Effet du coefficient de réflexion et de la profonde de jonction sur les caractéristiques électriques d'une photopile au silicium monocristallin.

Chenoufi Hakim
Département d'Electrotechnique et d'hydraulique
Centre Universitaire El-oued - Algérie.

ملخص :

تأثير معامل الانعكاس وعمق طبقة التنشيط على الخصائص الكهربائية لبطارية شمسية مصنوعة من السيليسيوم الأحادي البلورات

تهدف هذه الورقة إلى عرض مدى تأثير معامل الانعكاس وكذا عمق طبقة التنشيط على الخصائص الكهربائية لبطارية شمسية . وإن دراسة تأثير معامل الانعكاس ترتكز على عبارة حسابية اقترحناها لتمثيل الانعكاس .

Résumé : Cet article a pour intention de présenter l'influence du coefficient de réflexion et de la profondeur de jonction sur les caractéristiques électriques d'une photopile. L'étude de l'influence du coefficient de réflexion se base sur une expression algébrique qu'on a proposée pour modéliser la réflexion.

Mots clés : photopile, coefficient de réflexion, profondeur de jonction, irradiance spectrale, diffusion.

I. Introduction

Le rendement d'une photopile est limité par plusieurs facteurs tels que le coefficient de réflexion du semi-conducteur, la profondeur de diffusion et le gap du matériau qui limite la conversion en énergie électrique [1,2]. Plusieurs techniques existent pour améliorer le rendement, par exemple le dépôt d'une couche d'anti-réflexion sur la cellule solaire ; le rayonnement réfléchi par le matériau est réinjecté grâce à cette couche, ainsi les pertes sont réduites [1,2]. Une autre solution consiste à incorporer les impuretés dopantes dans le silicium à une dose précise et une profondeur suffisamment mince de telle sorte que la zone de charge d'espace se situe très près de la surface [1,2]. Une autre technique repose sur

l'utilisation de plusieurs matériau ayants des énergies de gap différentes comme l'arséniure de gallium ou le tellurure de cadmium, on obtient alors une structure multicouches, chaque couche admet une efficacité maximale dans une région du spectre, ceci augmente le rendement mais augmente aussi le prix de la cellule [1,2].

II. Spectre solaire

L'efficacité des modules dépend fortement de la fréquence du rayonnement incident. Pour les modules destinés aux applications terrestres, il s'agit du spectre ***1,5AM***, qui correspond au spectre de la lumière solaire après qu'elle ait traversé une épaisseur d'air pur correspondant à ***1,5*** fois l'épaisseur de l'atmosphère. Cette situation se présente en pratique lorsque le ciel est très clair et que le soleil se trouve à une hauteur de ***41,8°*** au-dessus de l'horizon. Malheureusement, dans ce cas, l'intensité du rayonnement est toujours inférieure à ***1000 W/m²*** à cause de l'absorption d'une partie du rayonnement par l'atmosphère. Un facteur de normalisation est donc appliqué pour ramener le spectre à la puissance globale voulue de ***1000 W/m²***. En fait, ce spectre est défini par les normes. Les satellites ont permis de mesurer avec précision le spectre réel solaire hors de l'atmosphère terrestre, qui diffère légèrement du spectre théorique du corps noir à ***5800 K*** dont la répartition spectrale du rayonnement électromagnétique est donnée par la loi de Planck. La Fig.1-a représente l'irradiance spectrale en atmosphère peu polluée pour diverses conditions d'air masse. Le graphe 1-b donne la distribution normalisée à ***1000 W/m²*** de l'éclairement à la condition ***AM1,5***.

III. indices optiques

Dans le cas des cellules solaires à applications terrestres, le matériau semi-conducteur doit absorber fortement les longueurs d'ondes disponibles du spectre ***AM1,5***. Empiriquement, le coefficient d'absorption du silicium est modelé par la formule suivante [3] :

$$\alpha(\lambda) = 0{,}526367 - 1{,}14425\lambda^{-1} + 0{,}585368\lambda^{-2} + 0{,}039958\lambda^{-3} \qquad (1)$$

La variation du coefficient de réflexion du silicium pendant l'irradiation est caractérisée par l'expression ci-dessous, qui résulte de nous propres calculs où nous nous sommes inspirés des profils qui apparaissent le plus couramment dans la littérature.

$$R_{opt} = \sqrt{6{,}961 + \frac{2{,}068\lambda^2}{\left(\lambda^2 - 0{,}12\right)}} \qquad (2)$$

À partir de l'expression 2, on a obtenu par simulation la Fig.2, où on peut y remarquer que l'intervalle ***0,3*** et ***0,7 μm*** est le siège de variation importante du coefficient de réflexion, par contre au-delà de ***0,7 μm***, le coefficient tend vers un palier.

IV. Courant photogénéré

Pour que les photons pénètrent en grand nombre dans la zone de champ interne de la cellule solaire, il faut que le flux incident ne soit que faiblement absorbé par la région ***N***. Soit ***x*** l'épaisseur de la région ***N*** (profondeur de la diffusion ou épaisseur de matière pour accéder à la zone de déplétion) et ***α(λ)*** son coefficient d'extinction optique (coefficient d'absorption) à la fréquence ***v*** des photons du flux, la partie de flux incident de lumière ϕ_0 qui arrive dans la jonction après réflexion sur la face avant et transmission par la zone dopée ***N*** (Fig.3.), est égale à [4,5]:

$$\left(1 - R_{opt}(\lambda)\right)\phi_0 \exp\left(-\alpha(\lambda)x\right) \qquad (3)$$

La lumière pénètre dans la cellule par la couche *N* qui joue ainsi le rôle de couche fenêtre; cette position lui confère une importance capitale dans les performances de la cellule. La couche doit en effet être suffisamment mince de telle sorte que la zone de charge d'espace se situe très près de la surface, polie et transparente pour ne pas absorber une fraction appréciable de la lumière incidente (cependant, l'épaisseur de la couche doit être suffisante pour assurer un bon champ électrique au sein de la couche intrinsèque). Les contraintes sur la couche ***P*** sont moins strictes que pour la couche fenêtre ***N***, car l'essentiel de la lumière a déjà été absorbée avant de l'atteindre. Seule la conductivité et la qualité de l'interface ***N*** sont essentielles pour avoir une meilleure collecte.

La densité du courant de lumière J_{sc} est égal au nombre d'électrons (ou au nombre de trous) qui ont été créés par effet photoélectrique et qui sont arrivés jusqu'à la limite de la zone de champ par seconde [4,5] :

$$|J_{sc}| = \left[\frac{q\eta(\lambda)(1 - R_{opt}(\lambda))\lambda}{hc} \phi_0 \right] \exp(-\alpha(\lambda)x) \qquad [4]$$

avec η le rendement de conversion photonique et c vitesse de la lumière dans le vide.

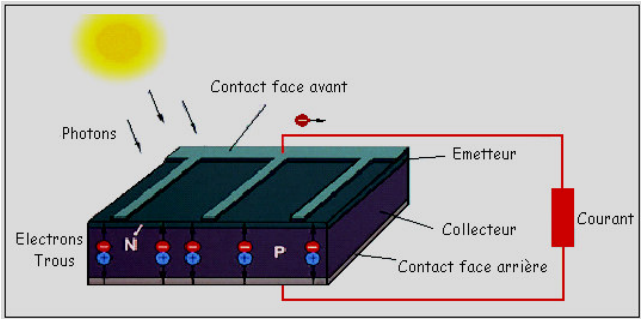


Fig.3 : Vue schématique de la cellule solaire.

L'outil de simulation présente les profils de densité de courant en faisant varier, outre la profondeur de jonction, le coefficient de réflexion, où il est nul dans le cas de la Fig.4., et d'autre part, voir Fig.5., il est donné par une distribution analytique calculée à partir de l'expression proposée plus haut et illustrée à la Fig.1.

Ces résultats nous conduisent à faire quelques commentaires. Lors des ajustements, en imposant une valeur nul à R_{opt}, nous apercevrons une nette augmentation des amplitudes des photocourants. De plus, le pic de photocourant ($60,5\ mA/cm^2$) est obtenu pour $x=0,5$. Cependant, une réduction remarquable de la densité du photocourant est observée quand on tient compte de la réflexion. Ainsi, pour la même profondeur de jonction, la valeur pic du photocourant est estimée à $27,63\ mA/cm^2$. De ce fait, on peut conclure que les profils finals sont fortement conditionnés par deux facteurs qui sont le coefficient de réflexion et le paramètre de dépôt (x).

Notons, d'un point de vue énergétique, que le maximum de J_{sc} se situe au voisinage de $1,5\ eV$ (Fig.4. et 5.). Lorsque l'énergie du photon s'éloigne de part et d'autre de la valeur optimum de $1,5\ eV$ ($0,83\ \mu m$) le photocourant diminue. Du coté des basses énergies, cette diminution

résulte du fait que le photon traverse la cellule sans être absorbé, mais au fur et à mesure que l'énergie du photon se rapproche du gap du matériau, la conversion photon-courant commence à prendre importance. Du coté des hautes énergies, l'excédent d'énergie fournie à l'électron est perdu par thermalisation (l'électron percute des atomes du réseau et transmet au cours de ce processus son excédent d'énergie au réseau) [6]. Les pertes par transmission et thermalisation constituent plus de ***60 %*** de l'énergie incidente [6]; *30 %* de cette énergie est aussi perdue par réflexion de la lumière à la surface de la cellule, par absorption dans les couches inactives et par recombinaison des paires électron-trou [6], ce qui résulte en un rendement quantique faible. En réalisation de module photovoltaïque, l'effet de thermalisation est réduit en empilant des cellules de gaps différents, qui échantillonnent le spectre solaire (cellules multicolores), et l'effet du coefficient de réflexion est minimisé par dépôt d'une couche antiréfléchissante [6,7].

V. Caractéristique de la cellule

La principale technique utilisée pour caractériser une cellule solaire photovoltaïque est sa caractéristique $I_p(V_p)$ sous éclairement. Cette dernière permet de calculer la puissance fournie par la cellule et son rendement de conversion. Notons ici que la valeur de la densité du courant I_p est obtenue par la mesure de la réponse spectrale.

Le circuit électrique équivalent de la cellule solaire est représenté sur la Fig.6. Il s'agit d'une diode en parallèle avec un générateur délivrant un photocourant auxquels il faut ajouter une résistance parallèle R_{sh} et une résistance série R_s pour tenir compte des pertes dans la cellule. R_s caractérise la résistance des contacts, des interfaces et des couches; elle doit être la plus faible possible [6,7]. Quant à R_{sh}, elle représente les courants de fuite, les pertes dues aux impuretés et aux défauts; plus sa valeur est grande meilleure sera la cellule [6,7].

La caractéristique courant-tension d'une cellule solaire, sous un niveau d'intensité d'illumination, correspond à celle d'une diode décalée d'une quantité constante correspondant au photocourant dans la cellule. La caractéristique est décrite par la densité de courant de court-circuit ($V_p = 0$, $I_p = Icc$) et la tension en circuit ouvert

($V_p = V_{oc}$, $I_p = 0$). Le produit $I_p x V_p$ correspond à la densité de puissance fournie par la cellule. Ce produit atteint un maximum au point (V_{pMax}, I_{pMax}) qui correspond à la puissance maximale que l'on peut extraire de la cellule. Le rapport de ce produit sur le produit $I_{cc} x V_{oc}$ est défini comme le facteur de forme FF :

$$FF = \frac{I_{pMax} V_{pMax}}{I_{cc} V_{oc}} \qquad (5)$$

Le rendement de conversion d'une cellule (en %) se définit comme le rapport de la puissance fournie par la cellule à la puissance de l'éclairement incident $\phi_{optique}$:

$$r = \frac{I_{p\,Max} V_{pMax}}{\phi_{optique}} \times 100 = \frac{FF.I_{cc}.V_{oc}}{\phi_{optique}} \times 100 \qquad (6)$$

Les valeurs numériques des résistances utilisées dans la simulation sont [6] : $R_s = 1\ \Omega.cm^2$ et $R_{sh} = 10^4\ \Omega.cm^2$.

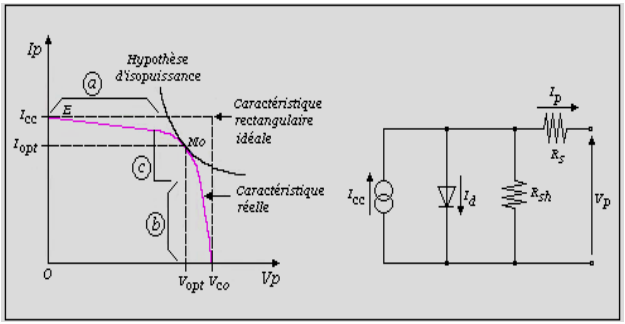


Fig.6 : Caractéristique et schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.

VI. Caractéristique courant-tension sous éclairement

La cellule sous 'étude, est une cellule au silicium monocristallin de $100mm x 100mm$ soumise aux conditions nominales correspondant à une température interne de $25\ °C$, et à un ensoleillement très élevé ($1000\ W/m^2$). Les valeurs du photocourant sont extraites par la mesure de la réponse spectrale (Fig. 1a).

La simulation du réseau de caractéristiques $I_p = f(V_p)$ est effectuée pour quatre prédépôts de phosphore (région N) correspondant à

quatre profondeurs de diffusion : $x(\mu m) = \{0,5,\ 2,\ 8,20\}$, et en négligeant dans un premier temps la réflexion, et dans un second temps celle-ci est exprimée par l'expression évoquée au tout début (éq.1). Donc, le réseau de caractéristiques est paramétré en x et R_{opt}. Les résultats de nos simulations sont reportés sur les Fig. 7 et 8. On observe une nette diminution de la densité de courant débité sous une illumination nominale de $100\ mW/cm^2$ (spectre $AM1.5$) à des longueurs de diffusion élevées. Cette chute prend d'autant plus d'importance que la longueur de diffusion (profondeur de jonction) est de plus en plus élevée. D'autre part, la simulation démontre que l'introduction de l'expression du coefficient de réflexion agit directement sur le courant de sortie de la cellule. Cette dernière traduit la réflexion des longueurs d'onde de la lumière à l'interface couche/substrat, pour des photons d'énergie au voisinage du gap du matériau.

VII. Puissance électrique et rendement

L'augmentation du coefficient de réflexion et de la profondeur de jonction affecte d'une manière prépondérante la densité du courant de sortie et légèrement la tension de circuit ouvert, pouvant entraîner des effets dramatiques sur la caractéristique électrique de la photopile. En effet, ces paramètres présentent un test hautement significatif permettant de valider le rendement et la puissance fournie par la cellule. Les Fig.9 et 10 mettent en évidence le pouvoir dominant du coefficient de réflexion et du paramètre technologique (profondeur de jonction) sur les valeurs des puissances et des rendements. De plus, on observe une nette décroissance du rendement en fonction du paramètre x. On peut conclure que l'augmentation des paramètres R_{opt} et x, a un effet dramatique sur la caractéristique $I_p=f\ (V_p)$. En terme de diffusion, ceci peut être expliqué par le fait que la couche fenêtre N est épaisse ($x> 2\ \mu m$), elle absorbe donc une partie importante de la lumière incidente. En conséquence, la couche N absorbe moins bien la lumière incidente si son épaisseur ne dépasse pas quelques μm. En terme de réflexion, le rendement est d'autant meilleur que le coefficient de réflexion est faible, cela se paie par l'introduction d'une couche anti-réfléchissante. Par simulation, les meilleurs résultats sont obtenus pour des

longueurs d'ondes ne dépassant pas $1\mu m$. Les tableaux ci-dessous résument les résultats obtenus par simulation.

$x\ (\mu m)$	$I_{cc}\ (mA/cm^2)$	$V_{oc}\ (V)$	$P_{max}\ (mW/cm^2)$	FF	$r\ (\%)$
0,5	60,5	0,72	36,84	0,84	39
2	54,4	0,71	33	0,84	35
8	35,62	0,70	21,2	0,84	22
20	15,27	0,68	8,75	0,83	9

Tableau 1 : résultats de simulation en négligeant la réflexion.

$x\ (\mu m)$	$I_{cc}\ (mA/cm^2)$	$V_{oc}\ (V)$	$P_{max}\ (mW/cm^2)$	FF	$r\ (\%)$
0,5	27,63	0,7	16,26	0,84	17
2	24,85	0,69	14,56	0,84	15
8	16,27	0,68	9,35	0,84	9
20	6,97	0,66	3,84	0,83	4

Tableau 2 : résultats de simulation en tenant compte de la réflexion.

VIII. Conclusion

L'aspect quantitatif des résultats a permis de valider la formulation modélisant le coefficient de réflexion. Il a été démontré que la performance maximum peut être atteinte lorsque la profondeur de jonction sera de plus en plus faible (<= $0,5\ \mu m$). La simulation a permet de mettre en exergue l'influence prépondérante de la profondeur de jonction et du coefficient de réflexion. En effet, l'augmentation des valeurs de la profondeur de jonction s'avère particulièrement pénalisante pour ce qui concerne le rendement. La profondeur de jonction de $0,5\ \mu m$ nous a permis d'atteindre l'état de l'art en rendement (17%), associé à une puissance de $16,26\ mW/cm^2$.

IX. Bibliographie

[1] Liébard, A., Philibert, C. et Rodot, M., "Du neuf sous le soleil, Energie et Environnement", Calman-Lévy/Systèmes solaires, Paris, France (1990).

[2] Maycock, P.D., Summary of the World Photovoltaic Technology, Performance, Cost and Market Forecast to 2010, Rapport préparé pour SESCI, Ottawa, Canada (1991-1992).

[3] B.O. Seraphin "Solar energy conversion-Solid state physics aspects "Topics in applied physics. Vol 31. Springer-Verlag (1979).

[4] S.M. Sze, "VLSI Technology", 2nd edition, McGraw-Hill Editions (1988).

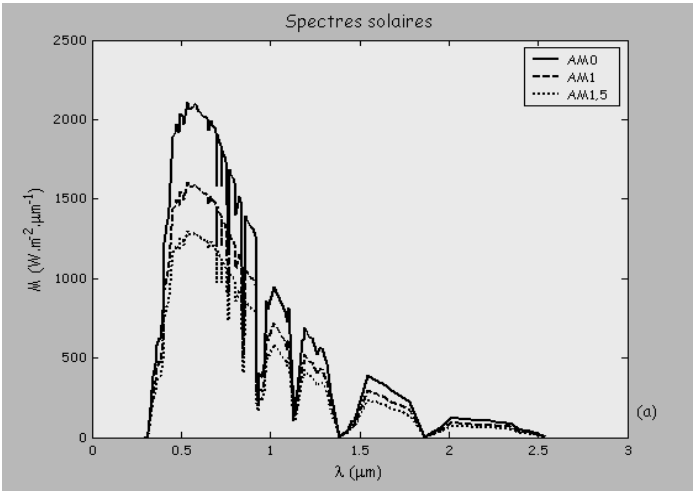
[5] Ricaud A., Photopiles solaires, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne (1997).

[6] Henry Mathieu, " physique des dispositifs et des composants électronique", Dunod, 2001.

[7] Winter (C.J.), Sizmann (R.L.) et Vant-Hull (L.L.). – Solar power plants.

Fundamentals, Technology, Systems, Economics.

Annexes : Résultats de simulation



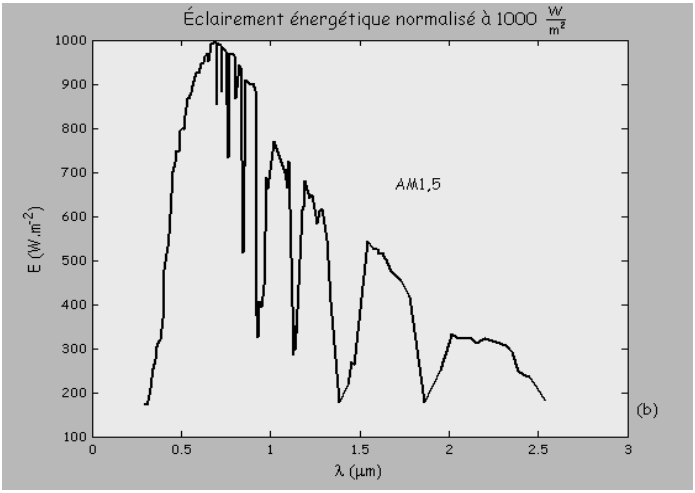


Fig.1 :
a. Spectres solaires.
b. Eclairement normalisé.

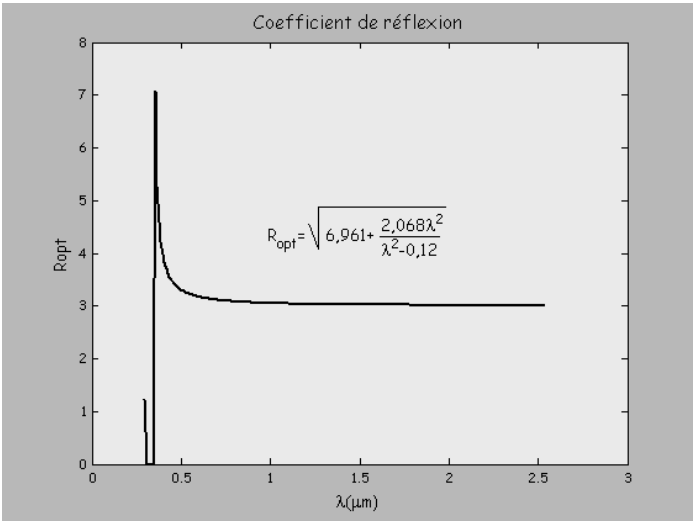


Figure 2 : Coefficient de réflexion.

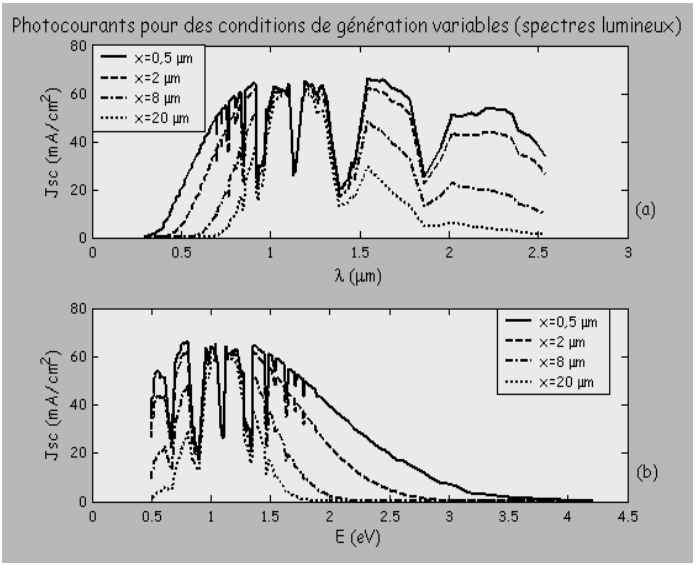


Fig.4 : Photocourants avec $R_{opt}=0$

a. En fonction de la longueur d'onde.
b. En fonction de l'énergie des photons.

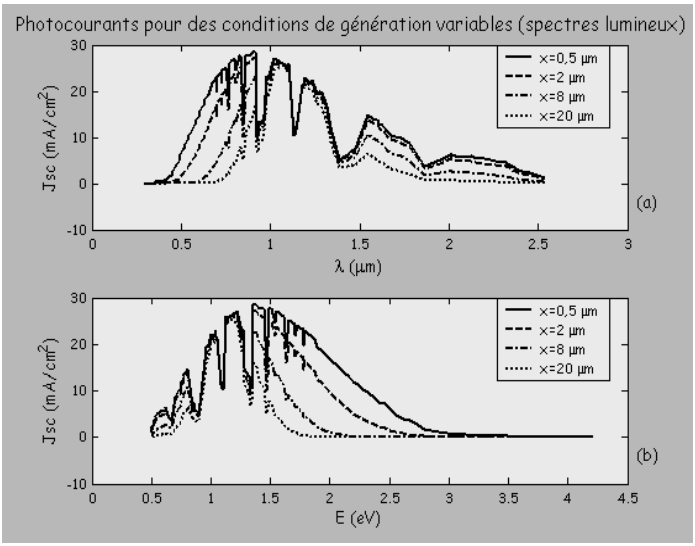


Fig.5 : Photocourants avec $R_{opt} = \sqrt{6,961 + \frac{2,068\lambda^2}{(\lambda^2 - 0,12)}}$

a. En fonction de la longueur d'onde.

b. En fonction de l'énergie des photons.

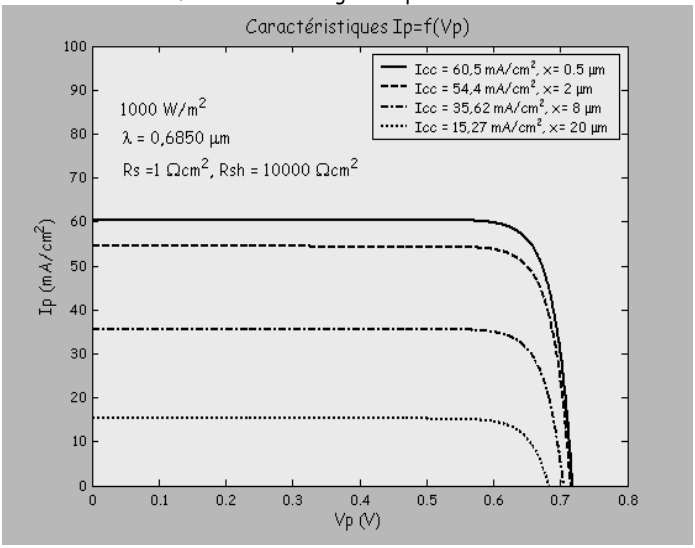


Fig.7 : Réflexion négligée.

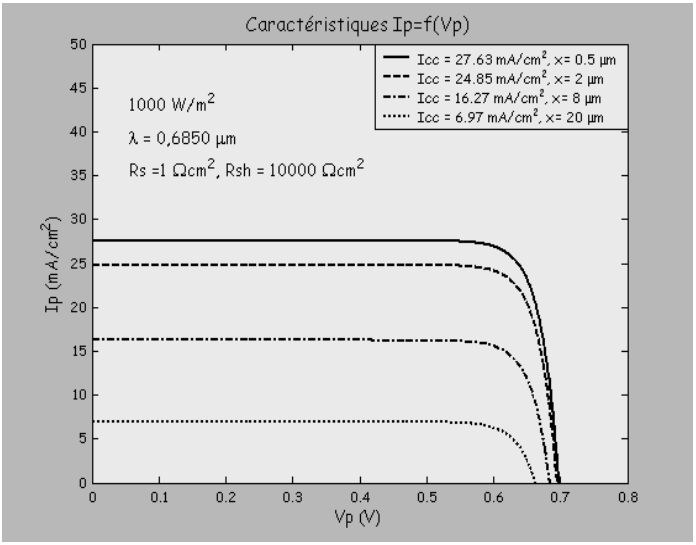


Fig.8 : Réflexion considérée.

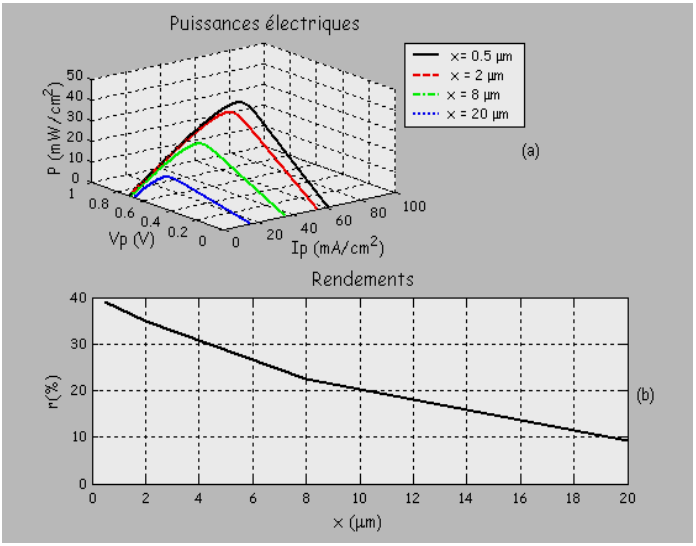


Fig.9 : $R_{opt}=0$

a. Puissances électriques.
b. Rendement.

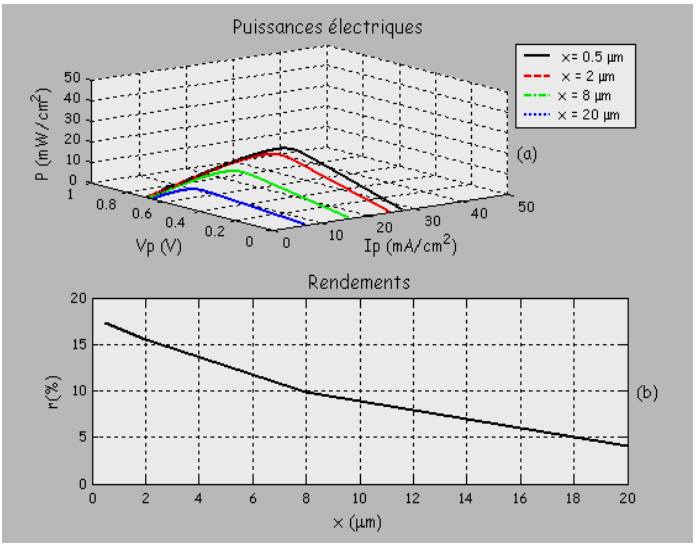


Fig.10 : $R_{opt} = \sqrt{6,961 + \frac{2,068\lambda^2}{(\lambda^2 - 0,12)}}$

a. Puissances électriques.

b. Rendements.