

I-Introduction

Les pertes optiques affectent drastiquement la puissance délivrée par la cellule photovoltaïque en diminuant le courant de court-circuit. Comme nous l'avons introduit dans le Chapitre I, l'utilisation d'une couche antireflet (CAR), combinée à la texturisation du substrat de silicium, permet de réduire considérablement ces pertes. Plusieurs matériaux sont utilisés comme CAR notamment le nitrure de silicium SiN pour son indice de réfraction qui peut être ajusté en faisant varier les conditions de dépôt ($1.91 < n(600 \text{ nm}) < 2.98$) [1].

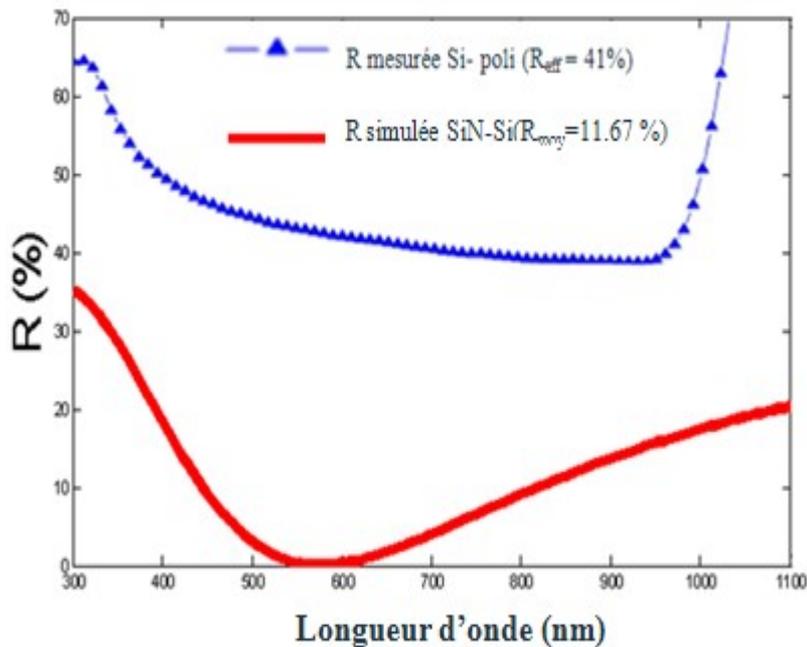
Pour augmenter le nombre de photons transmis à la cellule photovoltaïque, il faut choisir un indice de réfraction et une épaisseur adéquats, de manière à exploiter les phénomènes d'interférences destructives et obtenir l'annulation de la réflexion à la longueur d'onde considérée. Cependant, il faut tenir compte de l'absorption de la CAR, car le coefficient d'extinction k augmente avec son indice de réfraction n (figure III.1). Nous allons illustrer cela en étudiant les deux conditions d'application de la CAR, à savoir le cas où la cellule est directement en contact avec l'air et celui où elle est encapsulée sous une plaque de verre.

II-Minimisation de la réflexion en utilisant une CAR pour applications photovoltaïques

Les calculs ont été effectués sous Matlab en considérant les deux possibilités d'application, à savoir pour une cellule non encapsulée ($n_0 = 1$) et encapsulée ($n_0 = 1.5$).

Nous allons d'abord considérer le cas où le milieu extérieur est l'air (cellule non encapsulée – $n_0 = 1$). Comme nous l'avons vu, l'indice de réfraction optimum est alors d'environ $n_{\text{CAR}} = 2$ et l'épaisseur optimum $d_{\text{car}} = 72 \text{ nm}$ (équation III-20). Pour de telles couches, nous pouvons négliger l'absorption. Le choix de l'épaisseur d_{CAR} va déterminer la longueur d'onde à laquelle l'annulation de la réflexion aura

lieu (équation I-19). Il convient de préciser que les indices de réfraction du silicium et de la CAR varient avec la longueur d'onde et qu'il faut en tenir compte, dans notre cas, en a prit des indices et épaisseurs des CAR pour les quelles les meilleurs résultats optique et électrique sont obtenu sans prendre en compte pour quelle longueur d'onde.



La Figure IV.1 permet d'observer l'impact de la CAR sur la réflectivité du silicium. La couche de la CAR (SiN) considérée est d'épaisseur 73 nm et d'indice de réfraction $n = 2.03$ à 600 nm. Ainsi, la réflectivité moyenne (équation III-21) diminue considérablement de $R_{\text{moy}} = 39\%$ dans le cas du silicium nu à $R_{\text{moy}} = 11.67\%$ avec l'ajout d'une CAR.

Figure IV.1: Comparaison de la réflectivité mesurée par LELIEVRE pour Si-poli et qu'on a simulée pour un Si recouvert de SiN ($n [600 \text{ nm}] = 2.03$; $e = 73 \text{ nm}$).

Pour étudier l'impact de la CAR et de son épaisseur sur les performances d'une cellule photovoltaïque conventionnelle, et notamment le courant de court-circuit, nous avons fait appel au logiciel PC1D. Pour toutes les simulations PC1D de cette partie de chapitre, les paramètres utilisés sont les suivants :

- **silicium**

- épaisseur 200 μm

- base de type p ($1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) ; longueur de diffusion $L_D = 140 \mu\text{m}$

- émetteur n+ ($1.10^{20} \text{ cm}^{-3}$; $x_j = 0.3 \mu\text{m}$; erfc)

- vitesse de recombinaison en surface avant $S_f = 1000 \text{ cm.s}^{-1}$

- vitesse de recombinaison en surface arrière $S_b = 100000 \text{ cm.s}^{-1}$

- **Illumination** : AM1.5G (0.1 W.cm⁻²)

Tableau IV-1 : Résultats de simulation de réflectivité et de courant de court-circuit (PC1D) en fonction des différentes épaisseurs de SiN. Les valeurs correspondantes au rendement quantique interne (IQE avec $R = 0$) et d'une cellule sans CAR (Si-nu) sont également indiquées.

	n (600)	$d_{\text{car}} (\mu\text{m})$	$R_{\text{moy}}(\%)$	$J_{\text{CC}}(\text{mA.cm}^2)$	$\eta (\%)$
SiN	2.03	60	12.95	32.98	16.74
		65	12.19	33.55	17.02
		67	12.00	33.71	17.10
		70	11.80	33.90	17.19
		71	11.75	33.95	17.21
		73	11.67	34.01	17.24
		80	11.70	34.00	17.24
		85	11.81	33.81	17.14
IQE			0	36.74	18.77
Si-nu			39	23.61	11.72

Le maximum du rayonnement solaire se situe pour une longueur d'onde d'environ 600 nm et il apparaît logique d'obtenir le minimum de réflectivité moyenne autour de celle-ci ($R_{\text{moy}} = 11.67\%$). Cependant, les résultats de simulation de la puissance maximum montrent que les meilleures performances sont obtenues pour des épaisseurs de CAR légèrement plus importantes.

Pour voir l'impact de l'épaisseur de la CAR sur les performances d'une cellule photovoltaïque conventionnelle. On fait varier l'épaisseur de la CAR (d_{car}) d'indice $n_{\text{car}}=2.03$, nous pouvons avoir plusieurs valeurs de réflectivité pour la même longueur d'onde figure IV.2.

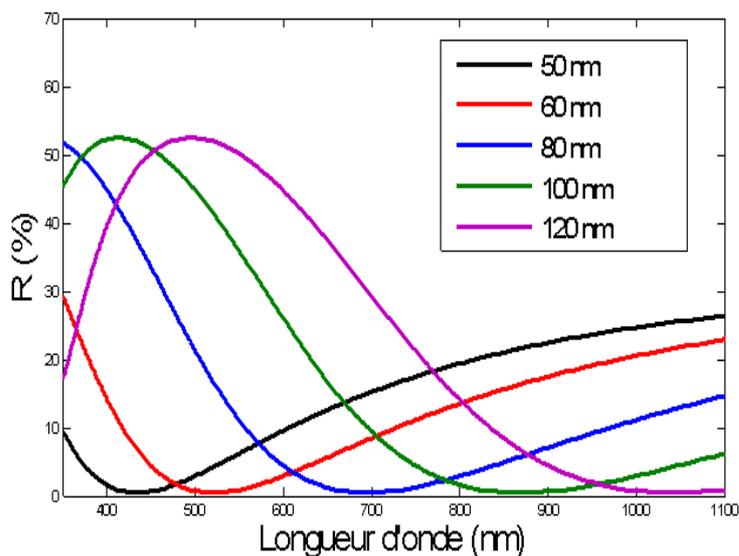
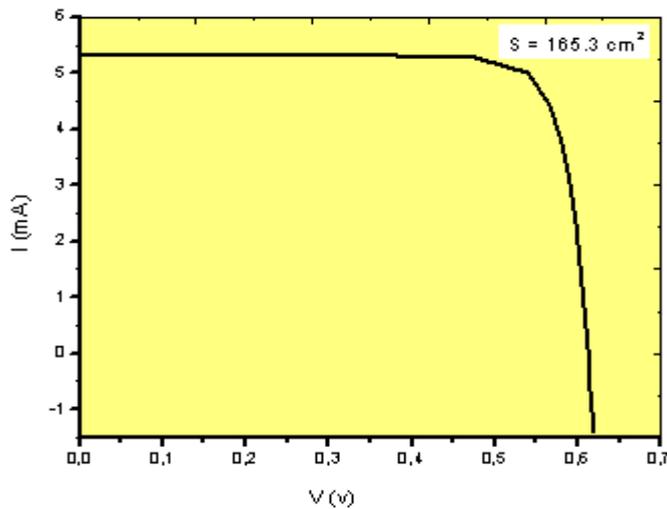


Figure IV.2: La réflexion de la CAR en fonction de l'épaisseur d_{car}

Tableau IV-2, montre l'influence de l'indice optique de la CAR sur les performances d'une cellule photovoltaïque standard avec une épaisseur standard $n_{\text{car}}=73$ nm et cela progressivement, on commencera par des couches où le silicium (Si) est dominant par rapport à l'Azote (N) jusqu'à les couches les plus riches en Azote.

	d_{car} (nm)	n_{car}	R_{moy} (%)	J_{cc} (ma.cm ²)	η (%)
		1.50	18.30	30.31	15.18
		1.55	17.03	30.93	15.63

SiN	73	2.00	11.68	33.99	17.22
		2.05	11.69	34.02	17.24
		2.10	11.79	33.99	17.22
		2.20	12.25	33.78	17.12
		2.30	12.98	33.37	16.94
		2.40	13.97	32.82	16.67
		2.50	15.08	32.16	16.33



d'une cellule solaire qui est la
 té et du courant photogénéré avec
 ique $n=2.03$. L'éclairement de la
 (V) de la diode vers les courants
 omme un générateur, la convention

Figure IV.3: Caractéristiques courant-tension de la cellule photovoltaïque sous éclairage.

III— Absorption au sein de la CAR et optimisation de la transmission

Si nous considérons à présent le cas industriel où les cellules photovoltaïques sont encapsulées, celles-ci sont recouvertes d'un encapsulant (EVA – Ethylène

Vinyle Acétate) et d'une plaque de verre. Le rayonnement incident doit donc traverser plusieurs interfaces supplémentaires pour atteindre la cellule : air/verre-EVA/CAR/Si. Tout d'abord, nous pouvons estimer, sans grandes incidences sur les résultats, que les couches verre-EVA forment un seul milieu d'indice proche de 1.5. Ensuite, nous le considérons comme milieu extérieur.

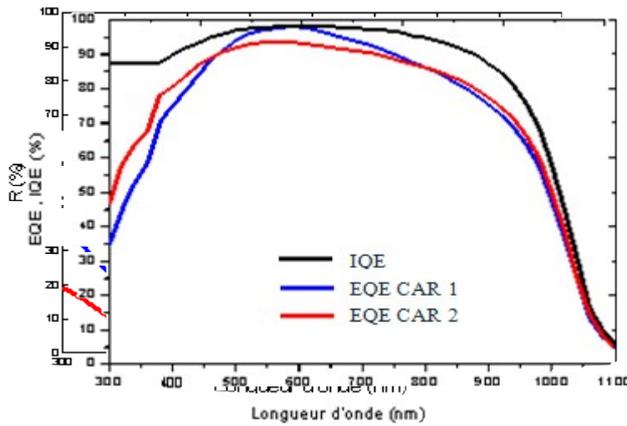
La réflexion sur le verre pourra être prise en compte dans le calcul de la réflectivité moyenne en considérant le cas extrême d'un substrat massif de verre ($R \approx 3.5\%$ sur la gamme spectrale considérée). Néanmoins, les plaques de verre des panneaux solaires sont souvent texturisées et certaines possèdent même une couche antireflet.

Dans ces conditions, les équations (III-19) et (III-20) donnent les indices et épaisseurs optimaux suivants : $n_{CAR} = 2.30$ et $d_{CAR} = 60$ nm. Cependant, l'amélioration de la réflectivité apportée par un indice n_{CAR} élevé peut être atténuée par l'augmentation de l'absorption au sein de la couche antireflet des photons de grandes énergies du rayonnement incident.

Le tableau IV-3.a montre les résultats trouvés de R , J_{cc} et η des deux CAR non-encapsulée et encapsulée avec leurs indices et épaisseurs optimaux pour $\lambda = 600$ nm.

CAR	$n_{optimal}$	$d_{optimal}$ (nm)	R (%)	J_{cc} (w.m ²)	η (%)	
CAR 1	Non-encapsulée	2	72	11.72	33.96	17.21
CAR 2	encapsulée	2.3	60	9.77	33.61	17.09

Dans le calcul de la réflectivité de la cellule avec une CAR encapsulée (CAR 2), nous avons introduit les équations d'absorption dans le modèle ($R+A = 1-T$). Ces résultats confirment que si la couche de SiN d'indice de réfraction $n = 2.3$ permet d'obtenir la plus faible réflectivité moyenne, les meilleurs résultats électrique trouver sont pour une cellule avec une CAR non-encapsulée (CAR 1) figure IV.4.



(a)
(b)
Figure IV.4 : (a) réflectivité des CAR 1 et CAR 2, (b) le rendement quantique externe en fonction de la longueur d'onde.

Comme cité dans le chapitre III, l'optimum de la réflectivité n'est pas tout à fait à 600 nm à cause du caractère fini de la cellule et surtout à cause des variations d'indice du silicium et du SiN en fonction de la longueur d'onde qui a une influence sur la réflectivité moyenne définie par l'équation III.21.

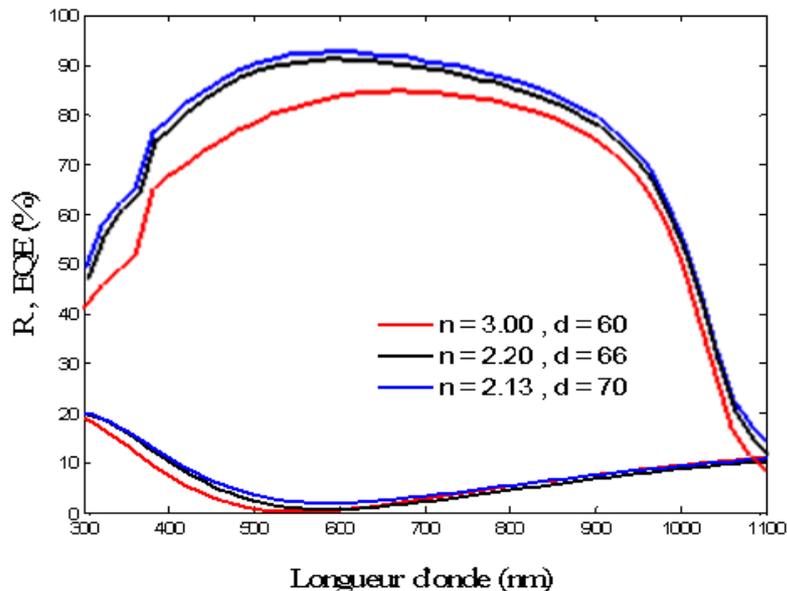
Pour cela, on a cherché les meilleures combinaisons d'indices optiques et d'épaisseurs pour différentes longueurs d'ondes, qu'on a ensuite introduit dans le PC1D pour faire des simulations de courant de court circuit.

Tableau IV-4 : Résultats de simulation de réflectivité et de courant de court circuit (PC1D) pour les différentes couches de SiN dans le cas d'une cellule encapsulée. La réflectivité moyenne maximale (prenant en compte la réflexion sur la plaque de verre) est indiquée pour information.

d_{car}	n_{car}	R_{moy} (%)	J_{cc} (mA.cm ²)	$R_{moy} + R_{verre}$ (%)
75	1.90	10.0	32.34	13.5
73	2.03	8.1	33.26	11.6
70	2.13	7.5	33.81	11.0
69	2.16	6.8	33.75	10.3
66	2.20	6.7	33.70	10.2
60	2.30	6.3	33.61	09.8

Même si le minimum de réflectivité a été trouvé pour la couche d'indice et d'épaisseur optimum ($n=2.3$, $d=60$), le meilleur compromis entre la minimisation de la réflectivité et celle de l'absorption au sein de la CAR est obtenu pour une couche de SiN d'indice $n = 2.13$ et d'épaisseur $d_{car} = 70$ nm. Il est ainsi plus judicieux de ne pas considérer la réflexion mais plutôt les photons transmis et qui contribuent à la création des paires électron-trou (équation III-8). Cela est illustré par

la Figure IV-5 pour différentes indices optique de la CAR (SiN), avec des épaisseurs adéquates pour obtenir un minimum de réflectivité. L'importante absorption de la couche la plus riche en silicium (d'indice optique grand) diminue fortement la transmission de photons de grandes énergies, ce qui engendre la diminution de rendement quantique externe.



Par ailleurs, afin de montrer la contribution de chaque région constituant la cellule solaire et essentiellement celle située en surface, il est intéressant de simuler les réflectivités et le EQE pour chaque indice de réfraction.

Figure IV.5 : EQE et réflectivité simulée pour différentes couches de SiN dans le cas de structures encapsulées.

Ces résultats montrent de plus que l'absorption au sein de la couche antireflet doit également être prise en compte. L'équation (III-10) doit donc être modifiée en remplaçant $(1-R)$ par le coefficient de transmission $T = 1-R-A$.

IV—Cas des doubles couches antireflets (DCAR)

Comme nous avons pu prouver, une seule couche antireflet réussi à faire diminuer la réflectivité et augmenter le rendement de la cellule. Néanmoins une

réflectivité nulle ne peut avoir lieu que pour une seule longueur d'onde et elle dépend de la longueur d'onde. Le développement d'une double couche antireflet (DCAR) permettrait d'obtenir des conditions de réflectivité nulle pour plusieurs longueurs d'onde entraînant une réflectivité moyenne plus faible.

Programme utilisé

Dans ce travail, on a développé un programme de simulation sous Matlab pour chercher à minimiser la réflectivité des cellules en silicium multicristallin grâce à des multicouches antireflet.

Organigramme

Ce schéma représente les différentes étapes de notre modèle de simulation qu'on a effectué sous Matlab.

∇= Résultats de simulation de la réflectivité des DCAR

Les meilleurs résultats de cette simulation de la réflectivité obtenus sont pour des cellules à doubles couches antireflets (DCAR) non encapsulée qui sont rappelés dans le Tableau IV.5. Dans ce dernier, nous avons fait varier les indices optiques et les épaisseurs en même temps pour trouver les meilleurs résultats de la transmission et de la réflectivité des couches antireflet.

n_1	d_1 (nm)	n_2	d_2 (nm)	R_{Moy} (%)	J_{cc} (mA.cm ²)	V_{oc} (mV)	η (%)	
CAR	2.03	73	-	11.67	34.00		17.24	
DCAR 1	1.50	80	2.50 (60)	4.14	33.90	612	17.19	
DCAR 2			2.40 (68)	5.25	33.97		17.22	
DCAR 3			2.05 (50)	6.63	34.36		17.40	
DACR 4			55	2.10 (53)	7.45		34.68	17.55
DCAR 5			50	2.15 (50)	7.49		34.54	17.48
DCAR 6			45	2.20 (60)	7.51		34.36	17.40

Tableau VI.5 : Résultats de simulation de réflectivité (Matlab) et de courant de court-circuit (PC1D) pour différentes doubles couches antireflet dans le cas d'une cellule non-encapsulée.

Dans ce travail, nous avons réussi à construire un programme de simulation sur Matlab, qui nous a permis de trouver les meilleures combinaisons des DCAR pour minimiser la réflexion. Pour cela, nous avons fixé l'indice optique de la première couche n_1 et on fait varier n_2 ainsi que les épaisseurs des couches en même temps et calculer la réflexion moyen (R_{Moy}) des DCAR.

Bien que l'objectif principal des résultats développés dans ce travail vise essentiellement à l'amélioration de la réflexion de la face avant, nous avons vérifié si l'application des empilements de diélectrique entraînait également une amélioration de courant de court-circuit ainsi que le rendement de la cellule. Pour cela, nous avons introduit les résultats des DCAR dans PC1D pour calculer les courant de court-circuit des ces dernières.

Les meilleurs résultats de réflectivité obtenus sont pour les couches DCAR 1 et DCAR 2 où nous avons réussi à avoir un gain très intéressant de 65 % pour la couche d'indice DCAR 1 et de 44 % pour la couche d'indice DCAR 2 par rapport à une simple CAR, mais une diminution du courant de court-circuit de 2 % pour la première et jusqu'à 9,2 % pour la seconde. Cela est due à plusieurs paramètres qui sont cités ci-dessous.

Par contre, l'amélioration de courant de court-circuit est obtenue pour des réflectivités peu plus grandes puisque nous avons pu limiter les calculs à des couches de SiN peu absorbantes (DCAR 4, DCAR 5 – Tableau IV-5). Nous avons ainsi obtenu une amélioration du courant de court-circuit pouvant aller jusqu'à 0.68 mA.cm^{-2} pour une DCAR composée d'un SiON ($n [600 \text{ nm}] = 1.5$ et $d=55 \text{ nm}$) et d'un SiN ($n [600 \text{ nm}] = 2.1$ et $d=53 \text{ nm}$).

Afin de valider ces résultats, il convenait tout d'abord de réaliser une double couche et de comparer la mesure de la réflectivité avec les simulations. Cela n'a malheureusement pas été possible pour manque de moyen. Pour cela nous avons validé nos résultats en les comparants à ceux obtenus par LELIEVRE lors de la réalisation de sa thèse de Doctorat présentée à L'Institut des Nanomatériaux de Lyon.

La figure IV-6 représente une comparaison des réflectivités moyennes simulées et celle mesurées par LELIEVRE au CEA d'une DCAR composée d'un

SiON d'indice de réfraction équivalent à celui du SiO₂ (n [605 nm] = 1.49 et d=92 nm) et d'un SiN d'indice relativement faible (n [605 nm] = 2.08 et d=67 nm).

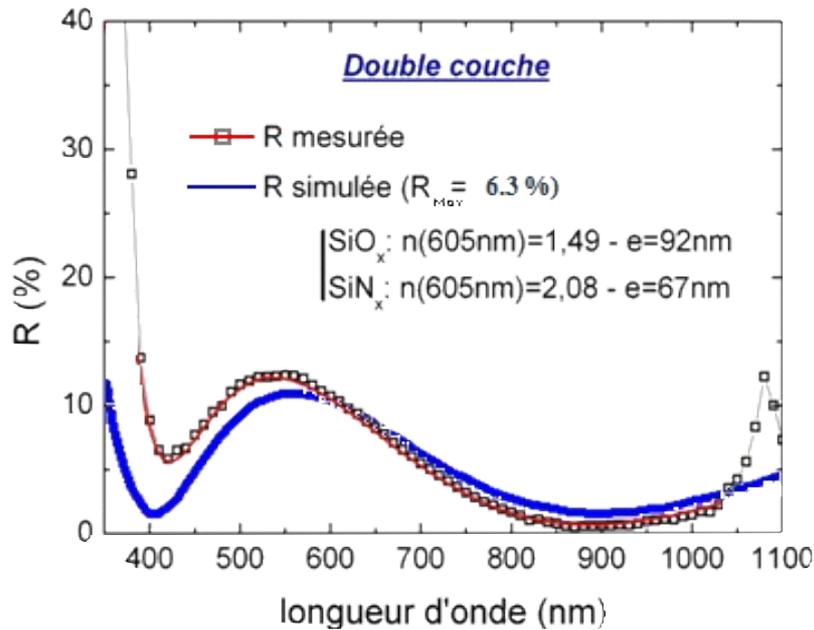


Figure IV-6 : Comparaison des réflectivités simulées à Tlemcen et celle mesurée par J.F.Lelievre d'une DCAR au CEA.

Parmi toutes les solutions présentées dans le (Tableau IV .5), nous constatons que pour minimiser davantage les pertes optiques, DCAR 1 et DCAR 2 conduisent à une courbe de réflectivité en « W ou U» (Figure IV-7) et une amélioration de gain de réflectivité par rapport à une simple CAR 65% et 44%, respectivement . Néanmoins, cette amélioration en réflectivité n'engendre pas une amélioration de rendement total de la cellule, cela est causé par la réflexion des photons de faible longueurs d'onde (UV) par la surface de silicium et à ceux de

grande longueurs d'onde qui traversent la cellule sans être absorbés par le silicium en volume. Donc, ils ne participent pas à la création de paire électron-trou.

Cette diminution de courant de court-circuit peut être aussi attribuée à la forte absorption au sein de la DCAR mise en jeu et qui ne permet pas d'améliorer significativement le courant de court circuit.

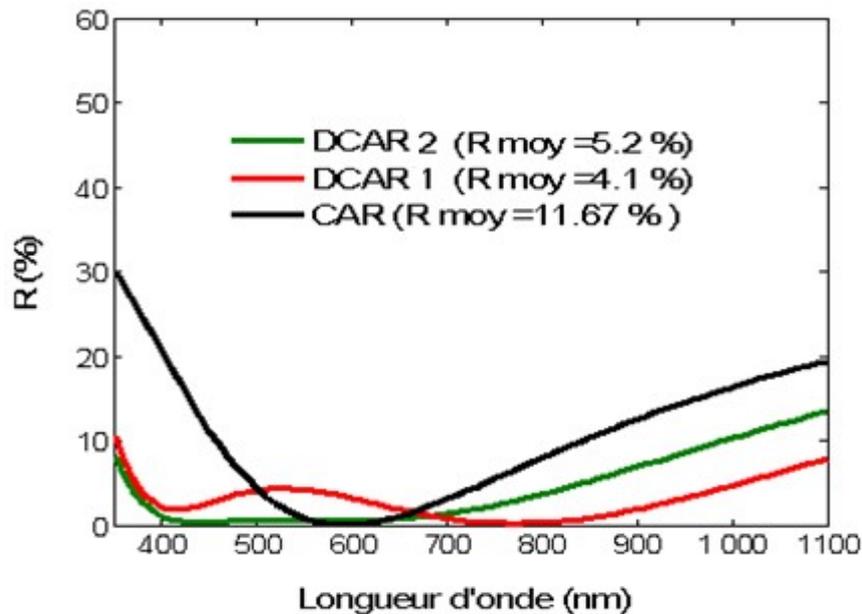
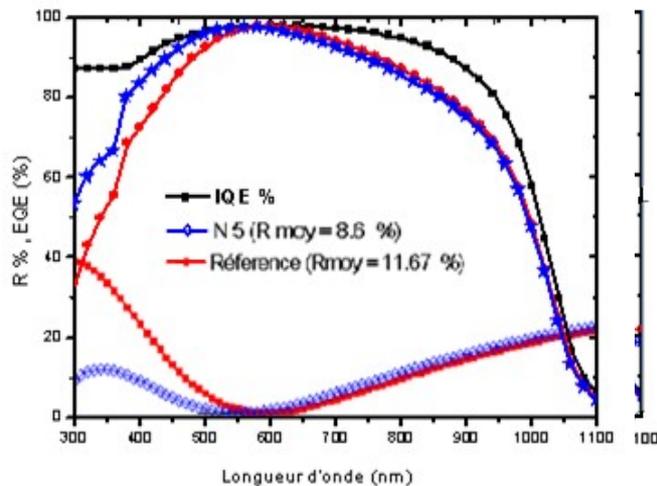


Figure IV.7 : Réflectivités simulées des doubles couches antireflets (DCAR) DCAR 1 et DCAR 2

VI—L'influence de la DCAR sur le rendement de la cellule

Les épaisseurs nécessaires pour réaliser les DCAR 1 et DCAR 2 sont relativement importantes, ce qui peut poser problème lors de la réalisation des contacts à travers celle-ci. Il est donc intéressant de pouvoir minimiser également l'épaisseur totale de la DCAR. Les solutions DCAR 4 et DCAR 5 vont dans ce sens. Celles-ci conduisent à des réflectivités (en « U ») et des courants de court-circuit très similaires. L'amélioration de ce dernier paramètre est principalement due à une meilleure transmission des photons de fortes énergies (Figure IV-8). Le

rendement quantique externe montre qu'une partie de ceux-ci sont tout de même absorbés au sein de la DCAR.



a

b

Figure IV.8 : Réflectivité et rendement quantique externe simulés respectivement par Matlab et par PC1D pour les doubles couches antireflets (a) N4 et (b) N5.

La DCAR 4 semble donc un bon compromis entre la minimisation des pertes optiques et une épaisseur totale relativement faible. Il conviendra donc à l'avenir de réaliser une cellule photovoltaïque avec une telle CAR et de confirmer l'éventuelle amélioration du courant de court-circuit.

VII—Conclusion

Nous avons montré que théoriquement, l'application d'une double couche antireflet sur une cellule non encapsulée, composée de nitrure et d'oxynitrure de silicium sur la face avant, pourrait induire une amélioration du courant de court-circuit $+0,68 \text{ mA.cm}^{-2}$. Par contre, pour une cellule encapsulée, LELIEVRE a

montré que l'amélioration de courant de court circuit est que de $+0,16 \text{ mA.cm}^{-2}$ [2]. Pour cela et pour augmenter le rendement des cellules encapsulées, il faudrait déposer une autre couche où une double couche antireflet sur la face arrière pour récupérer le maximum de photon de grande longueur d'onde (IR) et mettre un convertisseur de photon sur la face avant pour exploiter les photons de grande énergie (UV).

Bibliographie de chapitre IV

[1] : **Julien DUPUIS**. *Elaboration et caractérisation de couches de $\text{SiO}_x\text{Ny} : \text{H}$ et $\text{SiN}_x : \text{H}$ réalisées par méthode PECVD : application à la face arrière des cellules photovoltaïques en silicium*. 2009-ISAL-0085 Année 2009

[2] : **Jean-François LELIEVRE**. *Elaboration de $\text{SiN}_x : \text{H}$ par PECVD : optimisation des propriétés optiques, passivantes et structurales pour applications photovoltaïques*. Thèse de doctorat. INSA de Lyon. 2007.