

IV.1 Introduction :

Ces dernières années, en raison des coûts élevés de l'expérimentation, les chercheurs se sont orientés vers la simulation. La simulation par le logiciel SILVACO-ATLAS permet de déterminer les caractéristiques électriques des cellules solaires comme les caractéristiques densité de courant – tension (J - V) dans l'obscurité et sous éclairement AM_0 , et par la suite les paramètres photovoltaïques liés à ces caractéristiques tels que la densité du courant de court circuit (J_{sc}), la tension en circuit ouvert (V_{oc}), le facteur de forme (FF), la puissance maximale (P_{max}) et le rendement de conversion photovoltaïque (η). Une autre caractéristique essentielle qui peut être déterminée est la réponse spectrale de la cellule en fonction de la longueur d'onde du spectre AM_0 .

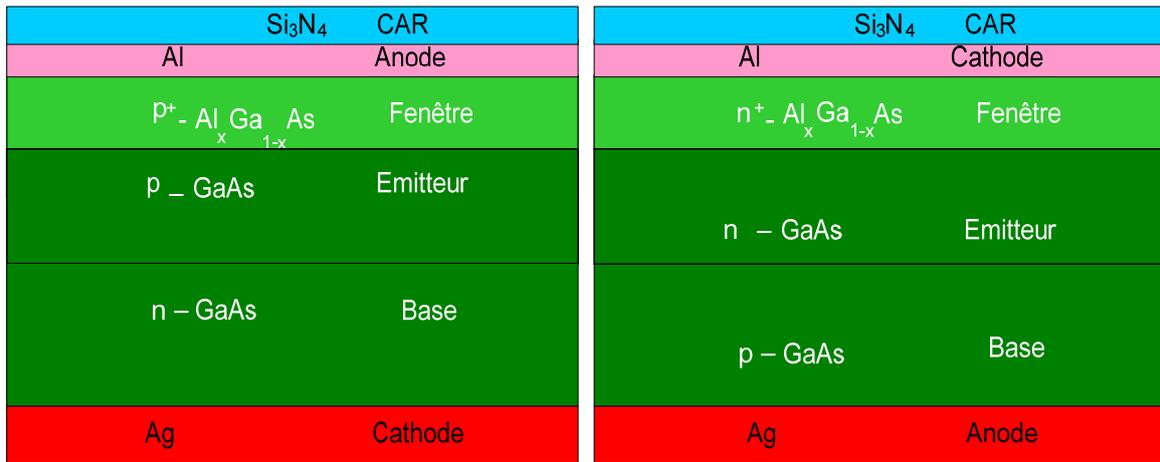
Dans ce chapitre nous présentons l'étude des caractéristiques électriques de cellule solaire à hétérojonction (AlGaAs / GaAs) de structure p^+pn et n^+np par le logiciel de simulation SILVACO-ATLAS. Compte tenu de l'importance du rôle de l'hétérojonction (AlGaAs / GaAs) on peut voir son impact sur les caractéristiques de la cellule dans les conditions de l'obscurité et sous éclairement. Le fait que ces cellules sont destinées généralement aux applications spatiales, l'éclairement considéré est AM_0 .

Les résultats de la simulation sont présentés, en première partie, pour une cellule solaire ($p^+ - Al_xGa_{1-x}As / p-GaAs / n-GaAs$) sans et avec substrat (GaAs), tout en faisant varier la fraction molaire ($x(Al)$) de l'aluminium de la couche fenêtre ($Al_xGa_{1-x}As$). En deuxième partie, nous présentons les résultats pour une cellule ($n^+ - Al_xGa_{1-x}As / n-GaAs / p-GaAs$) sans et avec substrat (GaAs) toujours pour différentes fractions molaires ($x(Al)$) de l'aluminium de la couche ($Al_xGa_{1-x}As$).

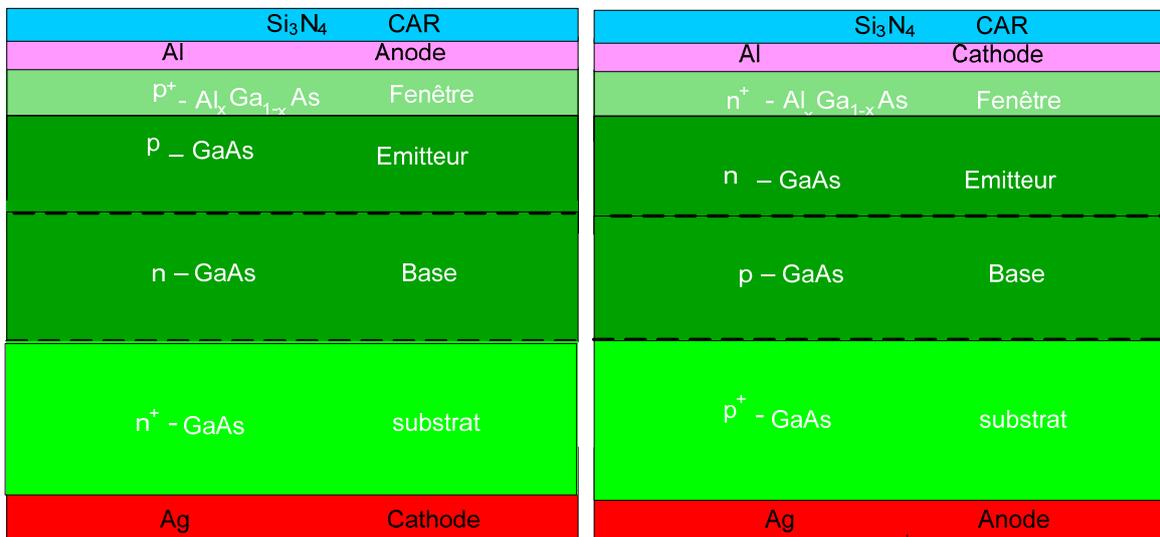
IV.2 Structures étudiées :

La figure IV-1 schématise la structure des cellules étudiées ; la couche (AlGaAs) utilisée comme une fenêtre suivie des couches émetteur et base en (GaAs) avec un substrat en (GaAs) (figure IV-1 (b)) et sans substrat (figure IV-1 (a)). Les schémas à gauche dans la figure correspondent à la structure p^+pn , ceux à droite à la structure n^+np . La couche antireflet (Si_3N_4) sert à améliorer le confinement de la lumière. Les contacts métalliques supérieurs sont en (Al), ceux inférieurs en (Ag).

Le tableau (IV-1) donne les épaisseurs des différentes couches de la structure ainsi que les concentrations du dopage dans chaque couche pour une meilleure approche à la réalité tout en tenant compte des différences dans les matériaux utilisés et les paramètres optiques.



(a)



(b)

Figure IV-1 : Schéma des cellules solaires à hétérojonction (AlGaAs/GaAs) étudiées : a) sans substrat, b) avec substrat.

	Fenêtre (Al _x Ga _{1-x} As)	Émetteur (GaAs)	Base(GaAs)	Substrat(GaAs)
	p ⁺	p	n	n ⁺
Epaisseur(μm)	0.03	0.3	2.5	300
Dopage(cm ⁻³)	2×10 ¹⁸ cm ⁻³	2×10 ¹⁸ cm ⁻³	2×10 ¹⁷ cm ⁻³	2×10 ¹⁸ cm ⁻³

Tableau IV-1 : Epaisseur et dopage des différentes couches de la cellule à hétérojonction (AlGaAs/GaAs) [56].

Les mobilités des électrons et des trous sont calculées selon le model de leur dépendance en concentration de dopage. Dans ce model, les mobilités sont interpolées depuis les valeurs du tableau IV-2 [49].

Concentration (cm ⁻³)	Mobility in GaAs (cm ² /V-s)	
	Electrons	Holes
1.0×10 ¹⁴	8000.0	390.0
2.0×10 ¹⁴	7718.0	380.0
4.0×10 ¹⁴	7445.0	375.0
6.0×10 ¹⁴	7290.0	360.0
8.0×10 ¹⁴	7182.0	350.0
1.0×10 ¹⁵	7300.0	340.0
2.0×10 ¹⁵	6847.0	335.0
4.0×10 ¹⁵	6422.0	320.0
6.0×10 ¹⁵	6185.0	315.0
8.0×10 ¹⁵	6023.0	305.0
1.0×10 ¹⁶	5900.0	302.0
2.0×10 ¹⁶	5474.0	300.0
4.0×10 ¹⁶	5079.0	295.0
6.0×10 ¹⁶	4861.0	270.0
8.0×10 ¹⁶	4712.0	245.0
1.0×10 ¹⁷	4600.0	240.0
2.0×10 ¹⁷	3874.0	210.0
4.0×10 ¹⁷	3263.0	205.0
6.0×10 ¹⁷	2950.0	200.0
8.0×10 ¹⁷	2747.0	186.9
1.0×10 ¹⁸	2600.0	170.0
2.0×10 ¹⁸	2060.0	130.0
4.0×10 ¹⁸	1632.0	90.0

Tableau IV-2 : Dépendance des mobilités dans le GaAs avec la concentration du dopage.

La présentation par SILVACO-ATLAS de la structure des cellules étudiées (qu'elle soit p^+pn ou n^+np) est illustrée dans la figure IV-2 pour le cas (a) sans substrat et (b) avec substrat.

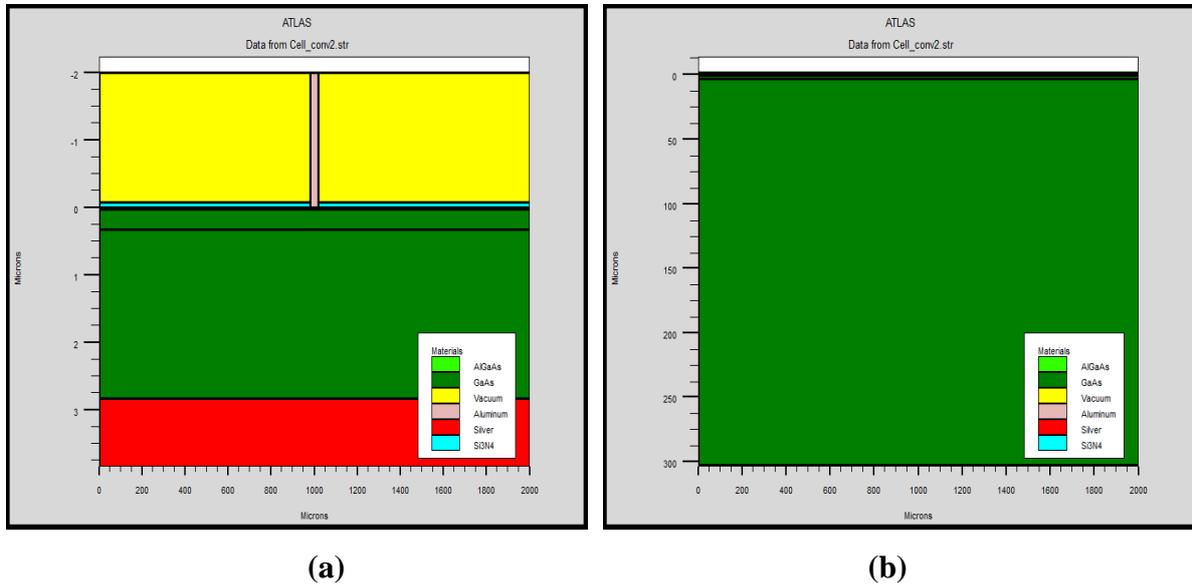


Figure IV-2 : Présentation de SILVACO-ATLAS de la structure des cellules à hétérojonction (AlGaAs/GaAs) étudiées ; (a) sans substrat et (b) avec substrat.

Le maillage appliqué selon SILVACO-ATLAS à ces structures pour les deux cas ; (a) sans substrat et (b) avec substrat, est présenté dans la figure IV-3.

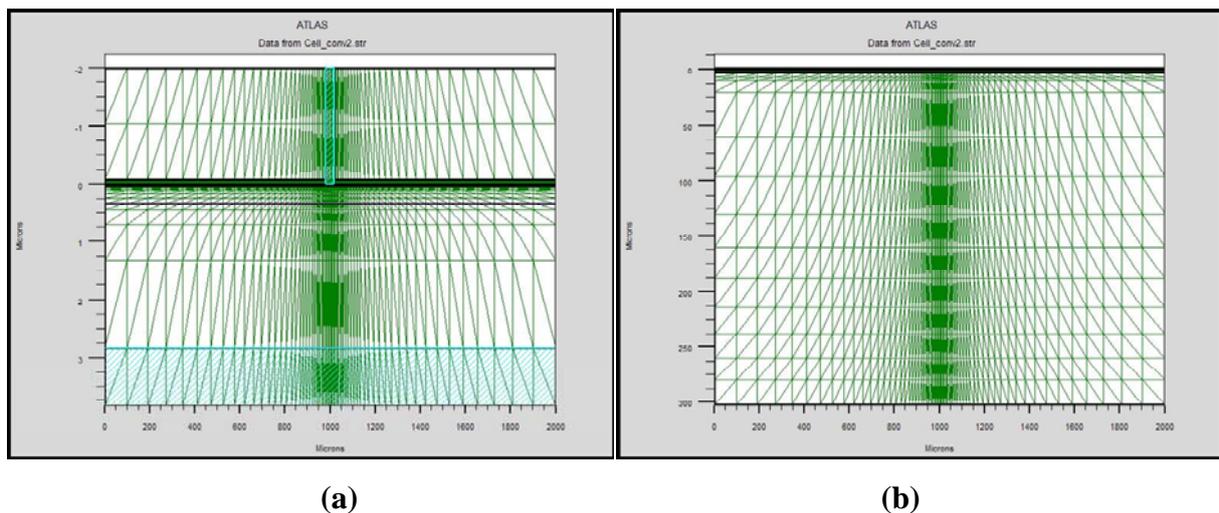


Figure IV-3 : Maillage appliqué selon SILVACO-ATLAS à la structure des cellules à hétérojonction (AlGaAs/GaAs) étudiées ; (a) sans substrat et (b) avec substrat.

Pour les paramètres optiques (indice de réfraction n et coefficient d'extinction k) de la couche fenêtre ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$), nous avons utilisé leurs spectres pour différentes fraction molaire x de l'aluminium (Al) calculés depuis la littérature, ces données sont présentées dans la figure IV- 4.

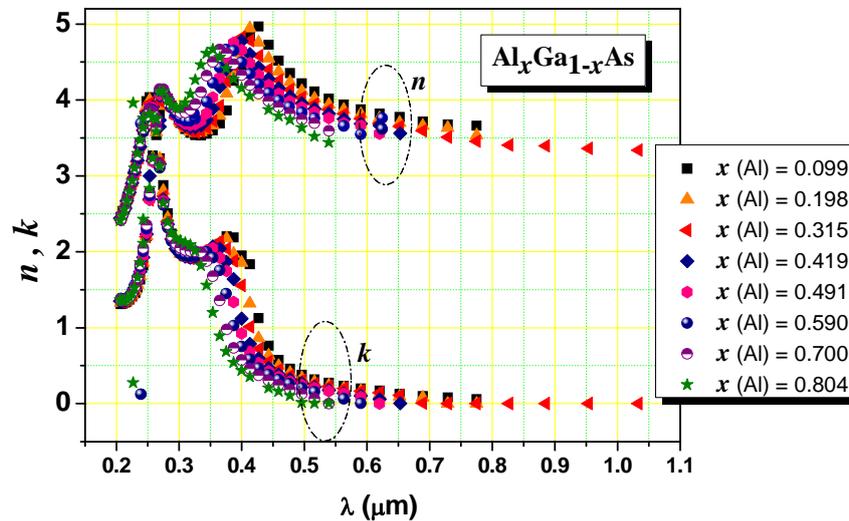


Figure IV-4 : Données des paramètres optiques (n, k) de la couche ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) pour différentes fraction molaire x de l'aluminium (Al) calculées depuis la littérature [55].

En faisant varier la fraction molaire x de l'aluminium, la largeur du gap d'énergie E_g de la couche ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) varie comme il est illustré sur la figure IV-5.

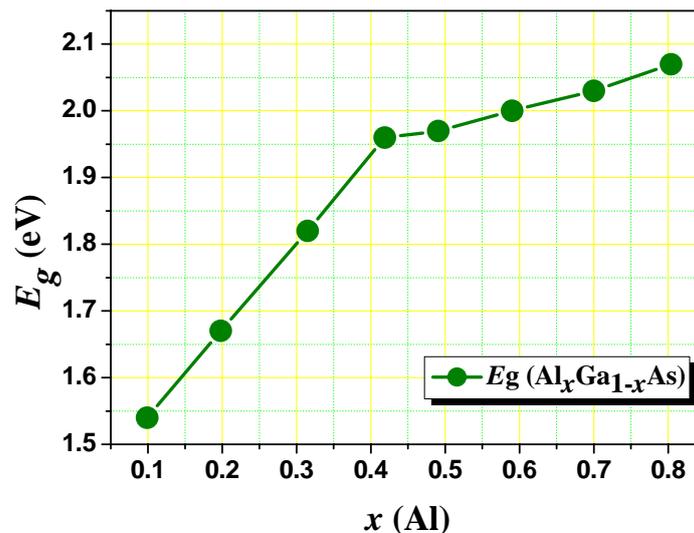


Figure IV-5 : Largeur du gap d'énergie E_g de la couche ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) en fonction de la fraction molaire x de l'aluminium [55].

Les paramètres optiques de la couche (GaAs) sont présentés dans la figure IV-6.

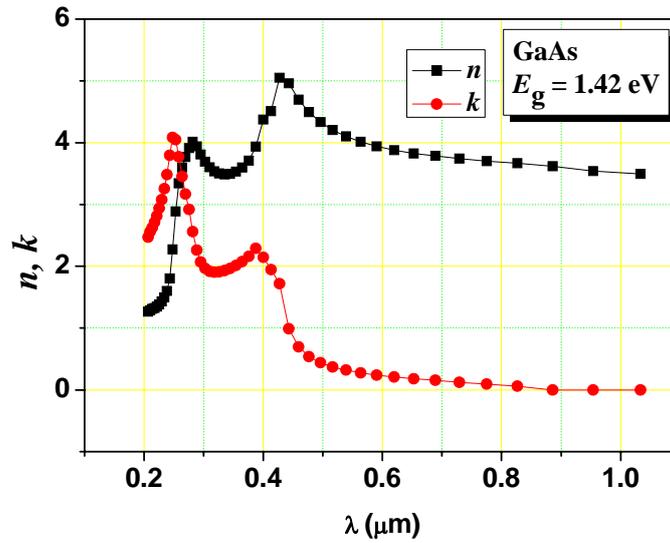


Figure IV-6 : Paramètres optiques de la couche (GaAs) [55].

Les paramètres optiques du contact métallique supérieur en (Al) sont présentés dans la figure IV-7.

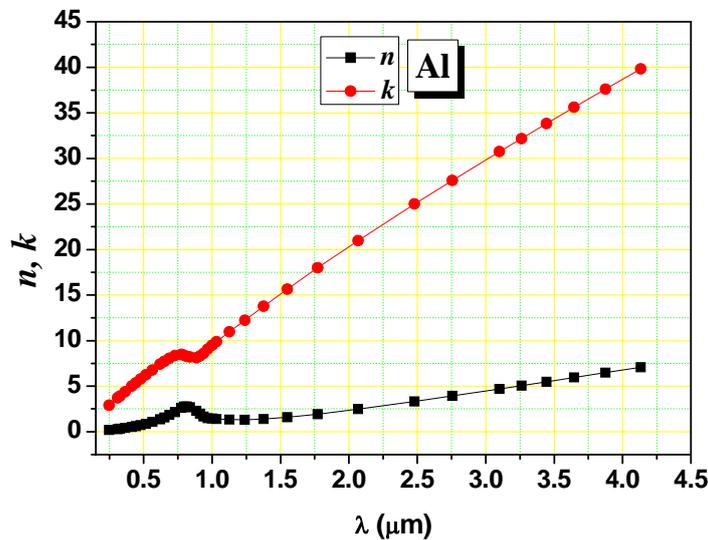


Figure IV-7 : Paramètres optiques du contact métallique supérieur en (Al) [55].

Les paramètres optiques du contact métallique inférieur en (Ag) sont présentés dans la figure IV-8.

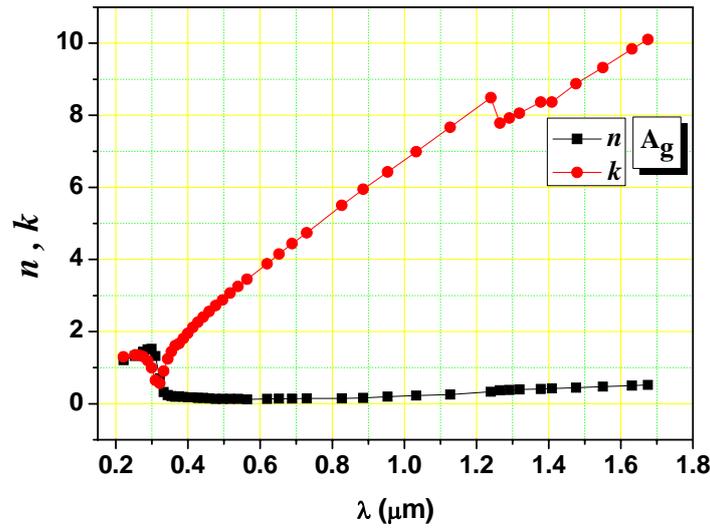


Figure IV-8 : Paramètres optiques du contact métallique inférieur en (Ag) [55].

Pour la couche (Si_3N_4), l'indice de réfraction $n = 2.05$.

Les épaisseurs des contacts métalliques et de la couche (Si_3N_4) et leur positionnement (en μm) sont illustrées dans la figure IV-9 pour le cas de la structure sans substrat.

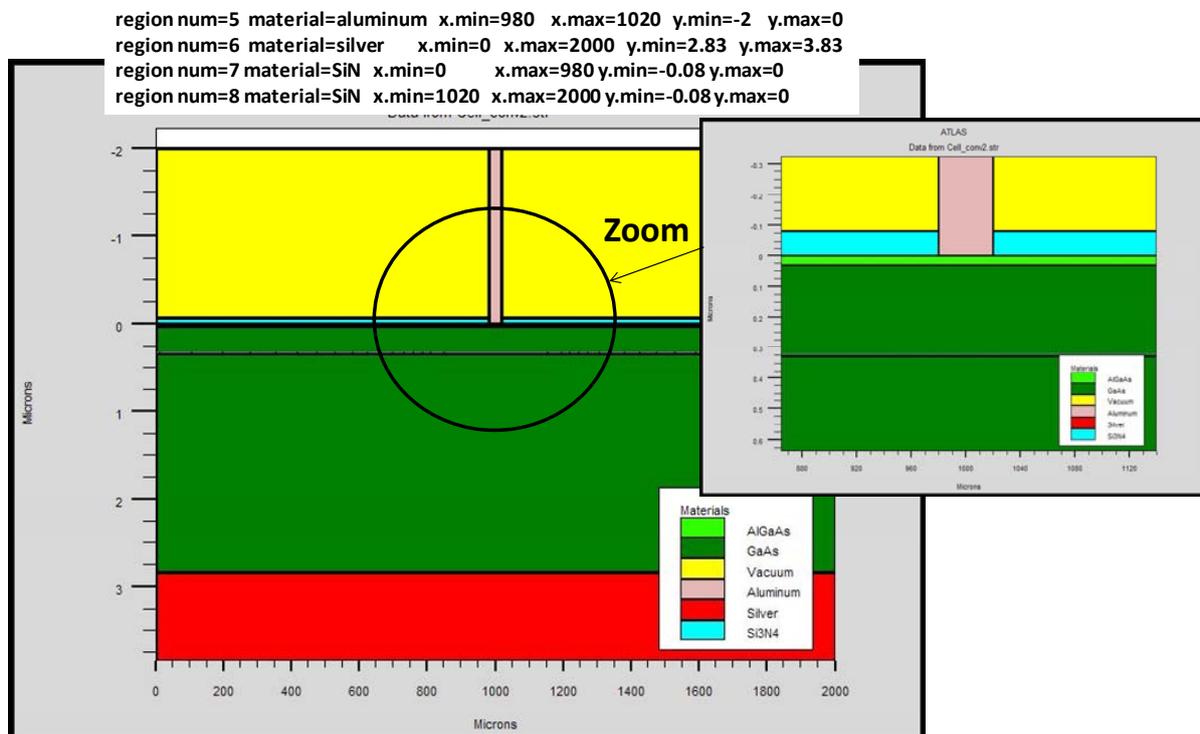


Figure IV-9 : Epaisseurs des contacts métalliques et de la couche (Si_3N_4) et leur positionnement (en μm) pour le cas de la structure sans substrat.

y désigne les variations de la position en profondeur de la structure, tandis que x désigne les variations horizontales de la position. A l'interface $y = 0 \mu\text{m}$ qui présente la limite supérieure de la couche fenêtre (AlGaAs), les conditions aux limites imposées sont ceux des vitesses de recombinaisons des électrons et des trous respectivement $S_n=10^3 \text{ cm/s}$ et $S_p=10^3 \text{ cm/s}$. A la limite inférieure de la base (GaAs) (l'interface GaAs/Ag), où $y = 2.83 \mu\text{m}$, est aussi imposée la condition des vitesses de recombinaison $S_n=10^5 \text{ cm/s}$ $S_p=10^5 \text{ cm/s}$.

On utilise ces mêmes valeurs des vitesses de recombinaison pour le cas de présence de substrat, seulement la position de la limite inférieure (GaAs/Ag) où est imposé les conditions des vitesses de recombinaison décale vers le bas en présence de substrat (GaAs) d'épaisseur $300 \mu\text{m}$, $y=302.83 \mu\text{m}$. Les épaisseurs des contacts métalliques et de la couche (Si_3N_4) sont identiques à ceux illustrées dans la figure IV-8.

L'éclairement solaire au quel sont soumises les cellules est celui hors atmosphère (AM_0) dont le spectre est illustré sur la figure IV- 10.

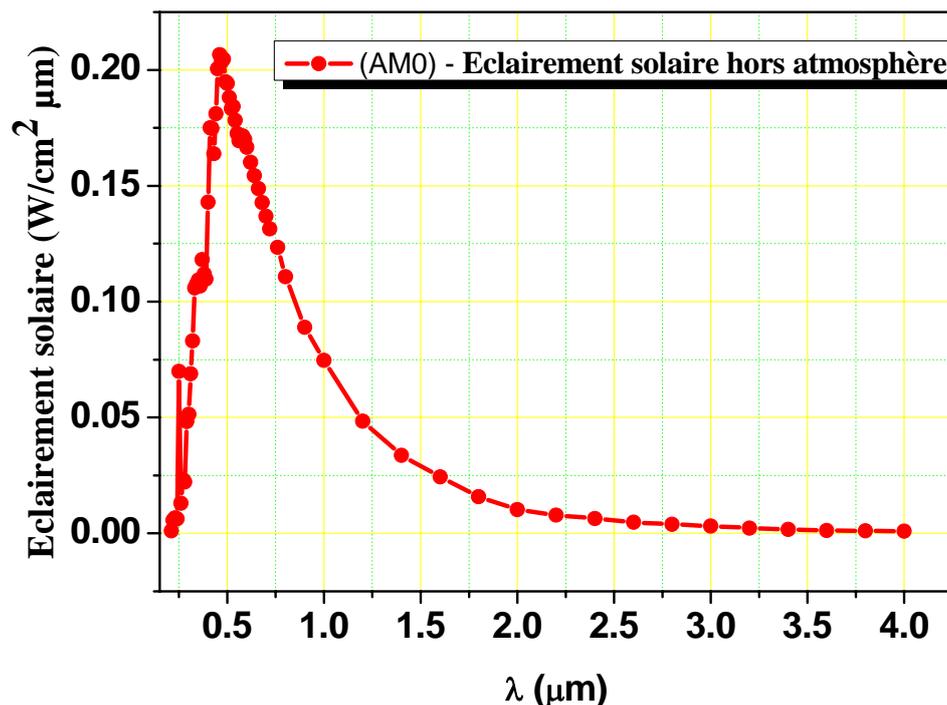


Figure IV-10 : Spectre de l'éclairement solaire hors atmosphère AM_0 .

IV.3 Résultats et discussions :

IV.3.1 Cellule solaire p+-Al_xGa_{1-x}As /p- GaAs /n-GaAs

Nous présentons les résultats de l'étude appliquée à la cellule (p+-Al_xGa_{1-x}As /p- GaAs /n-GaAs) dans les deux cas de non addition et addition de substrat.

La figure IV-11 présente la caractéristique densité de courant – tension ($J-V$) à l’obscurité et sous l’éclairement AM_0 pour la cellule ($p^+-Al_xGa_{1-x}As / p- GaAs / n-GaAs$) avec la fraction molaire de l’aluminium $x = 0.491$ ($p^+ - Al_{0.491}Ga_{0.509}As / p- GaAs / n-GaAs$).

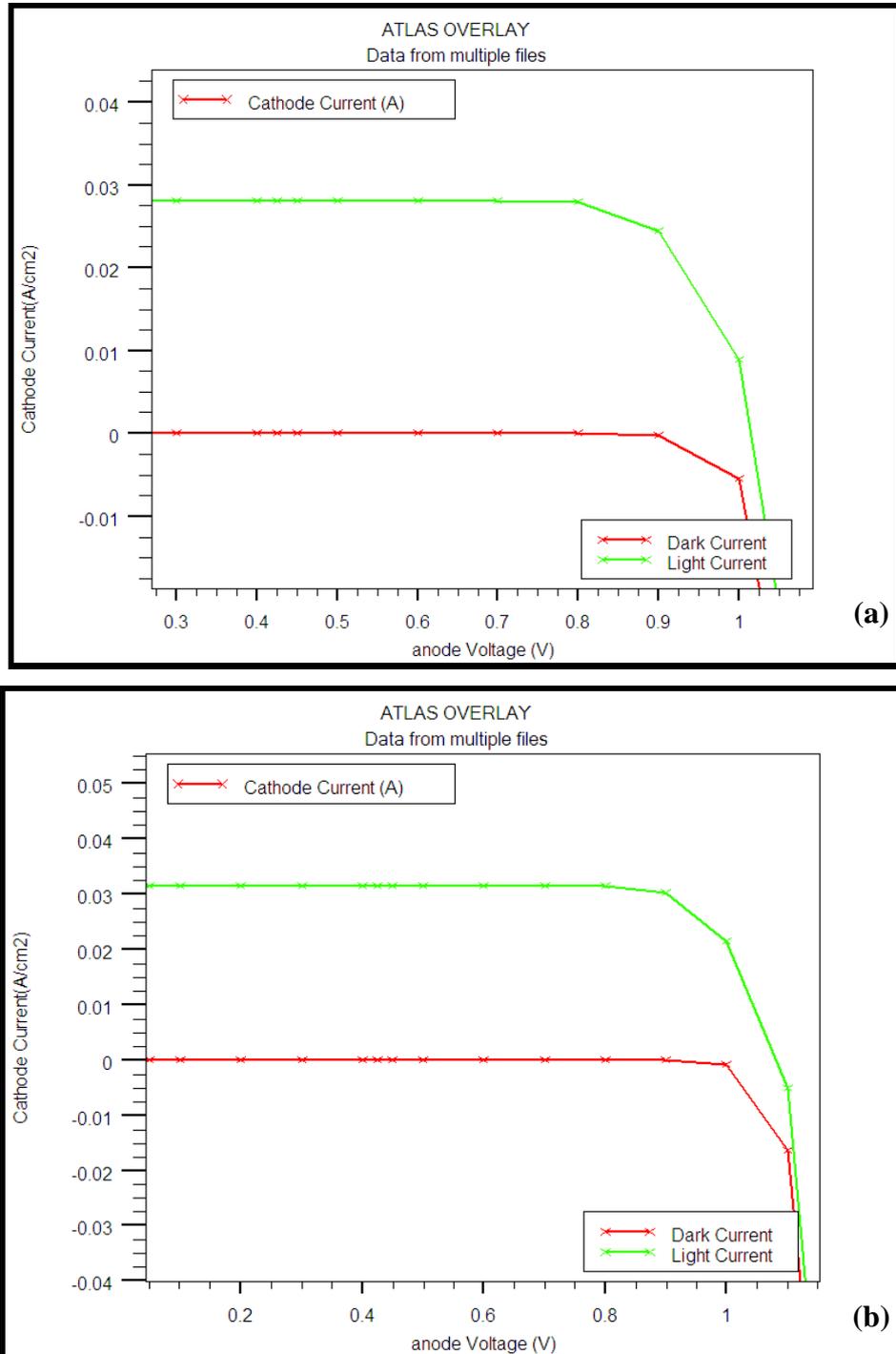


Figure IV-11 : Caractéristique ($J-V$) de la cellule ($p^+ - Al_{0.491}Ga_{0.509}As / p- GaAs / n-GaAs$) à l’obscurité et sous éclaircment AM_0 : (a) sans substrat, (b) avec substrat (GaAs).

Les rendements quantiques externe et interne (external , internal quantum efficiency) sont présentés dans la figure IV-12 toujours pour la cellule ($p^+-Al_xGa_{1-x}As$ / p - GaAs / n -GaAs).

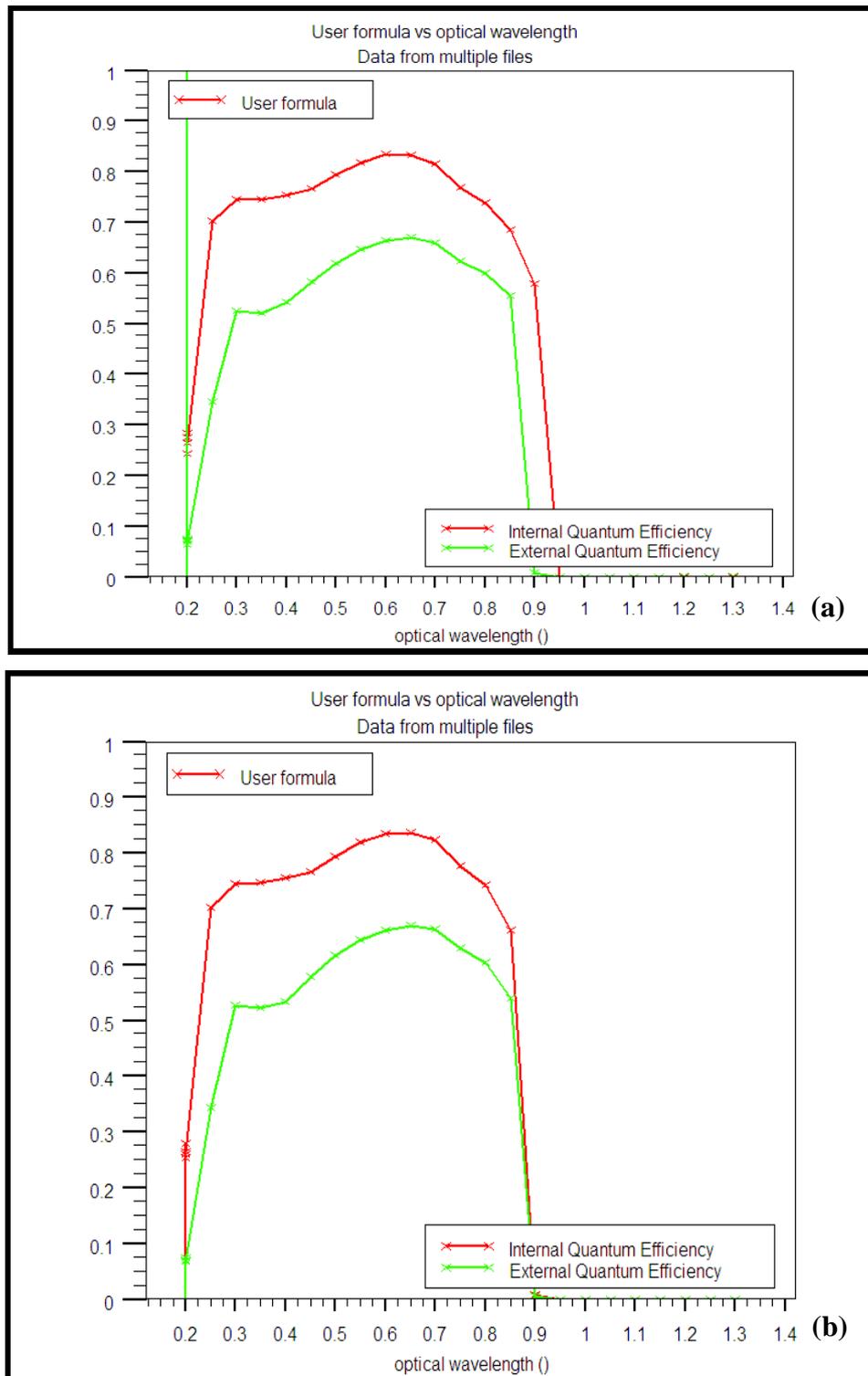


Figure IV-12 : Rendements quantiques externe et interne de la cellule ($p^+- Al_{0.491}Ga_{0.509}As$ / p - GaAs / n -GaAs) sous éclaircment AM₀: (a) sans substrat, (b) avec substrat (GaAs).

Les paramètres photovoltaïques calculés d'après les caractéristiques J - V de la cellule p^+ - $\text{Al}_{0.491}\text{Ga}_{0.509}\text{As}$ / p - GaAs / n -GaAs sont présentés dans le tableau IV-3. Rappelons que la puissance optique fournie par l'éclairment AM_0 est ~ 0.136 (W/cm^2).

	J_{sc} (mA/cm^2)	V_{oc} (V)	FF (%)	P_{max} (W/cm^2)	η (%)
Sans substrat	28.09	1.014	78.20	0.02230	16.40
Avec substrat (GaAs)	31.40	1.080	80.41	0.02729	20.06

Tableau IV-3: Paramètres photovoltaïques de la cellule (p^+ - $\text{Al}_{0.491}\text{Ga}_{0.509}\text{As}$ / p - GaAs / n -GaAs).

Nous remarquons une générale amélioration dans les caractéristiques photovoltaïques de la cellule avec l'ajout de substrat (GaAs), notamment dans la densité de courant de court circuit (J_{sc}), le facteur de forme FF , la puissance maximale P_{max} et le rendement de conversion η .

Les tableaux IV-4 et IV-5 présentent les paramètres photovoltaïques de la cellule (p^+ - $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ / p - GaAs / n -GaAs) calculés à différentes fractions molaires de l'aluminium ($x(\text{Al})$) pour le cas sans et avec substrat respectivement.

$x(\text{Al})$	J_{sc} (mA/cm^2)	V_{oc} (V)	FF (%)	P_{max} (W/cm^2)	η (%)
0.099	28.91	1.013	78.3	0.0229	16.83
0.198	27.77	1.014	78.2	0.0220	16.17
0.315	27.92	1.014	78.2	0.0221	16.25
0.419	28.05	1.014	78.2	0.0222	16.32
0.491	28.09	1.014	78.2	0.0223	16.39
0.590	28.24	1.014	78.2	0.0224	16.47
0.700	26.88	1.014	78.3	0.0213	15.66
0.804	26.71	1.015	78.1	0.0212	15.58

Tableau IV-4 : Paramètres photovoltaïques de la cellule (p^+ - $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ / p - GaAs / n -GaAs) à différentes fractions molaires $x(\text{Al})$ pour le cas sans substrat.

$x(\text{Al})$	$J_{sc} (\text{mA}/\text{cm}^2)$	$V_{oc} (V)$	$FF(\%)$	$P_{\max} (\text{W}/\text{cm}^2)$	$\eta\%$
0.099	32.0018	1.061	81.69	0.02775	20.40
0.198	31.064	1.080	80.54	0.027028	19.87
0.315	31.26	1.080	80.46	0.02718	19.98
0.419	31.36	1.080	80.42	0.02726	20.04
0.491	31.40	1.080	80.41	0.02729	20.06
0.590	31.53	1.080	80.37	0.02739	20.13
0.700	30.18	1.078	80.81	0.02631	19.34
0.804	30.053	1.078	80.48	0.026094	19.18

Tableau IV-5 : Paramètres photovoltaïques de la cellule ($p^+ \text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} / p\text{-GaAs} / n\text{-GaAs}$) à différentes fractions molaires $x(\text{Al})$ pour le cas avec substrat (GaAs).

Même remarque est observée d'après les résultats des tableaux IV-4 et IV-5. Dans l'ensemble de variation de $x(\text{Al})$, la cellule avec substrat (GaAs) présente plus d'améliorations dans ses caractéristiques photovoltaïques (tableau IV-5). Ces derniers résultats sont dans la gamme de ce que a été trouvée par d'autre travaux [56]. Nous remarquons aussi que la variation de la fraction molaire $x(\text{Al})$ révèle, dans l'ensemble, une amélioration des caractéristiques photovoltaïques de la cellule, notamment la densité de courant de court circuit J_{sc} qui augmente de $30.053 \text{ mA}/\text{cm}^2$ à $32 \text{ mA}/\text{cm}^2$ lorsque $x(\text{Al})$ varie de 0.804 à 0.099, le rendement de conversion photovoltaïque η qui s'améliore de 19.18% à 20.40%. Donc on peut s'attendre à ce que la couche fenêtre ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) avec la fraction molaire $x(\text{Al})$ graduelle de 0.099 à 0.804 dans l'espace performe plus les caractéristiques photovoltaïques de la cellule en comparant à celle à fraction molaire $x(\text{Al})$ fixe (0.804) de la couche ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$).

A titre d'exemple nous présentons les résultats obtenus par Morteza Fathipour et al dans ce domaine [56] (voir tableau IV-6 et figures IV-13, IV-14).

$x(\text{Al})$	$J_{sc} (\text{mA}/\text{cm}^2)$	$V_{oc} (V)$	$FF(\%)$	$P_{\max} (\text{W}/\text{cm}^2)$	$\eta (\%)$
$x(\text{Al}) = 0.85$	31.7212	1.00076	84.39	26.7909	19.62
$0 < x(\text{Al}) < 0.85$	33.7314	1.00229	85.39	28.8694	21.14

Tableau IV-6 : Paramètres photovoltaïques de la cellule ($p^+ \text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} / p\text{-GaAs} / n\text{-GaAs}$) pour $x(\text{Al}) = 0.85$ et $0 < x(\text{Al}) < 0.85$ sous éclaircissement AM_0 [56].

Nous indiquons ici que l'auteur Morteza Fathipour s'est basé sur des formules analytiques pour le calcul du coefficient d'absorption ($\alpha(\lambda)$) en fonction de la longueur d'onde. Alors que nous, nous avons injectés des valeurs mesurées des paramètres optiques ($n(\lambda)$, $k(\lambda)$) dans le logiciel Silvaco.

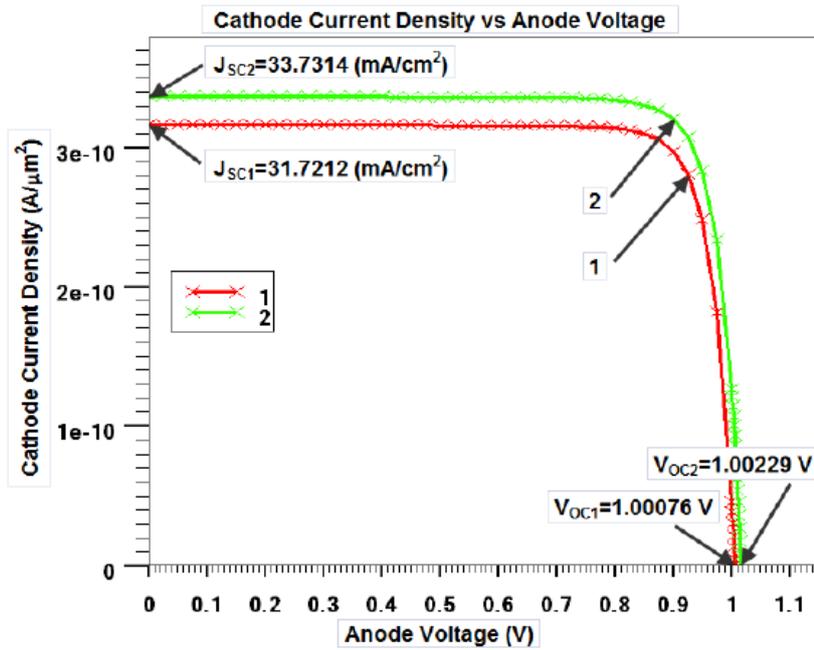


Figure IV-13 : Caractéristique $J-V$ de la cellule solaire ($p^+-Al_xGa_{1-x}As/p-GaAs/n-GaAs$) sous éclaircment AM_0 : (1) $x(Al) = 0.85$, (2) $0 < x(Al) < 0.85$ [56].

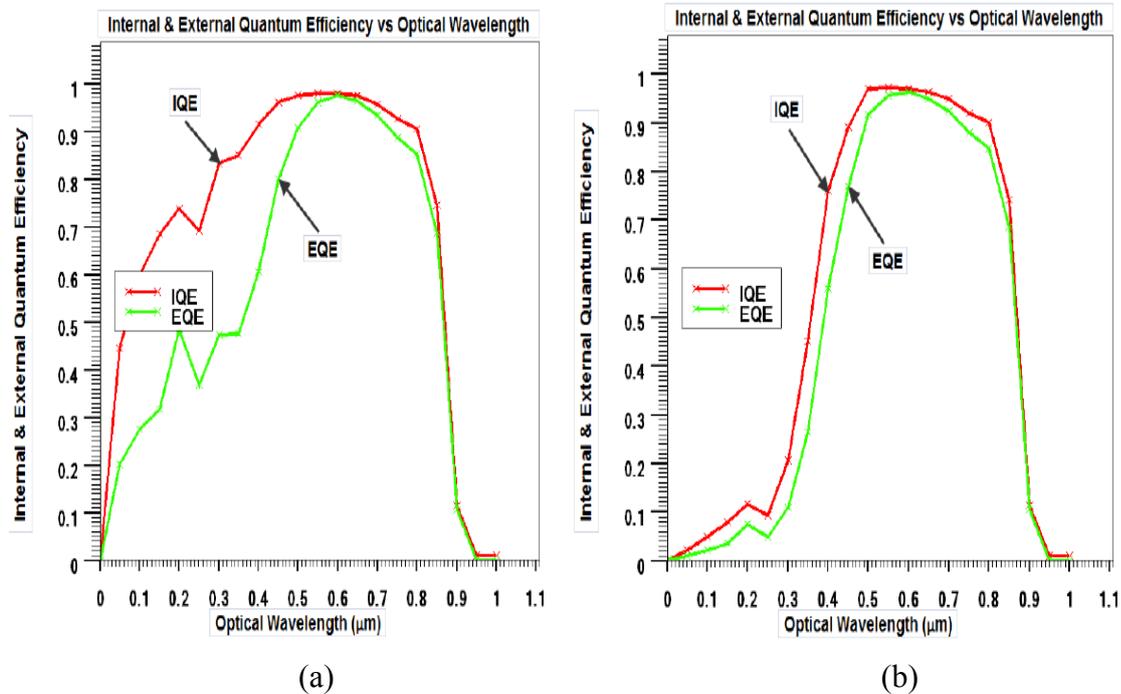


Figure IV-14 : Rendements quantiques externe et interne de la cellule solaire ($p^+-Al_xGa_{1-x}As/p-GaAs/n-GaAs$) sous éclaircment AM_0 : (a) $0 < x(Al) < 0.85$. (b) $x(Al) = 0.85$ [56].

Le spectre du rendement quantique présente un maximum autour de $\lambda \sim 650 \text{ nm}$.

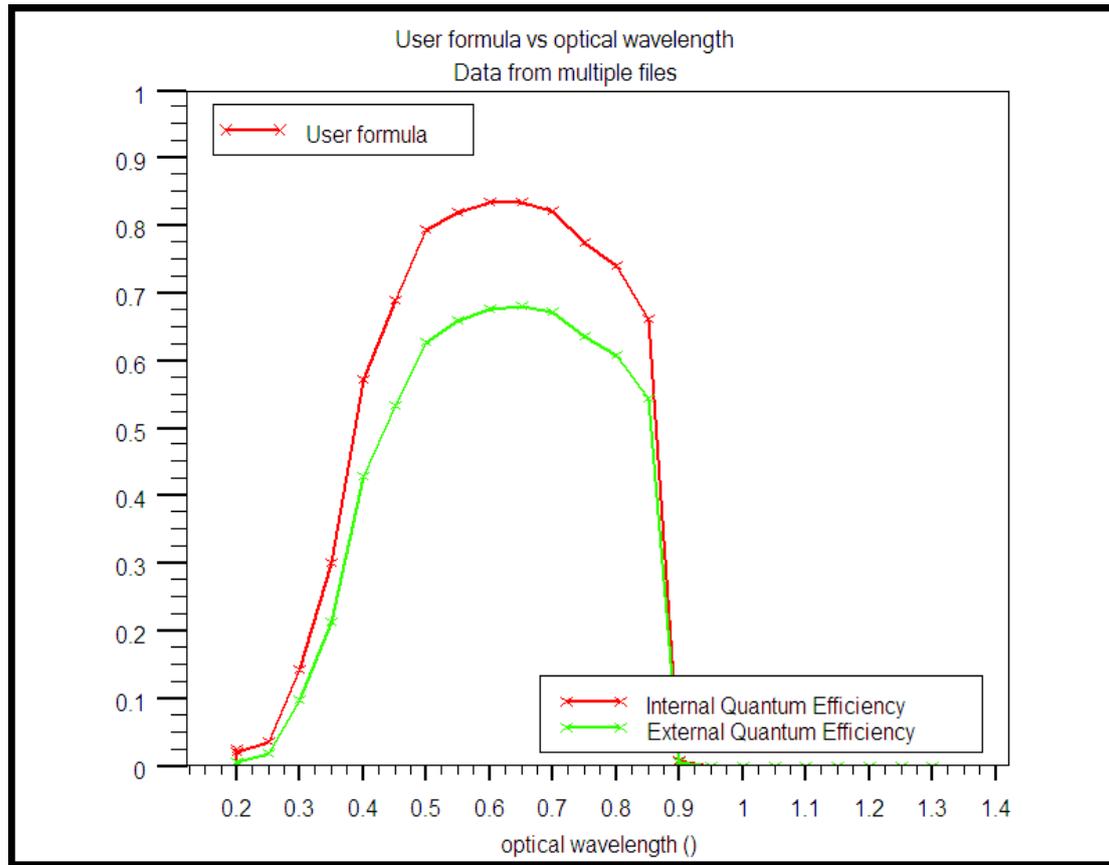


Figure IV-15: Rendements quantiques externe et interne de la cellule ($p^+-Al_{0.804}Ga_{0.196}As / p - GaAs / n-GaAs$) avec substrat.

En utilisant une couche fenêtre ($Al_xGa_{1-x}As$) à fraction molaire graduelle ; $x(Al) = 0.804$ pour ($0 < x < 0.01 \mu m$), $x(Al) = 0.491$ pour ($0.01 \mu m < x < 0.02 \mu m$), $x(Al) = 0.099$ pour ($0.02 < x < 0.03 \mu m$), nous pouvons constater une amélioration des caractéristiques photovoltaïques de la cellule ($p^+-Al_xGa_{1-x}As / p - GaAs / n-GaAs$) comme nous l'avons prévu d'après les résultats du tableau IV-5. Effectivement la figure IV-16 illustre la caractéristique ($J-V$) de la cellule à l'obscurité et sous éclaircissement AM_0 . Le tableau IV-7 présente les paramètres photovoltaïques de la cellule calculés d'après la caractéristique ($J-V$) (figure IV-16). Nous pouvons remarquer d'après ces résultats l'amélioration de la densité de courant de court circuit J_{sc} qui augmente de 30.053 mA/cm^2 à 32.33 mA/cm^2 et le rendement de conversion photovoltaïque η qui augmente de 19.18% à 20.60% (tableau IV-7).

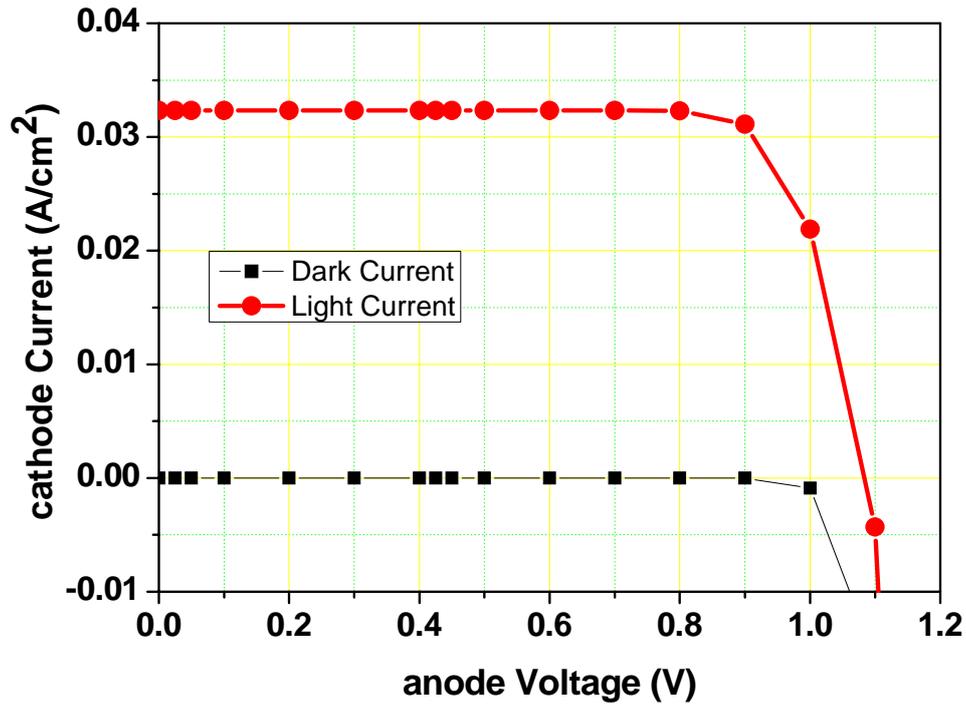


Figure IV-16 : Caractéristique $J-V$ à l’obscurité et sous éclaircment AM_0 de la cellule ($p^+-Al_xGa_{1-x}As / p- GaAs / n-GaAs$) où la couche fenêtre ($Al_xGa_{1-x}As$) est à fraction molaire graduelle ; $x(Al) = 0.804$ pour ($0 < x < 0.01 \mu m$), $x(Al) = 0.491$ pour ($0.01 \mu m < x < 0.02 \mu m$), $x(Al) = 0.099$ pour ($0.02 < x < 0.03 \mu m$).

$x(Al)$	$J_{sc} (mA / cm^2)$	$V_{oc} (V)$	$FF(\%)$	$P_{max} (W / cm^2)$	$\eta\%$
$0.099 \leq x(Al) \leq 0.804$	32.3354	1.0835	79.96	0.02801	20.60
$x(Al) = 0.804$	30.053	1.078	80.48	0.026094	19.18

Tableau IV-7 : Paramètres photovoltaïques de la cellule ($p^+-Al_xGa_{1-x}As / p- GaAs / n-GaAs$) où la couche fenêtre ($Al_xGa_{1-x}As$) est à fraction molaire graduelle ; $x(Al) = 0.804$ pour ($0 < x < 0.01 \mu m$), $x(Al) = 0.491$ pour ($0.01 \mu m < x < 0.02 \mu m$), $x(Al) = 0.099$ pour ($0.02 < x < 0.03 \mu m$) et comparaison avec le cas où $x(Al)$ est fixe (0.804).

IV.3.2 Cellule solaire $n^+-Al_xGa_{1-x}As / n- GaAs / p-GaAs$

La même étude menée sur la cellule ($p^+- Al_xGa_{1-x}As / p- GaAs / n-GaAs$) est effectuée sur la cellule ($n^+- Al_xGa_{1-x}As / n- GaAs / p-GaAs$) sans et avec substrat pour différentes fractions molaires $x(Al)$ de la couche ($Al_xGa_{1-x}As$). Nous conservons les mêmes valeurs des épaisseurs et du dopage dans les différentes couches de la cellule tel que définit dans la cellule ($p^+- Al_xGa_{1-x}As / p- GaAs / n-GaAs$) (voir figure IV-1 et tableau IV-1).

La figure IV-17 présente la caractéristique $J-V$ de la cellule à l’obscurité et sous éclaircment AM_0 pour $x(Al) = 0.491$. Les rendements quantiques externe et interne de la cellule ($n^+- Al_{0.491}Ga_{0.509}As / n- GaAs / p-GaAs$) sont présentés dans la figure IV-18.

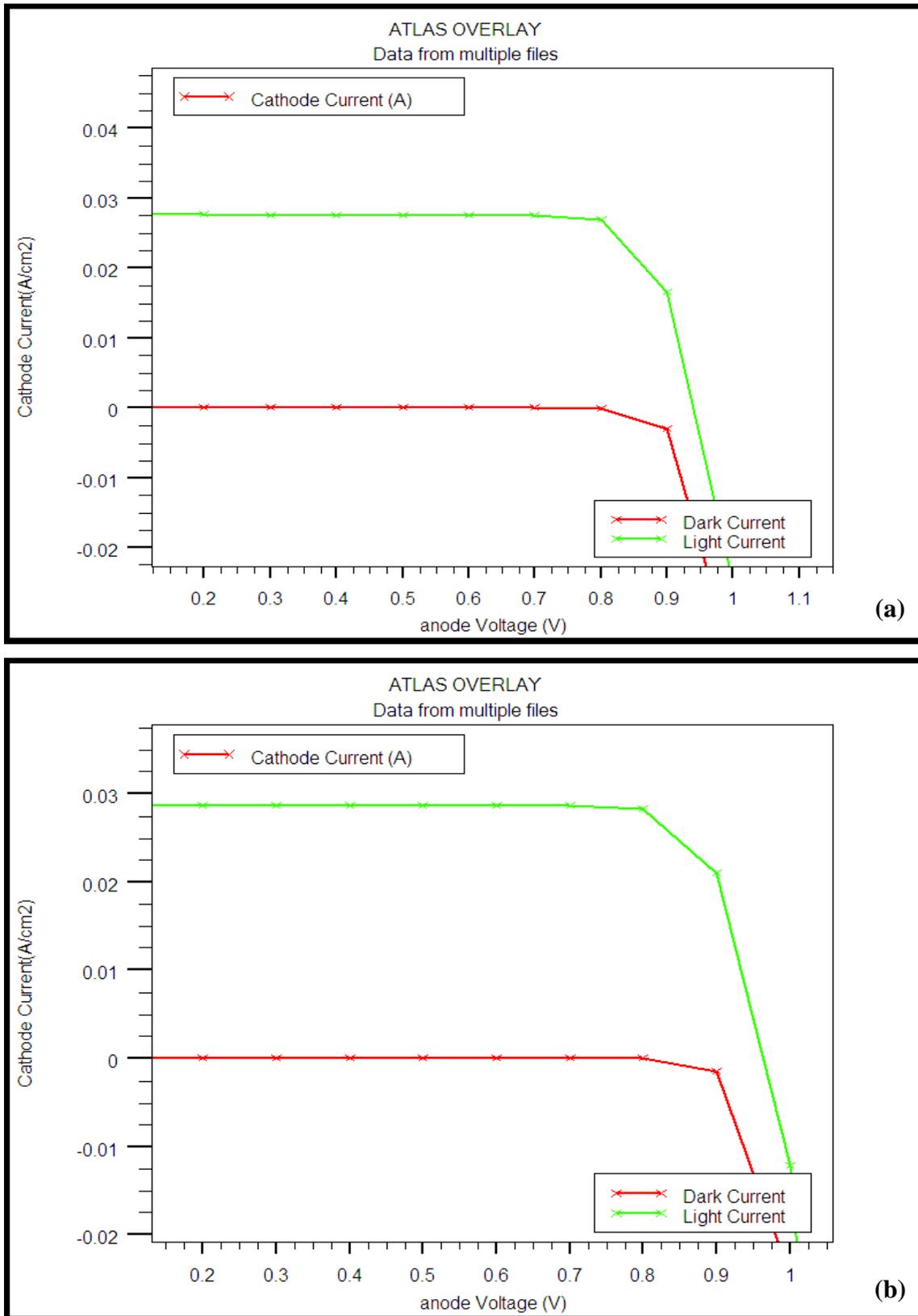


Figure IV-17 : Caractéristique ($J-V$) de la cellule ($n^+ - Al_{0.491}Ga_{0.509}As / n - GaAs / p - GaAs$) à l'obscurité et sous éclairement AM_0 : (a) sans substrat, (b) avec substrat (GaAs).

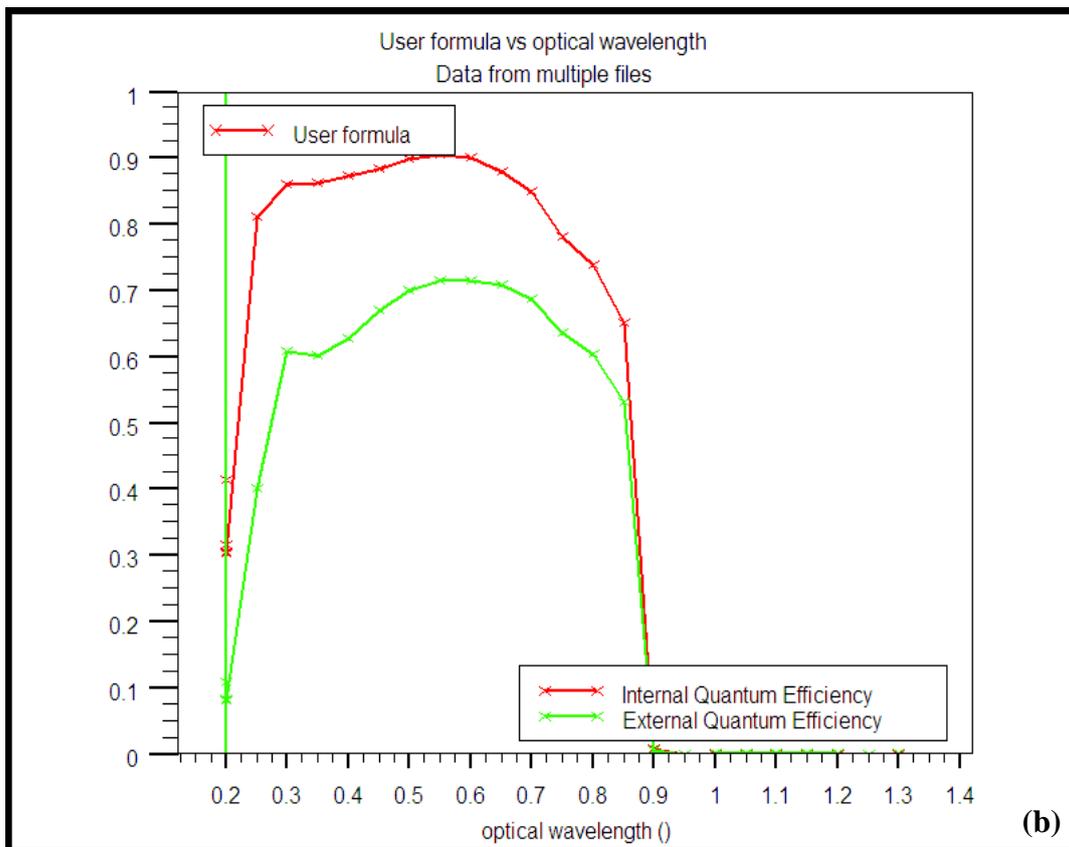
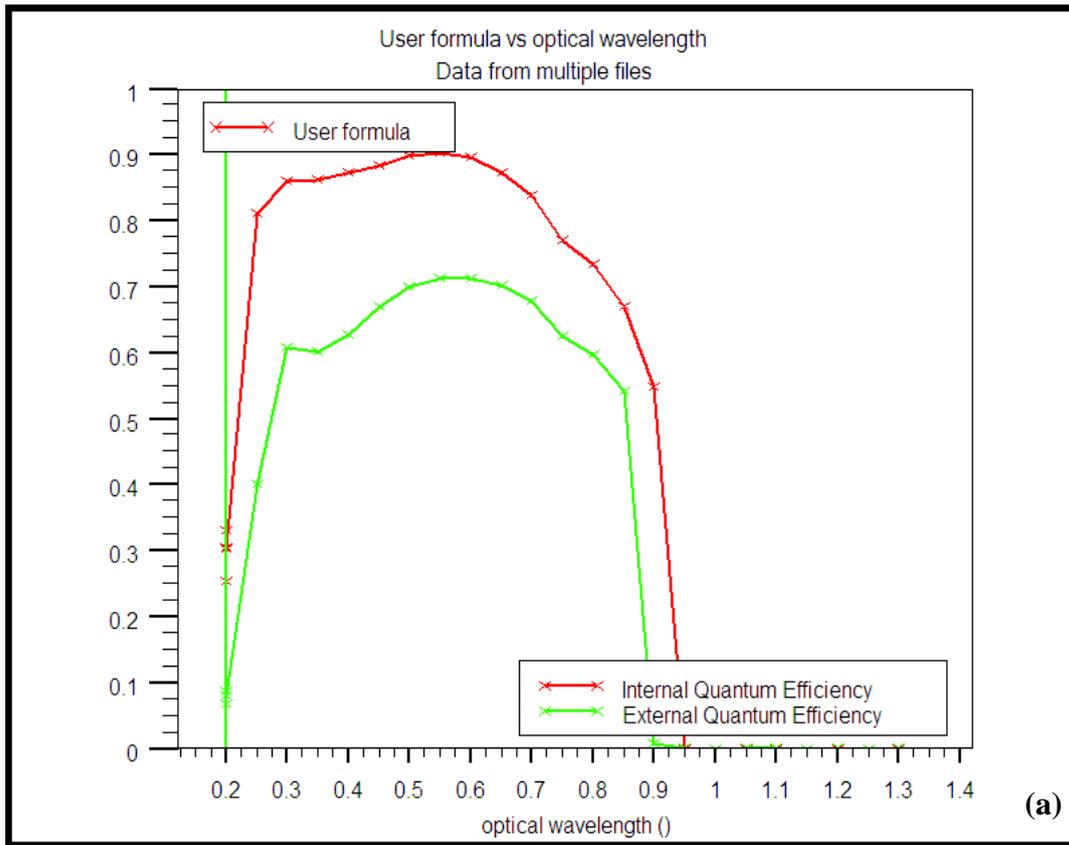


Figure IV-18 : Rendements quantiques externe et interne de la cellule (n^+ - $\text{Al}_{0.491}\text{Ga}_{0.509}\text{As}$ / n - GaAs / p - GaAs) sous éclaircment AM_0 : (a) sans substrat, (b) avec substrat (GaAs).

Les paramètres photovoltaïques calculés d'après les caractéristiques J - V de la cellule (n^+ - $\text{Al}_{0.491}\text{Ga}_{0.509}\text{As}$ / n - GaAs / p -GaAs) sont présentés dans le tableau IV-8.

	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	FF (%)	P_{max} (W / cm ²)	η (%)
Sans substrat	27.66	0.93	82.71	0.02150	15.80
Avec substrat (GaAs)	28.712	0.9631	81.83	0.02263	16.63

Tableau IV-8: Paramètres photovoltaïques de la cellule (n^+ - $\text{Al}_{0.491}\text{Ga}_{0.509}\text{As}$ / n - GaAs / p -GaAs).

Dans les tableaux IV-9 et IV-10 sont présentés les paramètres photovoltaïques de la cellule (n^+ - $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ / n - GaAs / p -GaAs) calculés à différentes fractions molaires de l'aluminium ($x(\text{Al})$) pour le cas sans et avec substrat respectivement.

$x(\text{Al})$	J_{sc} (mA / cm ²)	V_{oc} (V)	FF(%)	P_{max} (W / cm ²)	$\eta\%$
0.099	28.52	0.9229	85.99	0.02264	16.64
0.198	27.36	0.92	86.04	0.0217	15.95
0.315	27.51	0.92	85.77	0.02182	16.04
0.419	27.63	0.93	83.69	0.0217	15.95
0.491	27.66	0.93	82.71	0.02150	15.80

Tableau IV-9 : Paramètres photovoltaïques de la cellule (n^+ - $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ / n - GaAs / p -GaAs) à différentes fractions molaires $x(\text{Al})$ pour le cas sans substrat.

$x(\text{Al})$	J_{sc} (mA / cm ²)	V_{oc} (V)	FF(%)	P_{max} (W / cm ²)	$\eta\%$
0.099	29.42	0.94	88.57	0.02461	18.09
0.198	28.38	0.9429	88.49	0.02368	17.41
0.315	28.55	0.94	88.10	0.02376	17.47
0.419	28.67	0.96	82.46	0.02273	16.71
0.491	28.71	0.96	81.83	0.02263	16.63

Tableau IV-10 : Paramètres photovoltaïques de la cellule (n^+ - $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ / n - GaAs / p -GaAs) à différentes fractions molaires $x(\text{Al})$ pour le cas avec substrat (GaAs).

D'après ces résultats, nous constatons aussi une certaine amélioration des caractéristiques photovoltaïques de la cellule (n^+ -Al_xGa_{1-x}As /n- GaAs /p-GaAs) avec substrat (GaAs) relativement au cas sans substrat. On notifie aussi, d'après le tableau IV-10, une certaine amélioration de la densité de courant de court de circuit J_{sc} qui augmente de 28.71 mA/cm² à 29.42 mA/cm² lorsque $x(\text{Al})$ varie de 0.491 à 0.099 et le rendement de conversion photovoltaïque η qui s'améliore de 16.63% à 18.09%. Donc une cellule (n^+ -Al_xGa_{1-x}As /n- GaAs /p-GaAs) à fraction molaire $x(\text{Al})$ graduelle dans l'espace fournie des caractéristiques photovoltaïques encore plus performées que celles obtenues d'une cellule dont la couche fenêtre (Al_xGa_{1-x}As) est à fraction molaire fixe (par exemple $x(\text{Al}) = 0.491$). Cela est démontré par le calcul des caractéristiques électrique de la cellule (n^+ -Al_xGa_{1-x}As /n- GaAs /p-GaAs) avec la couche fenêtre (Al_xGa_{1-x}As) à fraction molaire graduelle ; $x(\text{Al}) = 0.804$ pour ($0 < x < 0.01 \mu\text{m}$), $x(\text{Al}) = 0.491$ pour ($0.01 \mu\text{m} < x < 0.02 \mu\text{m}$), $x(\text{Al}) = 0.099$ pour ($0.02 < x < 0.03 \mu\text{m}$). La figure IV-19 présente la caractéristique (J - V) de cette cellule à l'obscurité et sous éclairciment AM₀. Le tableau IV-11 présente les paramètres photovoltaïques de cette cellule calculés d'après sa caractéristique (J - V) (figure IV-19).

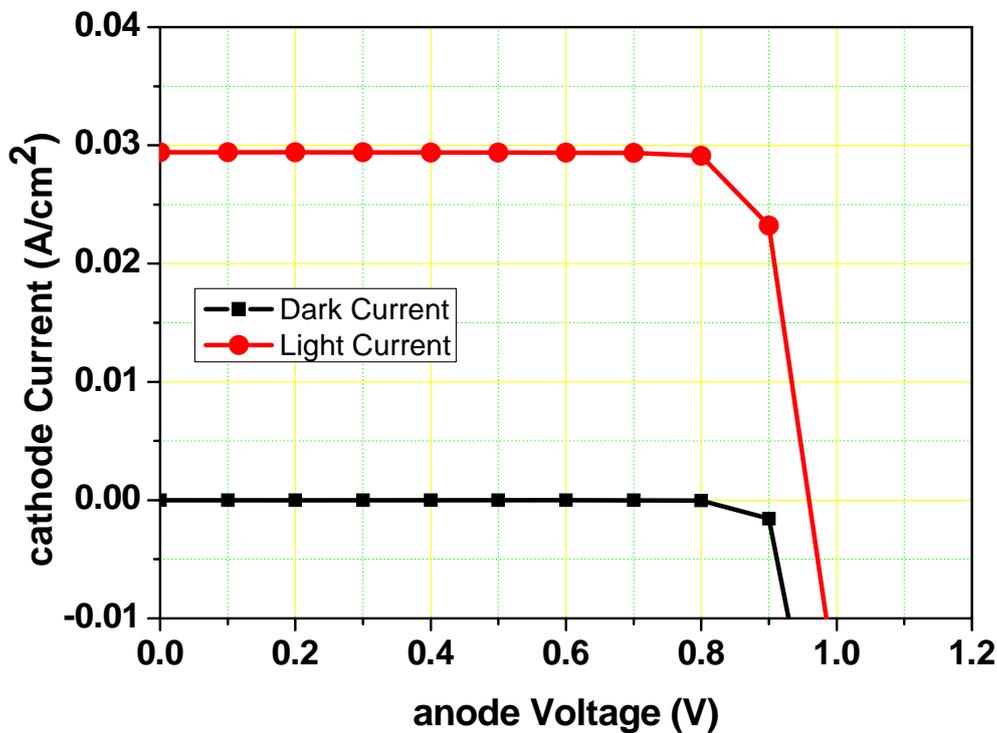


Figure IV-19 : Caractéristique J - V à l'obscurité et sous éclairciment AM₀ de la cellule (n^+ -Al_xGa_{1-x}As /n- GaAs /p-GaAs) où la couche fenêtre (Al_xGa_{1-x}As) est à fraction molaire graduelle ; $x(\text{Al}) = 0.804$ pour ($0 < x < 0.01 \mu\text{m}$), $x(\text{Al}) = 0.491$ pour ($0.01 \mu\text{m} < x < 0.02 \mu\text{m}$), $x(\text{Al}) = 0.099$ pour ($0.02 < x < 0.03 \mu\text{m}$).

$x(\text{Al})$	$J_{sc} (\text{mA} / \text{cm}^2)$	$V_{oc} (\text{V})$	$FF(\%)$	$P_{\max} (\text{W} / \text{cm}^2)$	$\eta\%$
$0.099 \leq x(\text{Al}) \leq 0.804$	29.43	0.9591	82.54	0.02330	17.13
$x(\text{Al}) = 0.491$	28.71	0.96	81.83	0.02263	16.63

Tableau IV-11 : Paramètres photovoltaïques de la cellule ($n^+ \text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} / n\text{-GaAs} / p\text{-GaAs}$) où la couche fenêtre ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) est à fraction molaire graduelle ; $x(\text{Al}) = 0.804$ pour ($0 < x < 0.01 \mu\text{m}$), $x(\text{Al}) = 0.491$ pour ($0.01 \mu\text{m} < x < 0.02 \mu\text{m}$), $x(\text{Al}) = 0.099$ pour ($0.02 < x < 0.03 \mu\text{m}$) et comparaison avec le cas où $x(\text{Al})$ est fixe (0.491).

Nous pouvons remarquer d'après ces résultats l'amélioration de la densité de courant de court circuit J_{sc} qui atteint 29.43 mA/cm^2 et le rendement de conversion photovoltaïque η qui augmente de 16.63% à 17.13% (tableau IV-11). Cette amélioration est due à l'augmentation de l'absorption optique par la succession de couches fenêtres ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) de différentes fractions molaires et ainsi de différents gap énergétique du plus large ($E_g \sim 2.07 \text{ eV}$ pour $x(\text{Al}) = 0.804$) au plus étroit ($E_g \sim 1.54 \text{ eV}$ pour $x(\text{Al}) = 0.099$).

Il reste à indiquer que les caractéristiques photovoltaïques fournies par la cellule ($p^+ \text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} / p\text{-GaAs} / n\text{-GaAs}$) sont encore plus meilleures que celles fournies par la cellule ($n^+ \text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} / n\text{-GaAs} / p\text{-GaAs}$). On explique cela par le fait que la mobilité des électrons (porteurs essentiellement entraînés dans la structure p^+pn à travers la base vers le contact arrière) est supérieure à la mobilité des trous (porteurs essentiellement entraînés dans la structure n^+np à travers la base vers le contact arrière). Ceci entraîne une certaine réduction du photo-courant (J_{pn}) généré par la cellule n^+np (relativement à celui généré dans la cellule p^+pn) et par la suite la réduction de la tension du circuit ouvert V_{oc}

$$(V_{oc} \cong \frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{J_{pn}}{J_s} + 1 \right)).$$

IV.4 Conclusion :

Nous avons étudié les caractéristiques électriques de la cellule solaire à hétérojonction ($\text{AlGaAs} / \text{GaAs}$) de structure p^+pn et n^+np par le logiciel de simulation SILVACO-ATLAS. Nous avons présenté les résultats de la simulation aux conditions de l'obscurité et sous éclairage AM_0 pour la cellule solaire ($p^+ \text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} / p\text{-GaAs} / n\text{-GaAs}$) et ($n^+ \text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} / n\text{-GaAs} / p\text{-GaAs}$) sans et avec substrat (GaAs), tout en faisant varier la fraction molaire $x(\text{Al})$ de l'aluminium de la couche fenêtre ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$). D'après les résultats,

nous avons constaté une générale amélioration dans les caractéristiques photovoltaïques de la cellule avec l'ajout de substrat (GaAs), notamment dans la densité de courant de court circuit (J_{sc}), le facteur de forme FF , la puissance maximale P_{max} et le rendement de conversion photovoltaïque η . Pour la cellule (p^+ - Al_{0.491}Ga_{0.509}As / p- GaAs / n-GaAs) par exemple, la densité de courant de court circuit J_{sc} s'améliore de 28.09 mA/cm² à 31.40 mA/cm² et le rendement de conversion photovoltaïque η s'améliore de 16.40% à 20.06%. Pour la cellule (n^+ - Al_{0.491}Ga_{0.509}As / n- GaAs / p-GaAs), la densité de courant de court circuit J_{sc} s'améliore de 27.66 mA/cm² à 28.712 mA/cm², et le rendement de conversion photovoltaïque η s'améliore de 15.80% à 16.63%.

La variation de la fraction molaire $x(Al)$ de la couche fenêtre (Al_xGa_{1-x}As) révèle dans l'ensemble une amélioration des caractéristiques photovoltaïques de la cellule. Pour la cellule (p^+ -Al_xGa_{1-x}As / p-GaAs / n-GaAs) avec substrat (GaAs), la densité de courant de court circuit J_{sc} augmente de 30.053 mA/cm² à 32 mA/cm² lorsque $x(Al)$ varie de 0.804 à 0.099, le rendement de conversion photovoltaïque η s'améliore de 19.18% à 20.40%. En utilisant une couche fenêtre (Al_xGa_{1-x}As) à fraction molaire graduelle ($0.099 \leq x(Al) \leq 0.804$) dans l'espace, la densité de courant de court circuit J_{sc} augmente à 32.33 mA/cm² et le rendement de conversion photovoltaïque η atteint 20.60%. Pour la cellule (n^+ -Al_xGa_{1-x}As / n-GaAs / p-GaAs) avec substrat (GaAs), la densité de courant de court circuit J_{sc} augmente de 28.71 mA/cm² à 29.42 mA/cm² lorsque $x(Al)$ varie de 0.491 à 0.099 et le rendement de conversion photovoltaïque η s'améliore de 16.63% à 18.09%. En utilisant une couche fenêtre (Al_xGa_{1-x}As) à fraction molaire graduelle ($0.099 \leq x(Al) \leq 0.804$) dans l'espace, la densité de courant de court circuit J_{sc} augmente à 29.43 mA/cm² et le rendement de conversion photovoltaïque η atteint 17.13%. Donc une cellule (p^+ -Al_xGa_{1-x}As / p-GaAs / n-GaAs) ou (n^+ -Al_xGa_{1-x}As / n- GaAs / p-GaAs) dont la couche fenêtre (Al_xGa_{1-x}As) est à fraction molaire $x(Al)$ graduelle dans l'espace fournit des caractéristiques photovoltaïques encore plus performées que celles obtenues d'une cellule avec la couche fenêtre (Al_xGa_{1-x}As) à fraction molaire fixe. Cette amélioration est due à l'augmentation de l'absorption optique par la succession de couches fenêtres (Al_xGa_{1-x}As) de différentes fractions molaires et ainsi de différents gap énergétique du plus large ($E_g \sim 2.07$ eV pour $x(Al) = 0.804$) au plus étroit ($E_g \sim 1.54$ eV pour $x(Al) = 0.099$).

Nous constatons finalement que les caractéristiques photovoltaïques fournies par la cellule ($p^+-Al_xGa_{1-x}As$ /p- GaAs /n-GaAs) sont encore plus meilleures que celles fournies par la cellule ($n^+-Al_xGa_{1-x}As$ /n- GaAs /p-GaAs) du fait que la mobilité des électrons (porteurs essentiellement entraînés dans la structure p^+pn vers le contact arrière) est supérieure à la mobilité des trous (porteurs essentiellement entraînés dans la structure n^+np vers le contact arrière). Ceci entraîne une certaine réduction du photo-courant (I_{ph}) généré par la cellule n^+np (relativement à celui généré dans la cellule p^+pn) et par la suite la réduction de la tension du circuit ouvert V_{oc} .