

# Évaluation de la puissance perdue dans une cellule solaire conventionnelle mc-Si - Effets de la conception de la grille de collecte.

A.BOUYELFANE<sup>1</sup>, A.ZERGA<sup>1</sup>

**Résumé** – La formation des contacts avant est l'une des plus importantes étapes de fabrication des cellules solaires. En l'absence de matériaux semiconducteurs transparents, nous sommes amenés pratiquement à collecter les porteurs photogénérés sur une grille métallique, n'utilisant qu'une très faible partie de la surface active de la cellule. A ce sujet, nous utilisons un modèle mathématique qui permet d'estimer les pertes de puissances dues à la circulation du courant dans la grille métallique (les doigts et le busbar), dans le semiconducteur (base, émetteur), et à l'interface entre ces deux matériaux. L'objectif de notre étude est d'optimiser, en se basant sur des spectres purement industriels, les dimensions géométriques des contacts métalliques de la face avant déposés par sérigraphie pour améliorer la collecte du courant débité par les cellules solaires conventionnelles à base de silicium multicristallin (mc-Si).

**Mots clés** – Cellule solaire, Silicium cristallin, grille de collecte, résistance série, sérigraphie.

**Abstract** – The front contact formation is one of the most critical solar cell processing. In the absence of transparent semiconductor materials, we are practically brought to collect the photogenerated carriers on a grid metal, using only a small part of the active cell surface. We use a mathematical model which is used to estimate the powers losses associated with the current flow along the front metal grid (fingers and busbar), in the semiconductor (base, emitter), and at the interface between these two materials. For this reason, we investigate in this paper the optimization of the silver (Ag) metal front side contacts geometry deposited by a screen-printed method to improve the spectral response of the conventional multicristallin (mc-Si) silicon solar cells.

**Keywords** – silicon solar cells, collecting grid, series resistance, and screen printed.

## I. INTRODUCTION

La photolithographie et la technique des contacts enterrés sont des technologies connues, permettent d'excellents contacts, mais elles sont très lentes et

A.BOUYELFANE, Unité de recherche des Matériaux et Energies Renouvelables (URMER), Université Abou Bakr Belkaid, B.P. 119, Tlemcen, Algérie. Tel/Fax: 043. 21. 58. 90 & 89.  
E-mail: A.BOUYELFANE@hotmail.fr

A.ZERGA, Unité de recherche des Matériaux et Energies Renouvelables (URMER), Université Abou Bakr Belkaid, B.P. 119, Tlemcen, Algérie. Tel/Fax: 043. 21. 58. 90 & 89.  
E-mail: a\_zerga@yahoo.fr.

coûteuses par rapport à la sérigraphie. Celle-ci est simple, rapide, robuste et économique. En plus, la sérigraphie produit moins de déchets chimiques. Elle est largement utilisée dans la production des cellules solaires conventionnelles [1]. C'est une technologie classique de l'industrie photovoltaïque et elle existe depuis le début des années 1970 [8].

Sachant que la pâte de sérigraphie s'étale après l'impression du motif, des lignes bien définies, doivent être beaucoup plus larges que celles conçues sur l'écran de sérigraphie. Une ligne de 60µm semble être réalisée avec 100 µm de largeur après co-firing [2].

Par ailleurs, en plus de maximiser l'absorption et de réduire au minimum la recombinaison, la condition finale nécessaire pour concevoir une cellule solaire de rendement élevé est de minimiser ses pertes résistives parasites. En effet, les shunts et les pertes de résistance série diminuent le facteur de forme et le rendement d'une cellule solaire. Une résistance de shunt nuisiblement faible est un défaut de traitement technologique plutôt qu'un paramètre de conception. Cependant, la résistance série, imposée par la conception des contacts avant et de la résistance d'émetteur, doit être rigoureusement conçue pour chaque type et taille de cellule solaire afin d'optimiser son rendement.

Les contacts métalliques supérieurs sont nécessaires pour collecter le courant généré par la cellule. Le "busbar" est relié directement aux fils externes, alors que les "doigts" sont des secteurs plus fins de métallisation qui collectent le courant pour le délivrer au busbar. Le point principal de la conception des contacts avant est l'équilibre entre les pertes résistives liées à une grille largement espacée et la réflexion quasi-totale du rayonnement solaire provoquée par la surface métallisée (ombragée).

Dans cet article, nous allons, tout d'abord, mettre en évidence la relation entre l'effet d'ombre et la résistance série, ainsi que l'impact des paramètres prépondérants dans la structure d'une grille de collecte face avant, et le taux de contribution de chaque élément résistif.

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 créée par la grille) soient de puissances minimales.

## II. MODELISATION

Bien que la sérigraphie soit la méthode la plus répandue dans la réalisation des contacts des cellules solaires au silicium. Peu d'études académiques concernant la nature des contacts sont disponibles. Des efforts récents par quelques groupes de recherche ont mené à un modèle adéquat décrivant ces contacts [8].

### A. Résistance série

La résistance série dans une cellule solaire a trois origines : premièrement, le mouvement du courant à travers l'émetteur et la base ; deuxièmement, la résistance de contact entre le métal et le silicium ; et finalement la résistance du métal de contact avant et arrière.

L'impact principal de la résistance série est de réduire le facteur de forme, bien que les valeurs excessivement élevées puissent également réduire le courant de court-circuit [3].

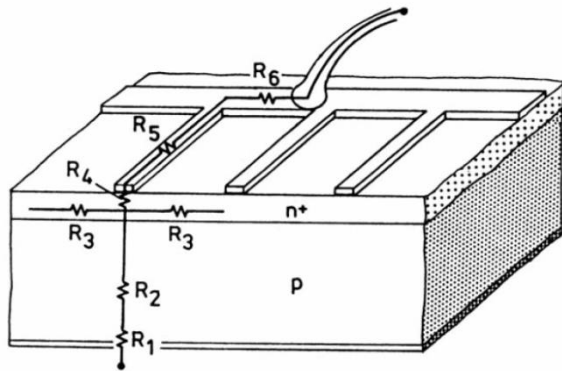


Fig. 1 Les résistances ohmiques dans une cellule solaire [7].

Les différentes résistances sont :

$R_1$  : le contact métal-semiconducteur sur toute la surface arrière,

$R_2$  : le semiconducteur (base),

$R_3$  : l'émetteur entre deux doigts de la grille,

$R_4$  : le contact métal-semiconducteur,

$R_5$  : le doigt de la grille,

$R_6$  : la barre de collection (busbar).

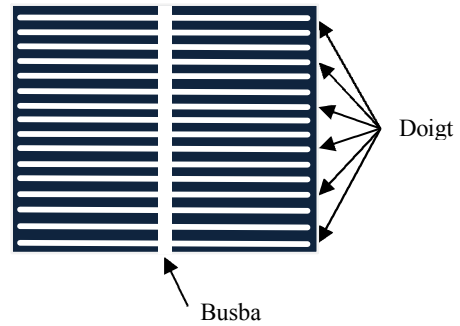


Fig. 2 Conception de contact avant d'une cellule solaire conventionnelle utilisée dans la simulation. Le busbar relie les doigts ensemble et passe le courant produit aux contacts électriques externes [3].

Pour évaluer toutes les pertes ohmiques dans une cellule solaire, on mesure la contribution de chaque composant résistif. Ceci est basé sur le calcul de la perte de puissance relative liée au passage du courant par les divers composants résistifs de la cellule solaire normalisée à l'unité de surface de la cellule. Par normalisation imposée par unité de surface de la cellule, les expressions de perte de puissance pour les divers composants résistifs sont divisées par  $2nab$  (surface de la cellule). Ainsi, les résistances des différents éléments résistifs sont considérées comme étant des résistances carrées [5].

La perte de puissance liée au déplacement du courant à travers la région d'émetteur est donnée par :

$$P_e = \frac{1}{3} J_e^2 b^2 R_e \quad (1)$$

La perte de puissance causée par la résistance de contact est :

$$P_{\text{contact}} = J_e^2 b (\rho_c R_c)^{1/2} \quad (2)$$

La perte de puissance due à l'écoulement du courant le long du doigt de la grille est:

$$P_{\text{finger}} = \frac{2 J_e^2 a^2 b \rho_f}{3 t w} \quad (3)$$

La perte de puissance produite par l'écoulement du courant le long du busbar est :

$$P_{\text{busbar}} = \frac{1 J_e^2 a n^2 b^2 \rho_f}{3 t w'} \quad (4)$$

Le courant traversant la région de la base provoque une perte de puissance donnée par,

$$P_{\text{base}} = J_e^2 \rho_b l \quad (5)$$

Comme le contact arrière couvre la surface entière de la cellule, sa contribution à la perte de puissance a été considérée complètement négligeable. La puissance perdue totale est donnée par la somme des équations de (1) à (5).

$$P_{\text{total}} = P_e + P_{\text{contact}} + P_{\text{finger}} + P_{\text{busbar}} + P_{\text{base}} \quad (6)$$

Les équations (1) à (5) représentent la perte de puissance normalisée à l'unité de surface de la cellule [4, 5].

TABLE I  
DIFFERENTS PARAMETRES POUR CALCULER LA PERTE DE PUISSANCE PAR RESISTANCE SERIE.

<b>a</b>	Longueur de la cellule, égale aussi à la longueur des doigts et du busbar
<b>b</b>	Demi-espace entre les doigts
<b>n</b>	Nombre de doigts
<b>t</b>	Épaisseur des doigts et du busbar
<b>w</b>	Largeur des doigts
<b>w'</b>	Largeur du busbar
<b>l</b>	Épaisseur de la base
$\rho_f$	Résistivité de la pâte de sérigraphie
$\rho_b$	Résistivité de la base
$\rho_c$	Résistivité de contact pâte de sérigraphie / Si
$R_s$	Résistance carrée de l'émetteur
$J_{ph}$	Densité du courant photogénéré
<b>S</b>	Surface de la cellule (=2nab). Largeur de la cellule (=2nb)

### B. Pertes par effet d'ombre

Les Pertes par effet d'ombre sont provoquées par la présence du métal sur la surface supérieure de la cellule solaire qui empêche la lumière de pénétrer à la cellule solaire. Elles sont déterminées par la transparence de la surface supérieure, qui est définie comme étant le taux de la surface couverte par le métal. La transparence est déterminée par la largeur des lignes métalliques sur la surface avant et de l'espacement entre elles. Une importante limite en pratique est que la minimisation de cette largeur est inhérente à la technologie utilisée pour la métallisation [3].

La puissance perdue à cause de l'ombrage du semiconducteur par les doigts de contacts et le busbar et donnée par [6]:

$$P_{\text{shadow}} = P_{ph} n (aw + 2bw^2) \quad (7)$$

## III. RÉSULTATS ET DISCUSSION

### A. Relation entre la résistance série et l'effet d'ombre.

Il est clair que la surface occultée est inversement proportionnelle à la distance inter-doigts. En effet la puissance perdue par l'effet d'ombre diminue en augmentant cette distance.

Nous avons calculé la puissance perdue de chaque élément résistif d'une cellule conventionnelle à base de silicium multicristallin, de dimension (125×125×0.02) mm, une largeur de doigts  $w=120\mu\text{m}$  et  $w'=3\text{mm}$ . La somme des cinq expressions de (1) à (5) représente la puissance perdue par résistance série, comme le montre la figure 3. Cette dernière augmente avec l'espace inter-doigts.

Enfin, la relation entre la résistance série et le taux d'ombre est inversement proportionnelle, et l'optimisation de la grille métallique d'une cellule solaire repose sur ce compromis.

La puissance perdue au niveau de la grille métallique est la somme des pertes dues à l'ombre et à la résistance série. La figure 3 montre que le minimum de pertes coïncide avec l'intersection des deux premières courbes.

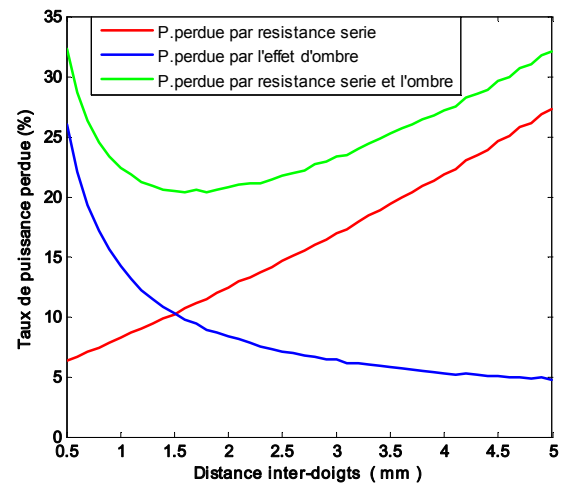


Fig. 3 Evolution des pertes par l'ombre et par résistance série.

On déduit que pour les petites distances inter-doigts (avant le minimum), c'est l'effet d'ombre qui domine les pertes. Cependant, en augmentant la distance inter-doigts (au-delà du minimum), c'est la résistance série qui fait chuter le rendement.

### B. Effet des dimensions des doigts (largeur, épaisseur)

#### 1) Largeur des doigts

Comme le montre la figure 4, de larges contacts sont nécessaires pour faciliter le transport des porteurs, diminuant ainsi la résistance des doigts de contact ( $\Omega/\text{cm}^2$ ), qui est une importante composante de la résistance série. Cependant, il ne faut pas que cela soit au détriment de la surface éclairée.

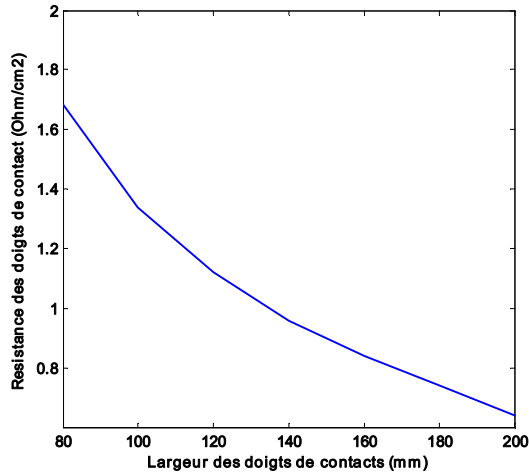


Fig. 4 Variation de la résistance des doigts de contact en fonction de la largeur des doigts.

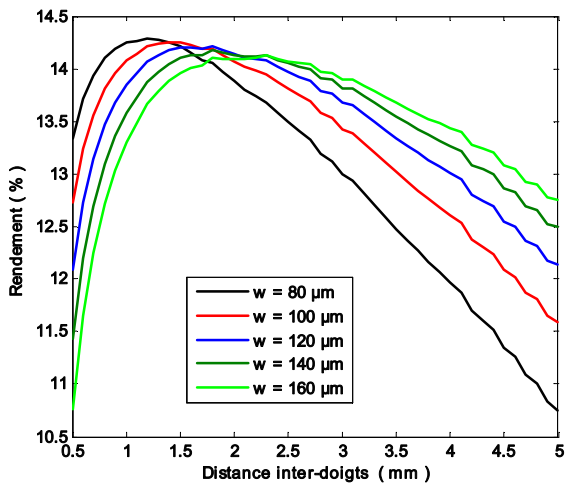


Fig. 5 Effet de largeur des doigts sur le rendement de la cellule solaire.

Pour une résistance carrée de l'émetteur conventionnelle égale à  $40\Omega/\square$ . Si la largeur des doigts croît, les pertes par effet d'ombre augmentent et la résistance série diminue. Ainsi l'intersection des deux courbes (voir figure 3) c.à.d. le minimum de pertes se décale vers les grandes distances inter-doigts ce qui correspond au maximum du rendement dans la figure 5. Les maximums des différentes largeurs restent dans l'intervalle entre 1 et 2.5mm, avec une légère diminution.

## 2) Epaisseur de la grille métallique.

Ayant le même effet que la largeur des doigts, plus l'épaisseur des lignes de contacts est importante, cela favorise le passage du courant dans la grille métallique. Par conséquent, la résistance de celle-ci diminue. En effet, le rendement de conversion augmente de façon remarquable avec des contacts épais.

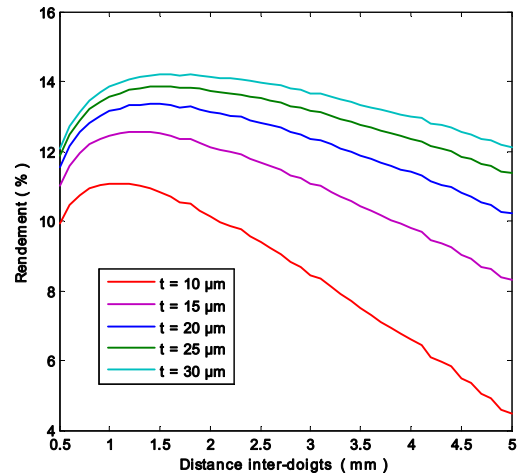


Fig. 6 Effet de l'épaisseur de la grille métallique sur le rendement de la cellule solaire.

## C. Taux de contribution des éléments résistifs à la résistance série.

D'après les résultats précédents, la résistance série augmente en fonction de l'espace inter-doigts. Pour connaître quel est le composant résistif responsable de cette augmentation, nous avons calculé la variation de la puissance perdue de chaque élément résistif ( $mW/cm^2$ ) en fonction de la distance inter-doigts (mm). Dans ce cas, la puissance perdue au niveau de la base est égale à  $0.02mW/cm^2$ , et elle est indépendante de la distance inter-doigts. On remarque que la puissance perdue due au passage du courant à travers le busbar, autrement dit la résistance du busbar, et la résistance de contact, restent presque constantes le long de l'intervalle de variation. Tandis que la puissance perdue dans l'émetteur entre deux doigts de contacts croît avec l'espace inter-doigts. Enfin, c'est la résistance des doigts de contacts qui augmente fortement en fonction de la distance séparant les doigts. D'où l'intérêt d'optimiser les dimensions géométriques des doigts de contacts pour réduire au minimum la perte de puissance à ce niveau.

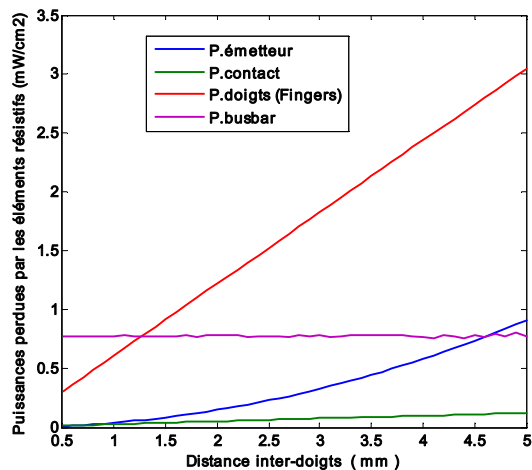


Fig. 7 Variation de la puissance perdue par chaque élément résistif en fonction de la distance inter-doigts.

Nous avons calculé les taux de contribution de chacune des cinq résistances constituant la résistance série (la résistance de l'émetteur entre deux doigts, du contact, des doigts, du busbar et de la base)

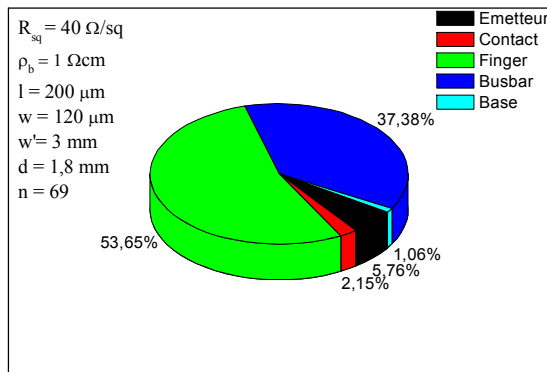


Fig. 8 Taux de contribution des éléments résistifs à la résistance série.

On se met aux conditions optimales ; une résistance carrée conventionnelle égale à  $R_{\square} = 40\Omega/\square$ , une largeur de doigt autorisée par la technique de sérigraphie  $w = 120\mu\text{m}$ , une largeur du busbar égale à  $w' = 3\text{mm}$ , et avec  $1.8\text{mm}$  d'espacement entre les doigts nous obtenons le rendement maximal  $\eta = 14.22\%$ .

Dans ce cas de figure proche du spectre industriel de la majorité des cellules industrielles au silicium multicristallin, c'est la grille de collecte (fingers + busbar) qui prédomine les pertes résistives. En particulier, la résistance des doigts avec une fraction de 53.65% de la résistance série. Suivie par la résistance du busbar avec une fraction de 37.38%. Ensuite, la résistance d'émetteur et du contact avec des parts de (5.76% et 2.15% respectivement). Enfin la résistance de la base ayant la plus petite contribution de 1.06%. On note que ces taux changent avec la moindre variation de la géométrie de la grille de collecte, et le niveau de dopage de l'émetteur c.à.d. la résistance carrée.

#### IV. CONCLUSION

Nous avons étudié de plus près la relation entre la surface ombrée par les contacts métalliques et la résistance série d'une cellule solaire conventionnelle de dimension industrielle ( $125 \times 125 \times 0.02$ ) mm. Nous avons vu aussi l'évolution de chacune entre elles en fonction de l'espace inter-doigts de la grille de collecte. Ainsi que l'impact de la largeur et de l'épaisseur des doigts sur le rendement de la cellule.

D'après le calcul du taux de contribution de chaque élément résistif à la résistance série, nous avons constaté que c'est la grille métallique qui prédomine les pertes résistives dans une cellule solaire conventionnelle, en particulier les doigts de contacts, d'où une recherche des dimensions optimales est cruciale afin d'optimiser le rendement de conversion d'une cellule solaire.

#### V. REFERENCES

- [1] M.M.Hilali, A.Rohatgi, "Development of Screen-Printed Silicon Solar Cells With High Fill Factors on  $100 \Omega/\text{sq}$  Emitters" IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 51, No. 6, JUNE 2004.
- [2] A. Luque, S. Hegedus «*Handbook of photovoltaic science and engineering*»; WILEY; 2003.
- [3] C. Honsberg, and S. Bowden, Photovoltaics: Devices, systems and applications [CDROM]. Sydney, Australia: University of new south wales, 1988.
- [4] P N Vinod, B C Chakravarty, Mohan Lal, Ravi Kumar, S N Singh, A novel method for the determination of the front contact resistance in large area screen printed silicon solar cells. Semicond. Sci. Technol. 15 (2000) 286–290.
- [5] P. N. Vinod, Application of power loss calculation to estimate the specific contact resistance of the screen-printed silver ohmic contacts of the large area silicon solar cells. J Mater Sci: Mater Electron (2007) 18:805–810.
- [6] L.D.Meier, and D,K,Schroder, "Contact Resistance: Its Measurement and Relative Importance to Power Loss in a Solar Cell", IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. ED-31, No. 5, May 1984.
- [7] A.GEOTZBERGER, J.Knobloch, B.Voss. "Crystalline silicon solar cells", pp102-113, John Wiley and Sons; 1997
- [8] T. Markvart and L. Castafier. «*Solar Cells: Materials, Manufacture and Operation*», pp 98, ELSEVIER, 2005.