérisation Structurale des Contacts Ohmiques Réalisés à Partir d'Encres Métalliques sur Cellules Photovoltaïques en Silicium Multicristallin*", Thèse de Doctorat, INSA de Lyon, 21 décembre 2001.
- [6] B. Thuiller, J.B. Boyeaux, D. Sarti and A. Laugier, "*Optimisation of Metallic Contacts of Silicon Solar Cells by Electro Less Metal Deposition*", 2nd World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienne (Autriche), pp. 1467-1470, 6-10 Juillet 1998.
- [7] O.S. Heavens, "*Opt. Prop. of thin Sol. Films*", p. 55, 1965.
- [8] R. Daniel, Burgerd , H. Stone, Proceedings of the Symposium on Materials and New Processing Technologies for Photovoltaic, p. 141, 1982.
- [9] A. Ricaud, "*Photopiles Solaires*", Cahier de Chimie, Edition Presses Polytechniques et Universitaires, 1997.
- [10] A. Cheknane and R. Zerdoum, "*Optimization of Grid Design Applied on Solar Cells under High Concentration of Solar Radiations*", Conf. Maghrébine en Génie Electrique, pp. 85-89, Constantine, Nov. 2001.
- [11] A.R. Moore, "*An Optimized Grid Design for a Sun-Concentrator Solar Cell*", RCA Review, Vol. 40, pp. 141-151, June 1979.