

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدية
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Mention Électronique
Spécialité Micro-Optoélectronique

présenté par

Bekkai Hadjer

&

Caïd Sabrina

étude et simulation d'une structure multicouche antireflet

Proposé par : Mr.A.BOUNEMRI

Année Universitaire 2016-2017

Remerciements

A dieu tout Grace

Pour nous avoir guidé et honoré par la lumière et la compréhension et de nous avoir accordé la connaissance de la science .Louange à dieu tout puissant qui nous a donné santé et courage pour achever ce modeste travail.

Je saisi cette occasion pour remercier chaleureusement mes parents, mes frères et mes sœurs.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à Mr BOUNEMRI Ammar pour sa supervision à se travail, nous le remercions infiniment pour sa rigueur, sa simplicité, sa générosité et sa disponibilité durant la réalisation de ce travail. Ces conseils précieux nous ont permis de réaliser notre mémoire de fin d'étude.

Nos remerciements le plus vifs s'adressent aussi à monsieur le président et les membres du jury qui ont accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.

Nos remerciements s'adressent à tout enseignant ayant contribué à notre formation depuis notre premier cycle au primaire au dernier cycle à l'université.

Merci à toutes les personnes qui nous ont aidés de près ou de loin à réaliser ce mémoire

Je dédie ce modeste travail

A mes chers parents

A mes grands-parents

A mes sœurs et mes frères

A toute ma famille

A tous mes collègues et mes amis partout

A tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien et la prospérité de l'humanité

ملخص:

ان عملنا هذا يتمثل في دراسة بنية متعددة الطبقات مانعة للانعكاس من اجل الوصول الى درجة امتصاص عالية تم استعمال برنامج حاسوبي (كومصول) من اجل المحاكاة للطبقات المانعة للانعكاس واختبار مختلف الطرق لتشكيل الطبقات المانعة للانعكاس. عملنا على احادية الطبقة، مزدوجة الطبقة، متعدد الطبقات مع مزيج من المواد المختلفة ذات سمك مختلف نتائج المحاكاة تظهر ان معامل الانكسار وسمك المواد له دور مهم جدا في التقليل من الانعكاسية كلمات المفاتيح: الانعكاسية، الطبقات المانعة للانعكاس، معامل الانكسار

Résumé : notre travail consiste en l'étude d'une structure multicouche antireflet pour parvenir à minimiser la réflectivité pour avoir une absorption quasi-totale .

Le logiciel (comsol) a été utilisé pour la simulation des couches antireflets .On a travaillé sur les monocouches, les doubles couches et les multicouches avec différents matériaux, différentes combinaison et différentes épaisseur.

Les résultats de nos simulations montrent que l'indice de réfraction des matériaux et leurs épaisseurs jouent un rôle très important pour minimiser la réflectivité.

Mots clés : réflectivité ; couches antireflets ; indice de réfraction

Abstract: Our work consists in the study of an anti-reflective multilayer structure in order to minimize the reflectivity to have a total absorption.

The software (comsol) has been used for the simulation of anti-reflective coating .We have worked on mayo layers, double layers and multilayers with different combination and different thickness.

The results of our simulations show that the refractive index of the materials and their thicknesses play a very important role in minimizing the reflectivity.

Keywords : Reflectivity, anti reflective layers, réfractive index

Listes des acronymes et abréviations

ZCE : zone de charge d'espace

hν : photon d'énergie

Ec : bande de conduction

Ev : bande de valence

Eg : la bande interdite

a-si : silicium amorphe

ITO : d'un indium Oxyde d'étain

Al : aluminium

ZnO : d'oxyde de zinc pulvérisé

MgF₂: Fluorure de magnésium

CeF₃ : Fluorure de cérium

ZrO₂ : Dioxyde de zirconium

Ta₂O₅ : Oxyde d tantale

ZnS : Sulfure de zinc

SiO₂ : dioxyde de silicium

Al₂O₃ : Alumine

TCO : oxyde transport conducteur

U.V : ultra-violet

IR : infrarouge

CAR : couche antireflet

SCAR : simple couche antireflet

DCAR : double couche antireflet

MCAR : multicouches antireflets

N : l'indice optique complexe

n : l'indice de réfraction

C : la vitesse de propagation de la lumière dans le vide

v : la vitesse dans le milieu étudié

K : le coefficient d'extinction

ε : Constante diélectrique complexe

θ₁ : L'angle d'incidence et de réflexion

θ₂ : L'angle de réflexion

R : le coefficient de réflexion

T : le coefficient de transmission

r_{0/c} : Le coefficient de réflexion de l'extérieur/couche

n₀ = l'indice de milieu extérieur

n_{Si} = l'indice de réfraction de silicium

φ : est le déphasage entre les deux ondes réfléchies

σ : La différence de marche

n_{CAR} : L'indice de réfraction optimale

m : c'est un entier

d_{CAR} : L'épaisseur des couches antireflets

λ : La longueur d'onde

ω : Pulsation

A, B : la ligne droite de temps plus court

L : la longueur de trajet

r_{TE}, r_{TM} : Sont les coefficients de réflexion de Fresnel

Q-Q : quarter-quarter

Q-H-Q : quarter-half-quarter

Liste des figures

Figure 1.1 : La conversion de l'énergie solaire en énergie électrique	4
Figure 1.2 : Schéma d'une cellule solaire (haut) et schéma de la structure de bandes correspondant (bas)	5
Figure 1.3 : a) Transmission d'un photon d'énergie $E_{\text{photon}} < E_g$ dans un matériau semi-conducteur. b) Absorption d'un photon d'énergie $E_{\text{photon}} = E_g$ et formation d'une paire électron-trou. c) Absorption d'un photon d'énergie $E_{\text{photon}} > E_g$, formation d'une paire électron-trou et thermalisation de l'électron par émission de chaleur (phonon).....	5
Figure 1.4 : Exemple d'une cellule solaire classique.....	6
Figure 1.5 : Les différents composants de la cellule solaire en couche mince.....	7
Figure 1.6 : Illustration des phénomènes de réfractons à l'interface entre deux milieux d'indice de réfraction n_1 et n_2	12
Figure 1.7 : Schéma comparatif des phénomènes de réflexions sur surface plane et texturée « I » est l'intensité lumineuse incidente « R » est le coefficient de réflexion et « T » celui de transmission	14
Figure 1.8 : Piégeage optique.....	15
Figure 1.9 : L'introduction d'une couche mince entraîne la division d'amplitude de l'onde incidente, conduisant à des phénomènes d'interférences entre les rayons réfléchis.....	16
Figure 2.1 : Le spectre électromagnétique.....	20
Figure 2.2 : La réflexion diffuse.....	20
Figure 2.3 : La réflexion spéculaire.....	21
Figure 2.4 : La loi de réflexion.....	21
Figure 2.5 : Principe de Fermat.....	22
Figure 2.6 : Loi de Snell Descartes.....	23
Figure 2.7 : Le comportement de la lumière.....	24
Figure 2.8 : Représentation des ondes électrique et magnétique.....	25
Figure 2.9 : Rayonnements incidents, réfléchis et transmis entre trois milieux d'indices de réfraction différents.....	27

Figure 2.10 : Comportement de la lumière sur revêtement simple couche antireflet.....	28
Figure 2.11 : Modèle géométrique du modèle consol.....	31
Figure 2.12 : Emplacement des couches minces.....	32
Figure 2.13 : équations de discontinuité.....	33
Figure 2.14 : Discontinuité formée par le matériau CeF3 comme première couche...	34
Figure 2.15 : Discontinuité formée par le matériau MgF2 comme deuxième couche..	34
Figure 2.16 : Réflexion en fonction de la longueur d'onde λ_0 pour une épaisseur de $\frac{\lambda_0}{4}$	35
Figure 2.17 : Discontinuité formée par une couche intermédiaire d'épaisseur $\frac{\lambda_0}{2}$	36
Figure 2.18 : Réponse de réflectance pour un quart de quart et quart de quart de revêtement.....	36
Figure 3.1 : La variation de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde	39
Figure 3.2 : La réponse de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde pour quarter quarter et quarter half quarter.....	40
Figure 3.3 : La réponse de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde pour quarter half quarter.....	41
Figure 3.4 : La réponse de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde pour le quarter quarter.....	42
Figure 3.5 : La réponse de la réflectivité pour un empilement CeF3, ZrO2, MgF2.....	43
Figure 3.6 : La réponse de La réflectivité en fonction de la longueur d'onde pour une monocouche antireflet CeF3.....	44
Figure 3.7 : La réponse de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde pour monocouche antireflet MgF2.....	45
Figure 3.8 : La réponse de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde pour une monocouche antireflet ZrO2.....	46

Figure 3.9 : La variation de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde avec un épaisseur quarter -quarter ($\lambda/4$).....	46
Figure 3.10 : La réponse de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde pour DCAR avec différent épaisseur.....	47
Figure 3.11 : La réponse de la réflectivité pour DCAR avec épaisseur de $\lambda/2$	48
Figure 3.12 : La réponse de réflectance en fonction de la longueur d'onde pour monocouche « ITO ».....	49
Figure 3.13 : La réponse de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde pour monocouche a_Si.....	50
Figure 3.14 : La réponse de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde pour double couche « ITO, ZnO » quarter quarter.....	51
Figure 3.15 : La réponse de la réflectivité en fonction de longueur d'onde pour « a_Si, ITO » comme double couche.....	52
Figure 3.16 : La réponse de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde pour DCAR « ITO, a_Si ».....	52
Figure 3.17 : La réponse de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde.....	52
Figure 3.18 : La variation de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde	55
Figure 3.19 : La réponse de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde	56
Figure 3.20 : La réponse de la réflectivité d'en fonction de la longueur d'onde	56
Figure 3.21 : La réponse de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde	57
Figure 3.22 : La réponse de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde	58
Figure 3.23 : la réponse de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde	59
Figure 3.24 : La réponse de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde.....	60
Figure 3.25 : La réponse de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde	61
Figure 3.26 : La réponse de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde pour DCAR avec différent épaisseurs.....	62
Figure 3.27 : La réponse de la réflectivité pour DCAR avec une épaisseur quarter quarter	62
Figure 3.28 : La reponse de la réflectivité pour DCAR quarter quarter	63
Figure 3.29 : La réponse de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde pour DCAR quarter quarter	64

Figure 3.30 : la réponse de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde pour MCAR avec des épaisseurs différentes	65
Figure 3.31 : La réponse de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde pour MCAR avec une épaisseur quarter half quarter	66
Figure 3.32 : La réponse de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde pour MCAR avec une épaisseur quarter half quarter.....	67
Figure 3.33 : La réponse de la réflectivité pour MCAR avec quarter half quarter pour trois couche.....	67
Figure 3.34 : La réponse de la réflectivité pour MCAR avec des épaisseurs différentes.....	67

Liste des tableaux

Tableau 2.1. L'indice de réfraction des matériaux	31
Tableau 3.1. Les meilleurs résultats pour SCAR.....	68
Tableau 3.2. Les meilleurs résultats pour DCAR.....	70
Tableau 3.3. Les meilleurs résultats pour MCAR.....	72

Introduction générale

La situation énergétique mondiale actuelle et son évolution dans le futur sont des problématiques extrêmement importantes, qui concernent l'ensemble de l'humanité. L'énergie issue de sources fossiles, qui est très largement utilisée aujourd'hui, est polluante, rejette d'importantes quantités de gaz à effets de serre, génère des tensions géopolitiques et des problèmes de sûreté. De plus, la quantité disponible de ces ressources va s'amenuiser à plus ou moins brève échéance. Les importantes conséquences environnementales et sociétales de nos modes de production et de consommation d'énergie nous amènent donc à devoir complètement repenser ceux-ci afin de les rendre plus durables.

Une partie importante de la solution à cette problématique réside dans l'accroissement de la part des énergies renouvelables [1]. Les énergies renouvelables sont des modes de production d'énergie utilisant des forces ou des ressources dont les stocks sont illimités comme : l'eau des rivières, le vent, les végétaux et le soleil. Il existe plusieurs types tels que l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, la biomasse, la géothermie, l'énergie du bois et l'énergie solaire [2]. Cette dernière, est en train de devenir l'une des principales sources d'énergie en raison de son abondance. En effet, ces énergies rejettent moins de gaz à effet de serre et de polluants, et ont une source d'énergie qui ne s'épuisera pas à cause d'une utilisation intensive. Parmi ces énergies renouvelables, l'énergie photovoltaïque, qui est la conversion directe de l'énergie que nous envoie le soleil en électricité, a un rôle majeur à jouer. En effet, entre autres avantages, elle utilise une source d'énergie renouvelable, abondante et bien distribuée dans le monde. De plus, son impact sur l'environnement est parmi les plus faibles. Parmi les facteurs qui freinent le déploiement massif d'énergie solaire, le faible rendement de ces cellules solaires ainsi que leur coût relativement élevé. La moitié du coût des dispositifs photovoltaïques au

silicium proviennent du matériau 200-300 μm d'épaisseur nécessaire pour absorber la majeure partie de photon incident[4]. Les cellules solaires à couches minces sont constituées de plusieurs couches de différents semi-conducteurs et de métaux, les semi-conducteurs entrant dans la fabrication de ces cellules solaires sont l'objet de multiples recherches. Jusqu'à présent, le silicium est le matériau le plus couramment utilisé pour la fabrication des cellules photovoltaïques, plus de 80% de la production mondiale. En raison de sa méthode de production très énergivore et très coûteuse. Dans ce but, Il en résulte la possibilité d'utiliser des matériaux absorbeurs beaucoup plus fins, de l'ordre de 2 μm d'épaisseur (100x moins que le Si cristallin) [2].

Des techniques plus avancées ont ensuite été développées pour l'absorption des photons, comme l'application d'un revêtement antireflet cette application est nécessaire pour effectuer un saut technologique. Un revêtement antireflet est un ensemble de films minces transparents appliqués à la surface d'un dispositif optique tel qu'une lentille pour réduire la réflexion [3].

La stratégie utilisée dans cette thèse pour réduire les coûts du photovoltaïque est d'étudier des cellules en couches minces avec revêtement antireflet [1]. Cette réduction de la lumière réfléchie conduit à une augmentation de l'efficacité du système optique et minimise la lumière parasite ce qui est important dans de nombreuses applications photovoltaïques [3]. Le plan de cette thèse se décompose de la manière suivante :

Au cours de chapitre 1, nous abordons le fonctionnement de la cellule photovoltaïque en silicium. Nous y rappelons le principe de la conversion photovoltaïque, ainsi que les différents facteurs influencent sur le rendement de conversion. Nous exposons également les technologies utilisées pour réduire les pertes, avec une attention particulière sur la contribution des couches antireflets.

Le chapitre 2 expose la théorie des couches antireflet avec un aperçu général sur l'intérêt des couches antireflet.

Le chapitre 3 a été consacré à l'étude et l'optimisation des différents empilements et représenté les différents résultats et les applications possibles des combinaisons des couches antireflets pour la cellule photovoltaïque.

Chapitre1 Etat de l'art sur les cellules solaire à base des couches minces

1.1 Introduction

L'énergie solaire est en train de devenir l'une des principales sources d'énergie en remplaçant les combustibles fossiles en raison de son abondance. Les cellules solaires convertissent cette énergie solaire en énergie électrique par absorption des photons par des matériaux semi-conducteurs. Les semi-conducteurs entrant dans la fabrication de ces cellules solaires sont l'objet de multiples recherches, en vue d'améliorer le rendement de conversion de ces dispositifs. Dans ce chapitre, nous allons expliquer le principe de fonctionnement des cellules Solaires à couche mince et comment augmenter le rendement de ces cellules solaires [2].

1.2 Les énergies renouvelables

On considère qu'une énergie est renouvelable, toute source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable. On distingue plusieurs types de sources d'énergies renouvelables dont l'énergie solaire est la source la plus importante. La conversion de cette énergie en électricité peut être effectuée de manière directe ou indirecte. Parmi ces conversions, la conversion photovoltaïque qui est considérée comme la plus jeune des énergies renouvelables parce qu'elle a l'avantage d'être non polluante, accessible, souple, fiable, silencieuse et n'entraîne aucune perturbation du milieu [2].

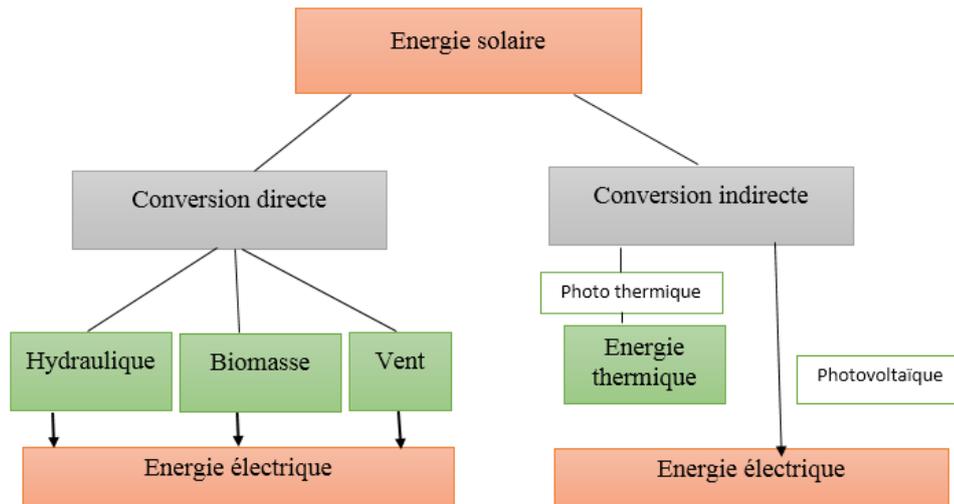


Figure 1.1. La conversion de l'énergie solaire en énergie électrique [2].

1.3 Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire

Le fonctionnement d'une cellule solaire repose sur l'effet photoélectrique, Il s'agit de l'absorption de photons par un matériau, qui convertit cette énergie lumineuse en énergie électrique. Dans le cas qui nous intéresse, le matériau est un semi-conducteur, le silicium, et la source d'énergie lumineuse est le soleil. Les photons absorbés créent une paire électron-trou, les porteurs de charges ainsi photo générés sont ensuite séparés et collectés vers un circuit extérieur Dans la cellule solaire, la séparation des porteurs de charges se fait grâce à la jonction pn. Il s'agit de la juxtaposition de silicium avec un excès de trous (ou un défaut d'électrons) dû au dopage par un élément de la colonne III du tableau périodique, le silicium type p, avec du silicium de type n, qui comporte un excès d'électrons en raison du dopage par un élément de la colonne V. Généralement, la zone de type p est uniformément dopée au bore à hauteur de 10^{16} cm⁻³, et forme la quasi-totalité de l'épaisseur de la plaquette, tandis que la zone de type n est fortement dopée au phosphore (densité de dopant supérieure à 10^{20} cm⁻³). Ces deux zones forment respectivement la base et l'émetteur de la cellule. La juxtaposition des zones p et n forme un champ électrique, qui repousse les électrons vers la zone n et les trous vers la zone de type p. A la jonction de ces deux parties, il y a alors une déplétion en porteurs de charge, c'est la zone de charge d'espace (ZCE). Lors de l'absorption d'un photon, un électron de la bande de valence du semi-conducteur va être excité et se retrouver en bande de conduction, laissant un défaut d'électron dans la

bande de valence. Deux porteurs de charge mobiles sont donc générés, l'électron et le trou. Si cela se produit hors de la ZCE, les porteurs minoritaires (électrons dans le type p et trous dans le type n) vont diffuser dans le matériau jusqu'à se recombiner [1].

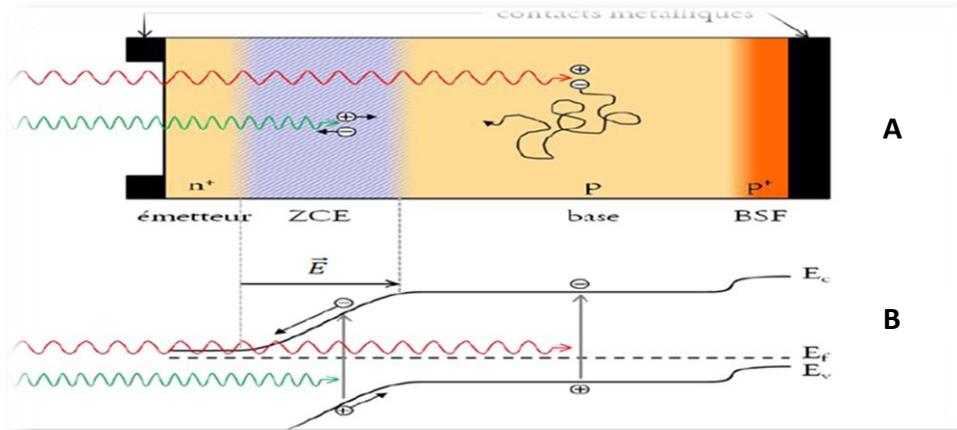


Figure 1.2. Schéma d'une cellule solaire (A) et schéma de la structure de bandes correspondant (B) [1].

L'énergie du photon est absorbée par un électron de la bande de valence, qui sera transféré vers la bande de conduction. Son absence dans la bande de valence est modélisée par un trou, porteur de charge positive. L'absorption du photon génère ainsi une paire électron-trou.

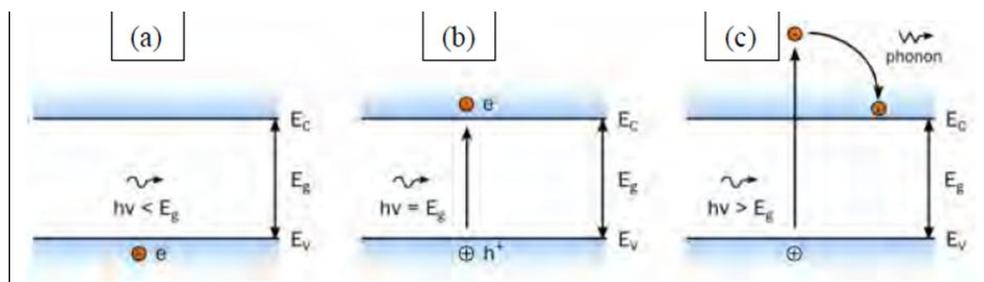


Figure 1.3. a) Transmission d'un photon d'énergie $E_{\text{photon}} < E_g$ dans un matériau semi-conducteur.

b) Absorption d'un photon d'énergie $E_{\text{photon}} = E_g$ et formation d'une paire électron-trou.

c) Absorption d'un photon d'énergie $E_{\text{photon}} > E_g$, formation d'une paire électron-trou et thermalisation de l'électron par émission de chaleur (phonon) [5].

1.4 Les cellules solaires classiques

La cellule solaire est un composant semi-conducteur qui convertit l'éclairement incident en puissance électrique. Le phénomène mis en jeu, l'effet photovoltaïque consiste en l'apparition d'une différence de potentiel quand on génère des porteurs de charge par excitation lumineuse, au voisinage d'une jonction. La structure photovoltaïque la plus classique est une mono-jonction. Le contact de la face éclairée à la forme d'une grille qui n'occulte qu'une faible portion de la surface (5 à 10%). La face Arrière est entièrement métallisée. Afin de réduire les pertes par réflexion du rayonnement incident, une couche antireflet recouvre uniformément toute la face avant. Le principe de fonctionnement des cellules solaires repose sur l'effet photovoltaïque et permet la transformation directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Cette conversion d'énergie peut se diviser en trois étapes l'absorption du rayonnement solaire, la séparation et la collecte des charges photo générées. La première technologie mettant en œuvre l'effet photovoltaïque est basée sur le silicium monocristallin ou multicristallin découpés en plaquettes à partir de lingots. Elle constitue actuellement l'essentiel de l'industrie photovoltaïque, voire plus de 80% de la production mondiale. Bien qu'il soit un matériau très abondant sur terre sous forme de silice, parfaitement stable et non toxique, le silicium nécessite une énergie intensive pour le purifier et le cristalliser ce qui rend sa méthode de production très énergivore et donc, très coûteuse. Cela a donné naissance à une nouvelle technologie basée sur les couches minces [6].

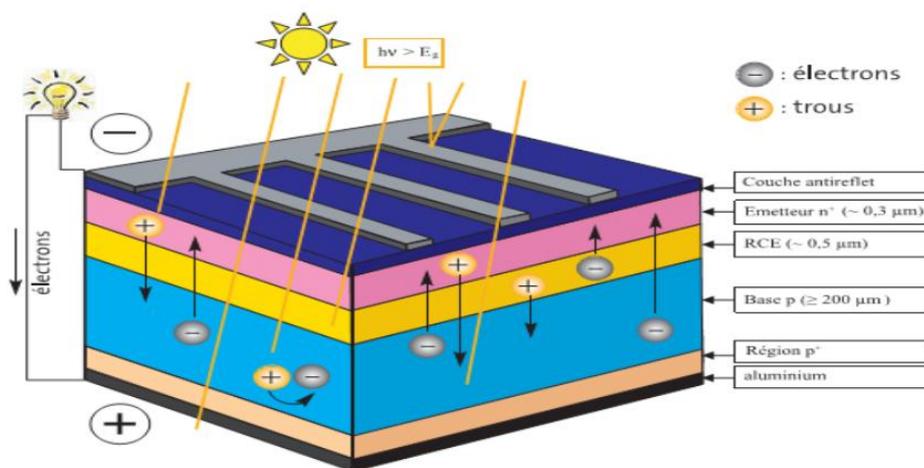


Figure 1.4. Exemple d'une cellule solaire classique [6].

1.5 Les cellules solaires à base des couches minces

L'objectif est d'atteindre à la fois un meilleur rendement des cellules et une réduction des coûts de fabrication et d'utilisation des matériaux. De ce fait, l'intérêt commercial commence à changer vers les cellules à couche mince.

Une couche mince ou TF (Thin Film) est un revêtement dont l'épaisseur peut varier de quelques couches atomiques à une dizaine de micromètres. La technologie des cellules solaires en couches minces ne dépose que la quantité de matériau photosensible efficace pour absorber l'essentiel du rayonnement solaire (quelques microns d'épaisseurs suffisent), ce qui rend ces cellules peu gourmandes en matériaux de fabrication et facilement adaptables aux supports flexibles. Cependant, le problème majeur est le rendement moindre de ce type de cellules et la Toxicité de certains éléments (cadmium) utilisés pour leur fabrication [2].

1.6 Les différents composants de la cellule solaire en couche mince

La configuration la plus répandue, d'une cellule solaire en couches minces est formée d'un empilement de plusieurs matériaux déposés successivement sur un substrat. Ce dernier est généralement une plaque de verre [5].

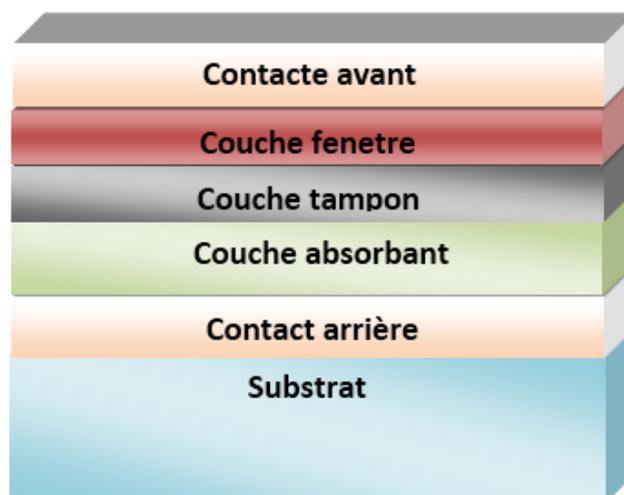


Figure 1.5. Les différents composants de la cellule solaire en couche mince.

Un substrat : Généralement une plaque de verre ou glass, d'épaisseur allant de 1 -3 μm .

Un contact ohmique arrière : La première couche déposée sur le substrat est l'électrode de contact arrière. Elle a pour rôle principal de collecter les charges générées dans la cellule. D'un point de vue électrique, elle constitue le pôle positif du générateur photovoltaïque et son épaisseur est d'environ 300 nm - 1000 nm.

Une couche absorbante : C'est une couche qui situe directement au-dessus du contact arrière est composée du matériau absorbeur. C'est aussi dans ce matériau que la majorité des photons est absorbée pour former les paires électron-trou. Son épaisseur beaucoup plus épaisse que l'autre couche est d'environ de 1 μm - 2 μm

Une couche tampon (buffer layer) : L'hétérojonction p-n est formée en ajoutant une couche appelée couche tampon. Actuellement, les meilleurs rendements sont obtenus en utilisant des couches tampon

Une couche d'oxyde transparent conducteur (TCO) : Le TCO permet à la couche fenêtre de constituer, en partie, le contact avant de la cellule photovoltaïque tout en étant transparente au rayonnement solaire, l'épaisseur de la couche fenêtre est de l'ordre De 300 nm à 500 nm [5].

1.7 Les pertes au niveau d'une cellule solaire classique

Le rendement d'une cellule est affecté par différents types de pertes, ce qui fait que toute l'énergie incidente n'est pas convertie en électricité.

On peut classer les pertes en deux grandes parties : des pertes physiques et des pertes technologiques. Les pertes physiques sont généralement liées aux propriétés des matériaux utilisés, pour les limitations technologiques, elles sont induites par le processus de fabrication.

1.7.1 Les pertes physiques

a Absorption incomplète des photons

Les photons d'énergie inférieure à celle de la bande interdite du silicium, de 1,12 eV, ne peuvent être absorbés par le matériau pour produire des paires électron-trou, car les électrons ne peuvent pas passer le gap. Ainsi le domaine infrarouge au-delà de 1100nm, qui représente environ 27 % de l'énergie incidente, ne peut être utilisé par la cellule [1].

b Excès d'énergie des photons

En revanche les photons d'énergie supérieure à la bande interdite seront absorbés. Cependant, la différence d'énergie entre celle du photon et celle du gap ne sera pas exploitée, mais perdue par thermalisation. Environ 28 % de l'énergie incidente se trouve inutilisée pour cette raison, notamment dans les domaines visible et ultraviolet [1].

c Recombinaisons du silicium

Certains électrons n'ont pas assez d'énergie pour parvenir au circuit extérieur, ils dissipent alors cette énergie sous forme de chaleur, par un phénomène dit de « recombinaison » [6].

d Les pertes résistives

Le courant électrique qui circule dans le semi-conducteur se transforme inévitablement, pour partie, en énergie thermique, à cause de la résistance électrique du matériau (ce phénomène est aussi connu sous le nom de pertes par effet Joule). Plus l'intensité lumineuse envoyée vers la cellule est élevée, plus ces pertes résistives augmentent. À des intensités lumineuses trop fortes, elles deviennent même tellement importantes qu'elles entraînent la diminution du rendement de la cellule [6].

1.7.2 Les pertes technologiques

a Les pertes par réflectivité

Avant l'entrée de la lumière dans la cellule, une quantité de photons sont réfléchis par la surface avant de la cellule. Le coefficient de réflexion est voisin de 40% pour le silicium monocristallin poli optique. Une texturisation et une couche antireflet permettent de réduire ce coefficient en dessous de 5 % [1].

b Les pertes par ombrage

Le dépôt des contacts métalliques nécessaires pour collecter les charges photo générés entraîne une zone d'ombrage sur la surface exposée de la cellule en face avant [6].

c Les pertes des IR

À cause de la limite de l'épaisseur de la cellule, un certain nombre de photons (photons infrarouges) travers la cellule sans être absorber [6].

d Les pertes optiques

Elles proviennent de photons qui ne sont pas absorbés par le silicium, malgré leur énergie supérieure au gap. Il en résulte principalement une réduction du courant de la cellule. L'indice de réfraction optique du silicium est beaucoup plus élevé que celui de l'air, ce qui cause une réflexion importante. Elle est atténuée par une texturisation de face avant, qui modifie l'angle incident de la lumière et favorise la possibilité pour le rayon réfléchi d'arriver une seconde fois à l'interface avec la cellule. Un autre moyen de l'atténuer est d'effectuer une adaptation d'indice, par un dépôt de diélectrique en face avant, mais aussi pour un module, par le biais du verre et de l'encapsulant. La profondeur d'absorption des photons de grandes longueurs d'onde est supérieure à l'épaisseur de la cellule. Cela signifie que le silicium est partiellement transparent pour ces photons. Un confinement optique peut alors être utilisé pour réduire cette perte [1].

1.8 Les technologies pour la réduction des pertes optique

Les pertes optiques correspondent aux photons réfléchis sur la face avant et à ceux transmis à travers la cellule sans être absorbé. Alors qu'il aurait pu générer des paires électrons / trou. La réflectivité de la face avant peut être réduite grâce à la texturisation et à l'utilisation d'une couche antireflet (CAR), ces technique se présentent comme suit :

1.8.1 Constantes optique et réflectivité

Les propriétés optiques de tout milieu peuvent être décrites par l'indice optique complexe N [7]:

$$N = n + ik \quad 1-1$$

La partie réelle n est l'indice de réfraction, c'est-à-dire le rapport entre la vitesse c de propagation de la lumière dans le vide et la vitesse v dans le milieu étudié

$$n = \frac{c}{v} \quad 1-2$$

La partie imaginaire K est le coefficient d'extinction et traduit l'absorption du rayonnement par le matériau, il est lié au coefficient d'absorption α , pour chaque longueur d'onde λ , par la relation :

$$\alpha = 4\pi k/\lambda \quad 1-3$$

De manière analogue, les propriétés optiques peuvent également être décrites par la constante diélectrique complexe ε :

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2 \quad 1-4$$

avec

$$\left| \begin{array}{l} \varepsilon_1 = N^2 \\ \varepsilon_2 = n^2 - K^2 \\ \varepsilon = 2nk \end{array} \right. \quad 1-5$$

Les constantes optiques d'un milieu sont donc n , k , ε_1 , ε_2 et α ces valeurs dépendent de l'énergie du photon, $E=hf=hc/\lambda$, et les relations $N(E)$, $\varepsilon(E)$, $\alpha(E)$ sont appelées fonctions de dispersion optiques. Ces constantes permettent de décrire la propagation d'une onde électromagnétique, et notamment à l'interface entre deux matériaux à partir des équations de Maxwell, les conditions de continuité des composantes tangentes des champs électrique et magnétique d'une onde électromagnétique permettent de démontrer qu'il n'y a pas de changement de longueur d'onde à la réflexion sur un dioptre et que les rayons réfléchis et transmis sont dans le plan d'incidence, la déviation de l'onde entre un milieu d'indice optique n_1 et un milieu d'indice n_2 est calculée selon la loi de Snell-Descartes (Figure 1.6) [7].

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

1-6

Avec

θ_1 Est l'angle d'incidence (et de réflexion)

θ_2 Est l'angle de réfraction

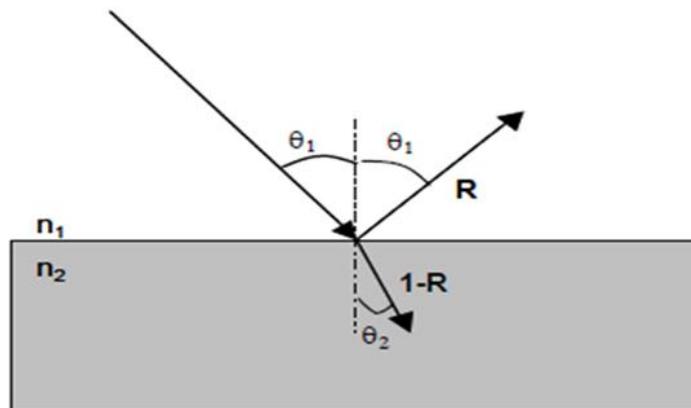


Figure 1.6. Illustration des phénomènes de réfractons à l'interface entre deux milieux d'indice de réfraction n_1 et n_2 [7].

Cette équation caractérise le chemin optique de l'onde transmise dans le deuxième milieu, pour laquelle on définit le coefficient T : c'est le rapport entre les intensités transmise et incidente, qui est donc compris entre 0 et 1. De manière analogue, la part de l'onde réfléchi est définie par le coefficient de réflexion R, on a donc à l'interface :

$$R + T = 1$$

1-7

Le coefficient de réflexion R présente deux composantes : une dans le plan de polarisation parallèle au rayonnement incident (R_{\parallel} , aussi dénotée R_p) et l'autre dans le plan perpendiculaire (R_{\perp} ou R_s). Elles sont définies par :

$$R = \frac{R_{\parallel} + R_{\perp}}{2}$$

1-8

Et

$$R_{\parallel} = |r_{\parallel}|^2, R_{\perp} = |r_{\perp}|^2$$

1-9

Ou r_{\parallel} et r_{\perp} sont les amplitudes des coefficients de réflexion dans chacune des deux directions celle-ci sont déterminées par les équations de Fresnel :

$$r_{\parallel} = \frac{N_2 \cos \theta_1 - N_1 \cos \theta_2}{N_2 \cos \theta_1 + N_1 \cos \theta_2} \quad 1-10$$

$$r_{\perp} = \frac{N_1 \cos \theta_1 - N_2 \cos \theta_2}{N_1 \cos \theta_1 + N_2 \cos \theta_2}$$

Si nous considérons une interface air- silicium ($N_1 = 1$ et $N_2 = n_{si} + ik_{si}$) en incidence proche de la normale ($\theta_1 \approx \theta_2 \approx 0$), ces équations devient donc :

$$R = R_{\parallel} = R_{\perp} = \left| \frac{N_2 - N_1}{N_2 + N_1} \right|^2 = \frac{(n_{si} - 1)^2 + k_{si}^2}{(n_{si} + 1)^2 + k_{si}^2} \quad 1-11$$

Dans le cas du silicium, le coefficient d'extinction k_{si} devient négligeable pour des longueurs d'ondes supérieures à 400nm [7].

1.8.2 La texturisation

Toute rugosité de la surface réduit la réflectivité en favorisant les chances pour la lumière de se réfléchir sur le matériau .l'opération de la texturisation vise à développer en surface un relief micrométrique (typiquement 5-10 μ m) permettent des réflexions multiples .la longueur d'onde de la lumière incidente étant inférieure aux dimensions des structures ainsi réalisées , les rayons incident suivent les lois de l'optique géométrique .par exemple , un rayon arrivant en incidence normale par rapport au plan de la cellule est réfléchi sur la face d'une « pyramide » adjacente ,diminuant ainsi le coefficient de réflexion de R à R^2 voir **figure 1.7** de plus , le rayon transmis dans la cellule l'est avec un angle de réfraction différent de 0° ,augmentant son parcours au sien du silicium par rapport au cas d'une surface plane. La probabilité d'absorption des photons en est donc améliorée. En fin, la texturisation de la face arrière en traine un piégeage plus important de la lumière au sien de la cellule [7].

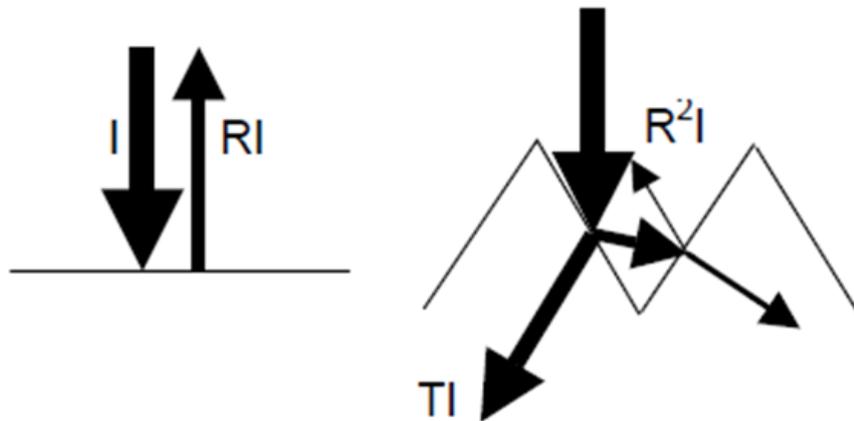


Figure 1.7. schéma comparatif des phénomènes de réflexions sur surface plane et texturée.

« I » est l'intensité lumineuse incidente « R » est le coefficient de réflexion et « T » celui de transmission [15]

1.8.3 Éviter les pertes en absorption

Si l'épaisseur de silicium est plus faible, la proportion des photons incidents pouvant être absorbés sera plus faible. Dans l'ultraviolet et le visible, le coefficient d'absorption est suffisamment élevé pour que cette différence soit négligeable. En revanche dans les longueurs d'onde du proche infrarouge, où le coefficient d'absorption est plus faible, un grand nombre de photons sont perdus. Cette perte peut être contrebalancée grâce au piégeage optique, dont le principe est d'avoir le plus grand nombre possible de photons dans la couche, et de les empêcher d'en sortir. Ainsi, ils ont plus de chances d'être absorbés pour former une paire électron-trou. Le piégeage optique a donc beaucoup plus d'importance dans une cellule mince que dans une cellule épaisse. Un moyen de réduire cet effet est d'allonger le chemin optique en le rendant oblique à l'intérieur de la cellule. De cette manière, pour les photons, tout se passe comme si la cellule était épaisse de $\frac{w}{\cos \theta}$. Cet effet de la texturation de la face avant de la cellule, qui a une importance secondaire pour une cellule épaisse (par rapport au fait réduire la réflexion externe), devient très avantageux pour une cellule mince [7].

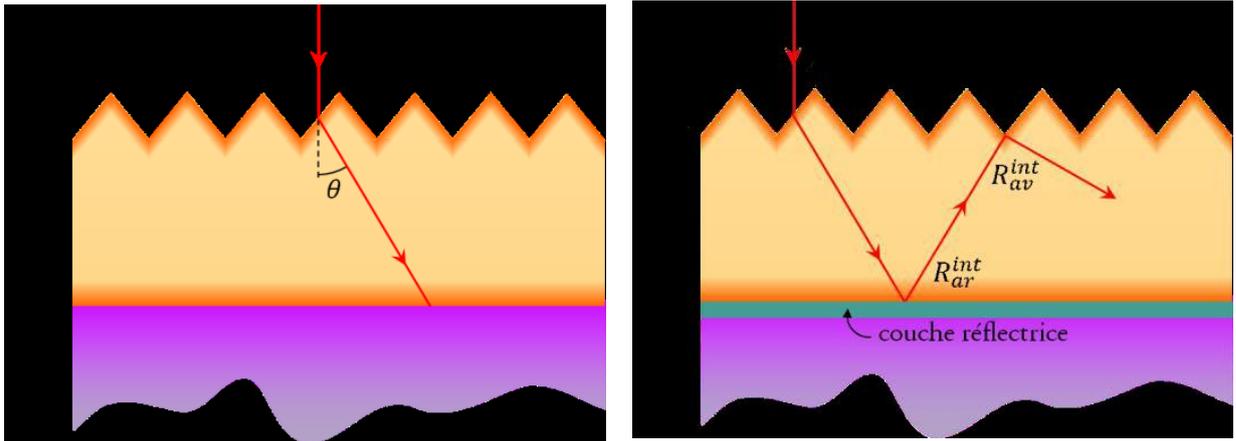


Figure 1.8 : Piégeage optique [7].

Allongement du chemin optique par inclinaison des rayons (à gauche) et piégeage optique par le biais de la réflectivité externe en face avant, la réflectivité interne en face arrière due à la présence d'une couche réfléchissante (à droite) et la réflectivité interne en face avant Le piégeage optique peut également être amélioré par une réflexion interne des photons élevée. Ainsi la cellule joue le rôle de cavité piégeant les photons jusqu'à ce qu'ils soient absorbé [7].

1.8.4 Revêtement - couche protectrice ou intelligente

Les TCO (oxydes transparents conducteur) sont utilisés en tant que revêtement de surface. La plus simple des applications est l'application direct d'une de leurs caractéristiques, en effet les TCO réfléchissent les rayonnements proches et lointains infrarouge à cause des charges libres. Cette réflexion peut être mise à profit pour réaliser des couches laissant passer la lumière visible mais réfléchissant les infrarouges ces matériaux sont utilisables pour réaliser des dispositifs tels que des miroirs chauffants et des fenêtres electrochromique [7].

1.8.5 Couche antireflet (CAR)

Afin de diminuer d'avantage la réflectivité , l'utilisation d'une couche antireflet (CAR) s'est imposée .Il s'agit ici d'exploiter les phénomènes d'interférences par division d'amplitude résultants de l'introduction d'une couche mince de matériaux diélectrique entre le milieu extérieur (d'indice n_0) et le substrat (silicium d'indice n_{si}) comme illustré

par la **figure 1.9** suivante , le choix de l'indice de réfraction n_c et de l'épaisseur d_c de la couche mince peut conduire au cas limites des interférences destructives ou constructives a la réflexion [7] .

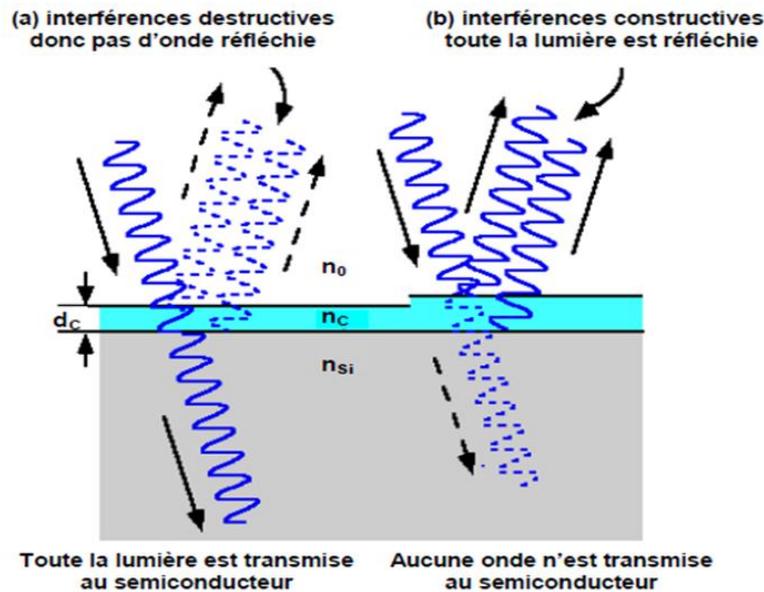


Figure 1.9. L'introduction d'une couche mince entraîne la division d'amplitude de l'onde incidente, conduisant à des phénomènes d'interférences entre les rayons réfléchis [7].

Les amplitudes des coefficients de réflexion aux interfaces extérieur/couches et couche/Si, sont par analogie avec les équations (1-9) et (1-11) :

$$r_{0/c} = \frac{n_0 - n_c}{n_0 + n_c} \quad \text{Et} \quad r_{c/si} = \frac{n_c - n_{si}}{n_c + n_{si}} \quad 1-12$$

Aux longueurs d'onde considérées (600nm), nous pouvons négliger l'absorption du la couche et du substrat. Pour l'application photovoltaïque l'indice de réfraction et l'épaisseur de la couche antireflet son choisis de manière à minimiser la réflexion à la longueur d'onde de 600nm, Celle-ci est, En effet proche du maximum d'émission du soleil et autorise une pénétration acceptable des photons au sein du silicium.

D'où l'on déduit le coefficient de réflectivité complexe entre le milieu extérieur et le silicium :

$$r_{0/si} = \frac{r_{0/c} + r_{c/si} e^{-i\varphi}}{1 + r_{0/c} r_{c/si} e^{-i\varphi}} \quad 1-13$$

φ Est le déphasage entre les deux ondes réfléchies, donné par la relation :

$$\varphi = \frac{2\pi\delta}{\lambda} \quad 1-14$$

Ou δ est la différence de marche ($\delta = 2 \cdot n_c \cdot d_c \cdot \cos \theta_2$). En considérant que les angles d'incidences (et donc de réfraction θ_2) sont faible, le déphasage devient :

$$\varphi = 4\pi \frac{n_c d_c}{\lambda} \quad 1-15$$

Le but de la couche antireflet est d'obtenir des interférences destructives entre les ondes réfléchies sur les deux interfaces, entraînant l'annulation de la réflexion à la longueur d'onde considérée. Cela se traduit par $r_{0/c} = -r_{c/si} e^{-i\varphi}$, d'où les deux conditions suivantes :

Il faut que les rayons aient des amplitudes identiques pour obtenir une intensité résultante nulle, ce qui équivaut à $r_{0/c} = r_{c/si}$. On obtient donc l'indice de réfraction optimal n_{CAR} :

$$n_{CAR} = \sqrt{n_0 n_{si}} \quad 1-16$$

D'autre part, il faut que $\varphi = (2m + 1)\pi$, avec m entier. Ainsi, les épaisseurs possibles d_{CAR} de la couche antireflet sont :

$$d_{CAR} = \frac{(2m+1)\lambda}{4n_{CAR}} \quad 1-17$$

La couche antireflet peut donc être vue comme une lame quarter d'onde qui va permettre d'éliminer la réflexion pour une longueur d'onde donnée [7].

1.9 Conclusion

Après avoir donné un aperçu général sur les cellules photovoltaïques et leurs principes de fonctionnement, Nous avons vu qu'il existe différents types de perte et parmi les meilleures solutions à cette problématique c'est la couche antireflet qui permet de minimiser la lumière parasite.

Chapitre 2 La théorie des couches antireflets

2.1 Introduction

Depuis quelque années, avec le progrès considérable de la technologie des couches minces, des films diélectriques inhomogènes à indice de réfraction variable sont proposés dans différents domaines de l'optique moderne. Si un rayonnement électromagnétique tombe sur une structure composée de couches minces de plusieurs matériaux différents, de multiples réflexions auront lieu au sein de la structure. En fonction de la source de lumière, des indices et des épaisseurs des couches, les faisceaux réfléchis peuvent être cohérents et interférer avec l'autre. Cette interférence optique peut être utilisée pour concevoir des filtres optiques multicouches sur différentes gammes spectrales. Dans cette section, un résumé des équations optiques de base pour les calculs des propriétés optiques des films minces sont présentées. Considérons le système de film mince constitué de L couches tel que Les paramètres de construction comprennent les indices de réfraction et les épaisseurs des différentes couches ainsi que l'indice de réfraction du substrat n_s et de milieu incident n_m . L'angle d'incidence θ_0 , la longueur d'onde λ , et le plan de polarisation du rayonnement incident sont les variables externes du système.

Pour les applications photovoltaïques, le rôle le plus important d'une couche antireflet (CAR) est de réduire considérablement les pertes optiques au niveau de la surface avant de la cellule. Nous nous attacherons donc à étudier les propriétés optiques des différents diélectriques utilisés comme couche antireflet, de manière à déterminer les couches optimales conduisant à la transmission la plus efficace des photons incidents vers le substrat de silicium pour des surfaces planes et texturisées. Nous explorons également la possibilité d'exploiter la large gamme d'indices optiques afin de développer une multicouche antireflet et minimiser davantage les pertes optiques [6].

2.2 Théorie et modèles des couches diélectriques

L'industrie des couches minces est obligée de concevoir des multicouches antireflets dans lesquels les valeurs de la transmission, de la réflectivité, et d'absorption sont spécifiées à un certain nombre de longueurs d'onde. Dans quelque cas, cette industrie peut être requise de fournir à ces multicouches beaucoup d'autres propriétés plus compliquées. Les paramètres qui peuvent être employés pour atteindre ces buts sont le nombre de couches dans les multicouches, les épaisseurs des couches, les indices de réfraction et les coefficients d'extinction des couches. La recherche dans le domaine des couches minces attire de plus en plus de chercheur dans le monde pour avoir une absorption optique totale avec un minimum de perte tel que la spectroscopie d'absorption optique dans la gamme UV-VISIBLE-NIR est l'une des technique les plus utilisé pour l'analyse des propriétés optique des couches minces[6].

2.3 Le spectre solaire

Le champ électromagnétique qui se propage dans l'espace peut être monochromatique, c'est-à-dire caractérisé par une seule fréquence ν , pulsation ω ($\omega=2\pi\nu$) ou λ est la longueur d'onde ($\lambda=c/\nu$), ou poly chromatique, s'il transporte plusieurs fréquences (longueurs d'ondes) soit discrètes soit en continues. La distribution de l'énergie entre ces composantes s'appelle le spectre du rayonnement. Différentes gammes du spectre électromagnétique sont désignées par des noms particuliers (onde radio, micro-onde, ondes optiques, etc.). L'irradiation et la détection du champ électromagnétique dans les différentes gammes spectrales sont souvent liées à des processus physiques bien différents. Un aperçu de tout le spectre électromagnétique utilisé ou accessible est donné sur la **Figure 2.1**. Le rayonnement appartenant à l'intervalle étroit entre 380 nm et 770 nm est capable de produire des sensations visuelles dans l'œil humaine et s'appelle « lumière ». Cette région est bornée des deux côtés par un rayonnement : ultraviolet (coté des faibles longueurs d'ondes) et infrarouge (coté des grandes longueurs d'ondes). Les trois gammes forment ensemble le spectre optique auquel on s'intéressera en particulier dans le cadre de cette partie [6].

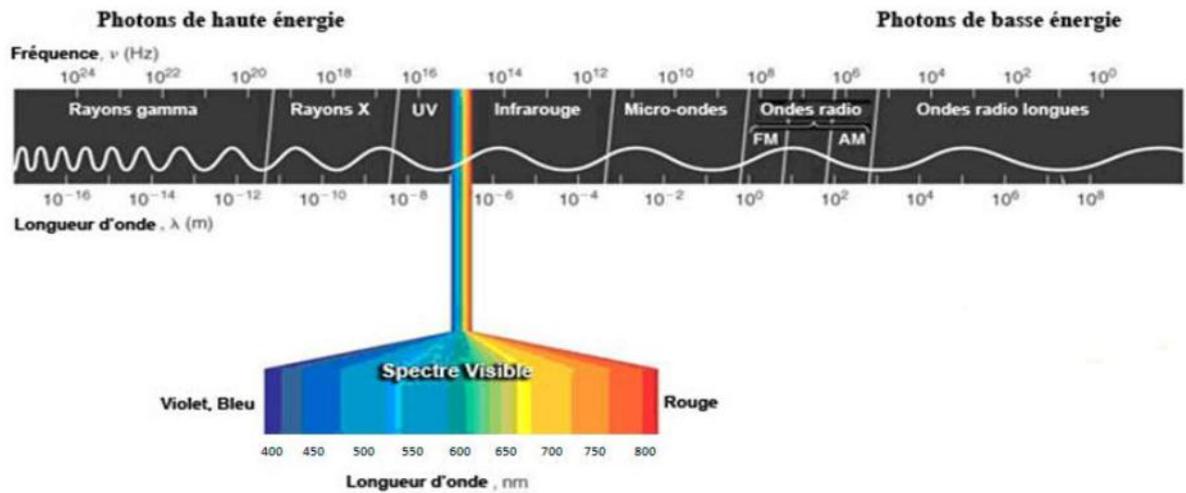


Figure 2.1 .Le spectre électromagnétique [6].

2.4 La Réflexion

La réflexion en optique désigne un des phénomènes qui intervient lors de l'incidence de la lumière sur un matériau .la part de la lumière qui n'est ni absorbée, ni transmise est dite réfléchi. La réflexion de la lumière peut être spéculaire ou bien diffuse suivant la nature de l'interface [9].

2.4.1 La réflexion diffuse

La réflexion diffuse intervient sur les interfaces irrégulières, la lumière est réfléchi dans un grand nombre de directions et l'énergie du rayon incident est redistribuée dans une multitude de rayons réfléchis.

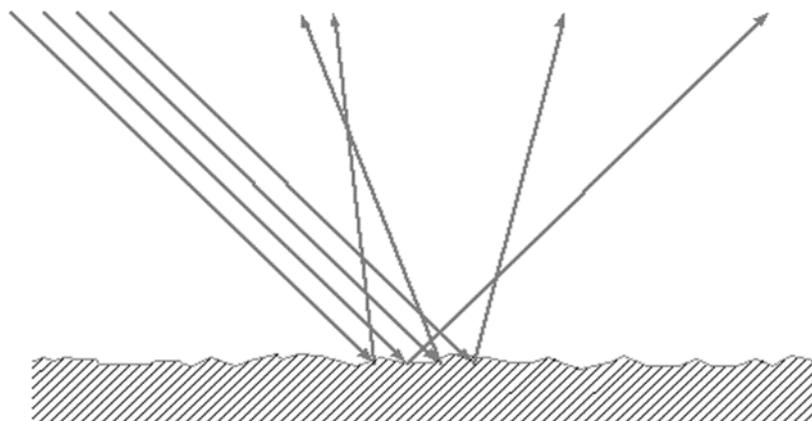


Figure 2.2.La réflexion diffuse [9].

2.4.2 La réflexion spéculaire

La réflexion est dite spéculaire lorsque le rayon incident donne naissance à un rayon réfléchi unique. Idéalement, l'énergie du rayon incident se retrouve totalement dans le rayon réfléchi, en pratique une partie de l'énergie peut être absorbée ou diffusée au niveau de l'interface.

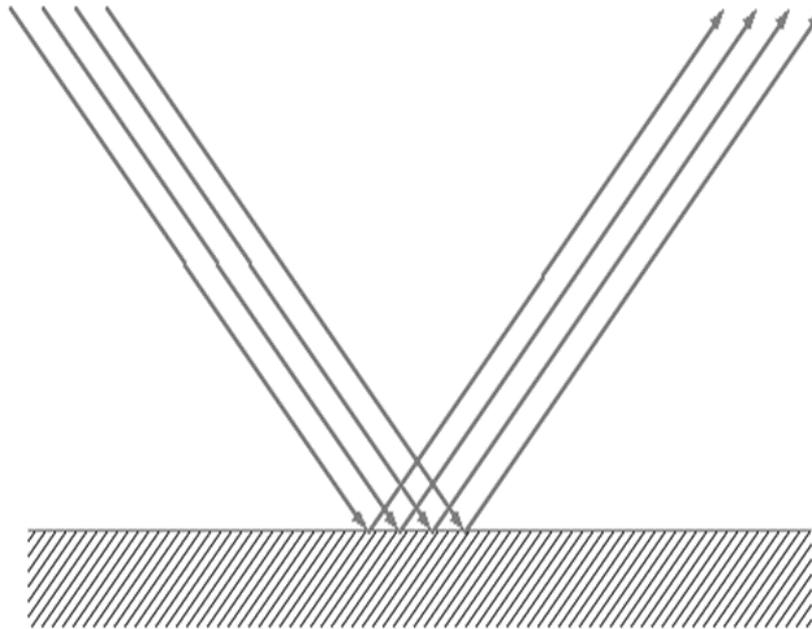


Figure 2.3. La réflexion spéculaire [9].

2.5 Les lois de réflexion

Un rayon lumineux sur une surface réfléchissante sera réfléchi à un angle égal à l'angle d'incidence. Les deux angles sont généralement mesurés par rapport à la normale sur la surface. Cette loi de réflexion peut être dérivée du principe de Fermat (Figure 2.2) [8].

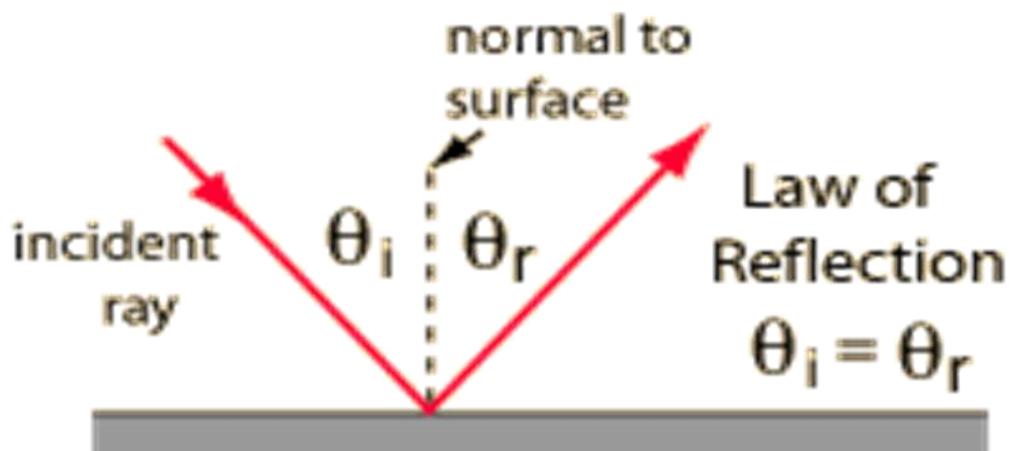


Figure 2.4. La loi de réflexion [8].

2.5.1 Principe de Fermat : Réflexion

La lumière suit le chemin le plus court. La figure 2.5 montre que la ligne droite de A à B est le chemin le plus court. La loi de la réflexion peut être dérivée de ce principe comme suit [8] :

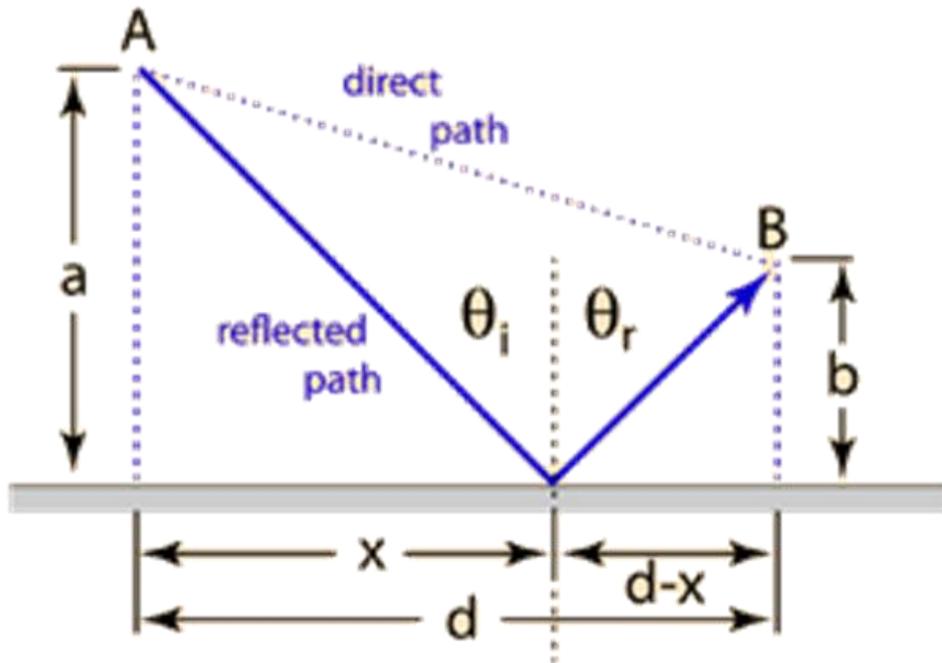


Figure 2.5 : le principe de Fermat [8].

La longueur de trajet de A à B est

$$L = \sqrt{a^2 + x^2} + \sqrt{b^2 + (d - x)^2} \quad 2-1$$

Comme la vitesse est constante, le chemin du temps minimum est simplement le chemin de distance minimum. Cela peut être trouvé en définissant la dérivée de L par rapport à x et qui sont égale à zéro.

$$\frac{dL}{Dx} = \frac{1}{2} \frac{2x}{\sqrt{a^2+x^2}} + \frac{1}{2} \frac{2(d-x)(-1)}{\sqrt{b^2+(d-x)^2}} = 0 \quad 2-2$$

$$\frac{x}{\sqrt{a^2+x^2}} = \frac{(d-x)}{\sqrt{b^2+(d-x)^2}} \quad 2-3$$

Donc

$$\sin \theta_i = \sin \theta_r \quad 2-4$$

$\theta_i = \theta_r$ la loi de réflexion

La loi de Snell peut être dérivée en définissant la dérivée du temps = 0. Nous utilisons l'indice de réfraction, défini comme $n = c / v$ [8].

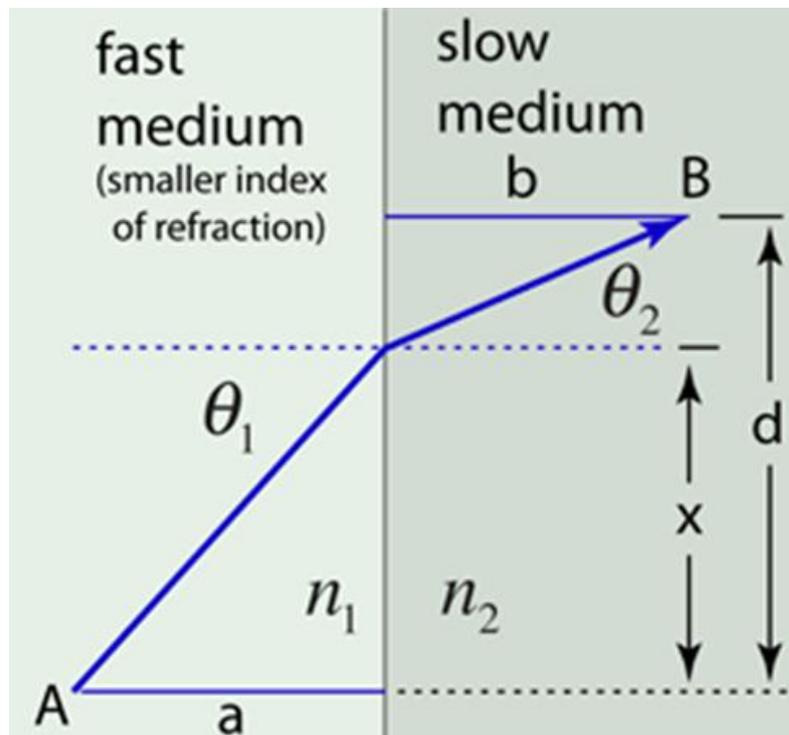


Figure 2.6. Loi de snell Descartes [8].

$$t = \frac{\sqrt{a^2+x^2}}{v} + \frac{\sqrt{b^2+(d-x)^2}}{v'} \quad 2-5$$

$$\frac{dt}{dx} = \frac{x}{v\sqrt{a^2+x^2}} - \frac{(d-x)}{v'\sqrt{b^2+(d-x)^2}} \quad 2-6$$

$$0 = \frac{\sin \theta_1}{v} - \frac{\sin \theta_2}{v'} \quad 2-7$$

$$\text{Avec } v_i = \frac{c}{n_i} \quad 2-8$$

$$\text{Loi de Snell } \frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2}$$

2.6 Principe d'un traitement antireflet

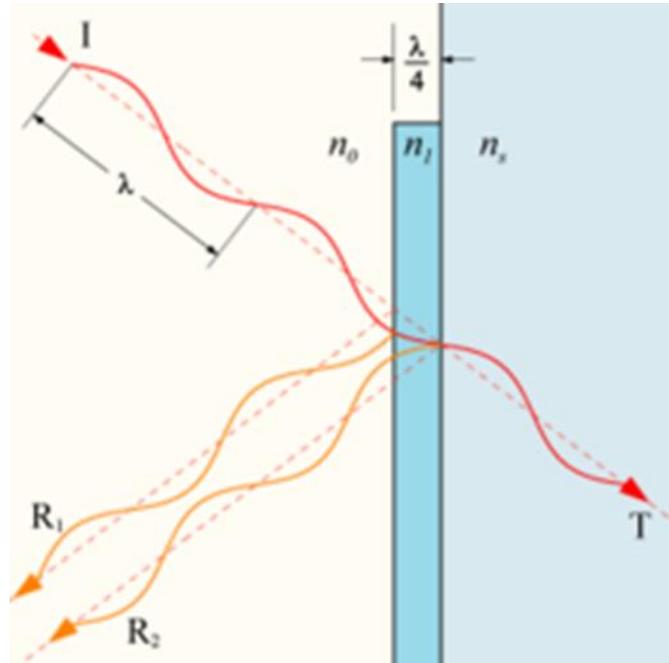


Figure 2.7. le comportement de la lumière [10].

La lumière incidente sur un dioptre subit plusieurs phénomènes divisant l'énergie d'origine en plusieurs parties :

- Absorbée
- Transmise
- Diffusée
- Réfléchie

La distribution de l'énergie dans ces différentes parties dépend essentiellement des caractéristiques du matériau et de la surface, la diffusion dépend ainsi essentiellement de l'état de la surface, on peut déduire la réflectivité d'un matériau d'après son indice de réfraction dans le cas d'une onde transverse électrique on a [10] :

$$r_{TE} = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad 2-9$$

Et pour une onde transverse magnétique :

$$r_{TM} = \frac{n_2 \cos \theta_1 - n_1 \cos \theta_2}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2} \quad 2-10$$

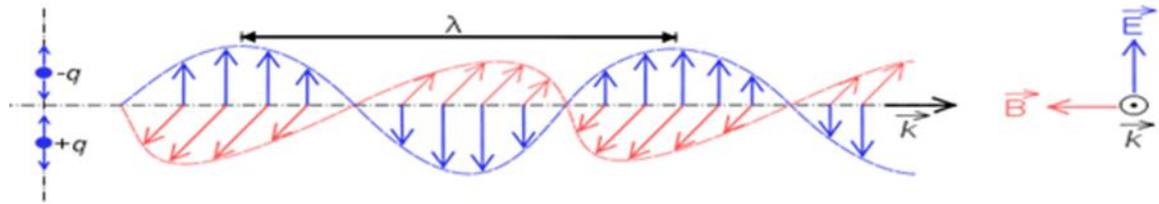


Figure 2.8.représentation des ondes électrique et magnétique [9].

Ou :

r_{TE} Et r_{TM} sont les coefficients de réflexion de Fresnel.

n_1 et n_2 les indices du milieu d'origine d'incidence et de réfraction respectivement.

θ_1 Et θ_2 les angles d'incidence et de réfraction respectivement.

En prenant ces coefficients en compte, dans le cas d'une couche mince déposée entre le milieu incident et le matériau considéré, on observe que pour un angle d'incidence normale [10].

$$R = \frac{(K_1 K_3 - K_2^2)^2 \cos(K_2 a)^2 + K_2^2 (K_3 - K_1)^2 \sin(K_2 a)^2}{(K_1 K_3 + K_2^2)^2 \cos(K_2 a)^2 + K_2^2 (K_3 + K_1)^2 \sin(K_2 a)^2} \quad 2-11$$

Ou :

$$K_i = \frac{2n_i \pi}{\lambda} \quad 2-12$$

Avec a est l'épaisseur de la couche mince

La réflexion ne peut alors s'annuler que si le numérateur de l'équation (2-11) s'annule sachant que les milieux 1 et 3 sont différents, d'où [10] :

$$(K_1 K_3 - K_2^2)^2 \cos(K_2 a)^2 + K_2^2 (K_3 - K_1)^2 \sin(K_2 a)^2 = 0 \quad 2-13$$

$$(K_1 K_3 - K_2^2)^2 \cos(K_2 a)^2 = 0 \quad 2-14$$

$$K_2^2 (K_3 - K_1)^2 \sin(K_2 a)^2 = 0 \quad 2-15$$

$$K_1 K_3 = K_2^2 \quad 2-16$$

$$\sin(K_2 a)^2 = 0 \quad 2-17$$

A partir de l'équation (2-14) on déduit deux conditions de fonctionnement d'un traitement antireflet :

$$n_1 n_3 = n_2^2 \quad 2-18$$

$$\forall p \in \mathbb{N}, \frac{2n_2 \pi}{\lambda} a = p\pi \Leftrightarrow a = \frac{p\lambda}{2n_2} \quad 2-19$$

Un traitement antireflet est un traitement de surface permettant de diminuer la part de la lumière réfléchie et donc augmenter la part de lumière transmise au travers d'un dioptre. Il existe plusieurs méthodes certaines consistent à déposer un assemblage lamellaire de matériaux diélectrique en surface, alors que d'autres consistent à effectuer une corrugation de la surface du matériaux. Ces techniques visent à diminuer voir annuler le coefficient de réflexion de la lumière sur un spectre donné de longueur d'onde [11].

La réduction du coefficient de réflexion est aujourd'hui une manière importante d'améliorer les performances des cellules solaires. Pour cet effet on a déjà développé des revêtements antireflets. Etant donné que divers encapsulant ont un indice de réfraction aux alentours de 1.4 – 1.5 alors que l'indice de réfraction correspondant du silicium vaut 3.87, les pertes par réflexion peuvent être très facilement réduite par un revêtement antireflet dont l'indice de réfraction se situe entre 1.5- 3.87 [12].

2.7 Principe d'une couche antireflet

Un revêtement antireflet est un ensemble de films minces et transparents appliqués à la surface d'un dispositif optique pour réduire la réflexion. Cette réduction de la lumière réfléchie entraîne une augmentation de l'efficacité du système optique et minimise la lumière parasite. L'exemple le plus simple d'un revêtement antireflet est une couche d'une demi-longueur d'onde, un film diélectrique unique avec une épaisseur égale à un quart de la longueur d'onde de la lumière incidente. Cette couche peut réduire le coefficient de réflexion à zéro si l'indice de réfraction du film est égal à la moyenne géométrique des indices de réfraction de l'air (n_0) et du substrat (n_S). Pour l'air (1,0) et le substrat de verre commun (1,5), cet indice de réfraction optimal serait la racine carrée de ((1,0) (1,5)) ou environ 1,22.

Typiquement, aucun matériau n'existe avec un indice de réfraction qui donne un coefficient de réflexion exactement nul. Le fonctionnement des couches antireflet repose sur l'adaptation de l'indice de réfraction de la couche de façon à produire des interférences destructives à une certaine longueur d'onde en tenant compte de l'épaisseur de la couche. Le matériaux utilisé comme couche antireflet doit être non absorbant dans la gamme du spectre solaire [3].

On considère une couche fine antireflet d'épaisseur d et d'indice de réfraction n_2 . Cette dernière est située entre l'air d'indice de réfraction n_1 et un substrat d'indice $n_3 > n_2$

L'onde lumineuse frappe la surface de la couche antireflet, présenté sur la figure suivante [13].

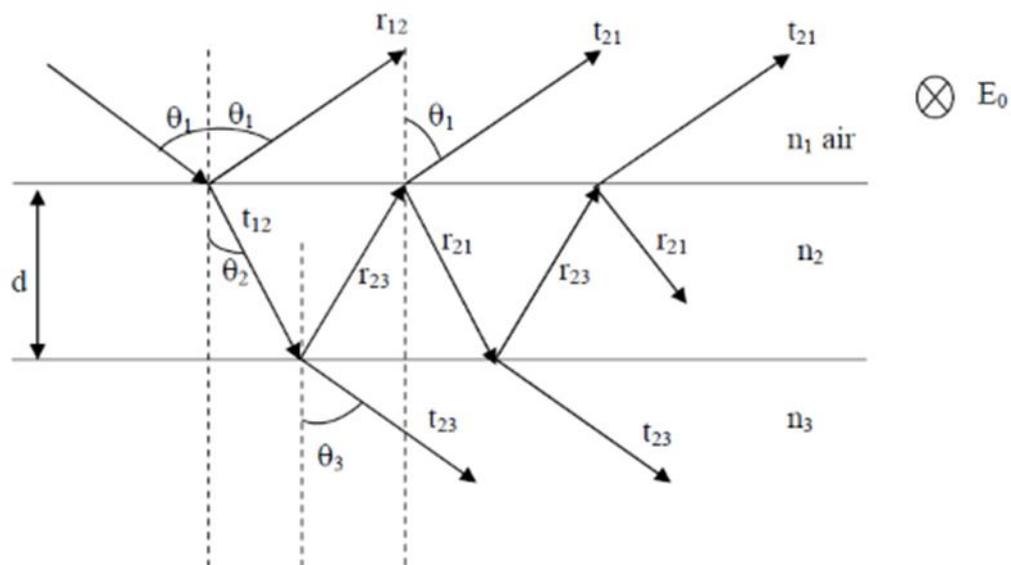


Figure 2.9. rayonnements incidents, réfléchis et transmis entre trois milieux d'indices de réfraction différents [13].

Les coefficients de réflexion et de transmission entre les différents milieux s'exprimeront selon les équations suivantes [13] :

$$r_{12} = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad 2.20$$

$$r_{21} = \frac{n_2 \cos \theta_2 - n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} = -r_{12} \quad 2.21$$

$$r_{23} = \frac{n_2 \cos \theta_2 - n_3 \cos \theta_3}{n_2 \cos \theta_2 + n_3 \cos \theta_3} \quad 2.22$$

$$t_{12} = \frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad 2.23$$

$$t_{21} = \frac{2n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad 2.24$$

$$t_{23} = \frac{2n_2 \cos \theta_2}{n_3 \cos \theta_3 + n_2 \cos \theta_3} \quad 2.25$$

2.8 Les différents types de revêtement d'antireflets

2.8.1 Monocouche

Un revêtement monocouche est une structure composée d'une seule couche qui peut empêcher la réflexion de la lumière à une fréquence considérée et elle reflète une quantité substantielle de rayonnement à toute autre fréquence.

Les traitements antireflet les plus simples sont des traitements constitués d'une seule couche de matériaux déposés à l'interface entre deux milieux, d'épaisseur $\lambda/4$ et d'indice le plus proche possible de la moyenne géométrique des indices des deux milieux. Dans le cas d'un traitement monocouche, la longueur d'onde sélectionnée est $\lambda=500\text{nm}$ est la longueur d'onde la plus sensible pour l'œil humain. Le revêtement devient ainsi efficace pour les longueurs d'onde du visible proche de cette valeur et perd de son utilité au fur et à mesure que l'on s'éloigne de cette valeur c'est pour cette raison que nous pouvons observer une coloration violette ou vert sur les lentilles traitées de la sorte [3].

Un revêtement antireflet monocouche est habituellement fait de dioxyde de titane, de dioxyde de silicium ou de nitrure de silicium, mais d'autres matériaux sont également utilisés dans les cellules solaires, un tel revêtement permet une réduction importante des pertes par réflexion autour de la longueur d'onde spécifique pour laquelle le revêtement a été conçu [14].

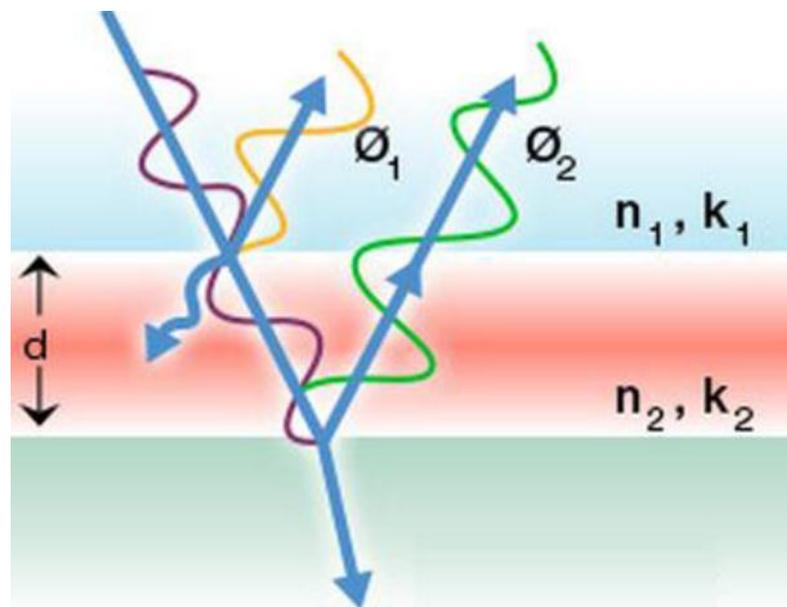


Figure 2.10 : Comportement de la lumière sur revêtement simple couche antireflet [1].

La forme la plus simple d'une couche antireflet est une couche unique. Dans la **figure 2.8**, nous avons un diagramme vectoriel entre deux interfaces, chaque vecteur représente l'amplitude de coefficient de réflexion sur une interface. Si le milieu incident est de l'air et l'indice de la couche antireflet est inférieur à l'indice de substrat, le coefficient de réflexion au niveau de chaque interface sera négatif, on note un changement de phase de 180° [1].

2.8.2 Multicouche

Des revêtements antireflet à double couches utilisent une combinaison de matériaux pour améliorer le facteur de conversion des cellules solaires en diminuant la quantité du rayonnement solaire réfléchi par la surface d'entrée d'une telle cellule.

Les traitements antireflet multicouche permettent justement d'éviter la perte des propriétés antireflet au voisinage des longueurs d'onde proche des infrarouges ($\lambda > 800\text{nm}$) et des UV ($\lambda < 400\text{nm}$) en effet, c'est l'alternance de couches d'épaisseur et d'indice différents qui va permettre d'étaler les propriétés d'antireflet sur toute la gamme du visible [14].

2.9 La différence entre monocouche et multicouche

On utilise, de préférence un revêtement constitué de plusieurs couches. Par rapport aux revêtements monocouche, un revêtement multicouche est plus susceptible de réduire le coefficient de réflexion à travers une bande de longueurs d'onde plus large et peut être produit en utilisant une plus grande variété de matériaux réels. Des structures plus complexes (multicouche) permettent de réduire le facteur de réflexion à moins de 1% dans une gamme considérable de longueur d'onde, malheureusement cela n'est pas sans inconvénient. En effet, l'augmentation du nombre de couches rend plus long et plus délicat le cycle de production, sans oublier l'augmentation considérable du prix de revient [3].

2.10 Pourquoi on fait un revêtement Multicouche

Les revêtements antireflets simples sont conçus pour minimiser la réflexion autour d'une longueur d'onde de vide spécifiée, λ_0 . Des revêtements plus sophistiqués peuvent minimiser la réflectance à travers une bande relativement large de longueurs d'onde en employant de multiples films minces avec différentes propriétés du matériau.

Le revêtement multicouche le plus simple consiste en deux couches d'indice de réfraction différent appliquées sur un substrat en verre. Chaque couche a une épaisseur optique réglée à 1/4 de celle de la longueur d'onde de vide spécifiée ; Par conséquent, cette conception s'appelle un quart de quart de revêtement.

Théoriquement, un quart de quart de revêtement peut réduire la réflectance à zéro à la longueur d'onde spécifiée ; Cependant, parce que les matériaux réels avec des indices de réfraction idéaux sont rarement disponibles, la réflectance nulle n'est normalement pas atteinte.

Si le substrat est constitué de verre ($n_s = 1,5$), et (n_a) représente l'indice de réfraction de l'air, la première couche est constituée de fluorure de magnésium, MgF2 ($n_1 = 1,38$), l'expression suivante peut être utilisée pour déterminer l'indice de réfraction optimal pour la deuxième couche n_2 , de sorte que la réflexion puisse être réduite à zéro [3] :

$$n_2 = \sqrt{\frac{n_1^2 n_s}{n_a}}$$

2.11 Définition du modèle

Dans ce sous paragraphe on va exposer le modèle et les étapes, les plus importantes, permettant d'aboutir à certains résultats énoncés théoriquement. Ce sous paragraphe nous permet de maintenir le lien théorique –simulation. Le logiciel comsol version 5.2 a été utilisé dans le cadre de ce travail.

2.11.1 Les matériaux utilisés dans notre modèle

Name	Expression	Value	Description
n_air	1	1	Refractive index for air
n_glass	1.5	1.5	Refractive index for glass
n_CeF3	1.63	1.63	Refractive index for CeF3
n_MgF2	1.38	1.38	Refractive index for MgF2
n_ZrO2	2.2	2.2	Refractive index for ZrO2
lam0	550[nm]	5.5E-7 m	Vacuum wavelength

Tableau 2.1. L'indice de réfraction des matériaux.

Le tableau 2.1 contient les indices de réfraction des matériaux utilisés comme multicouche. Les matériaux disposés successivement sont le CeF3, le MgF2, le ZrO2 et le glass (substrat), l'air étant la partie supérieure de tout cet ensemble.

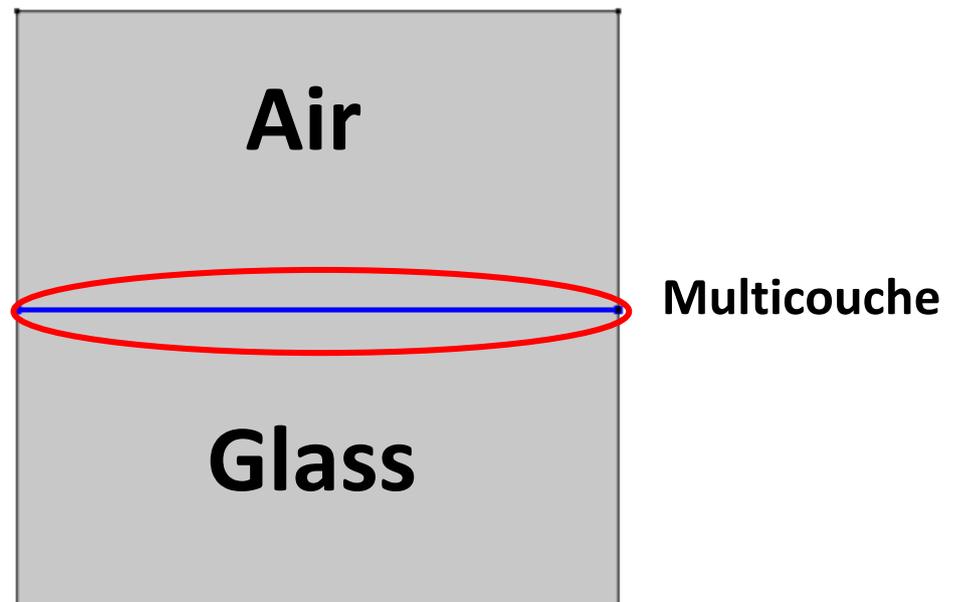
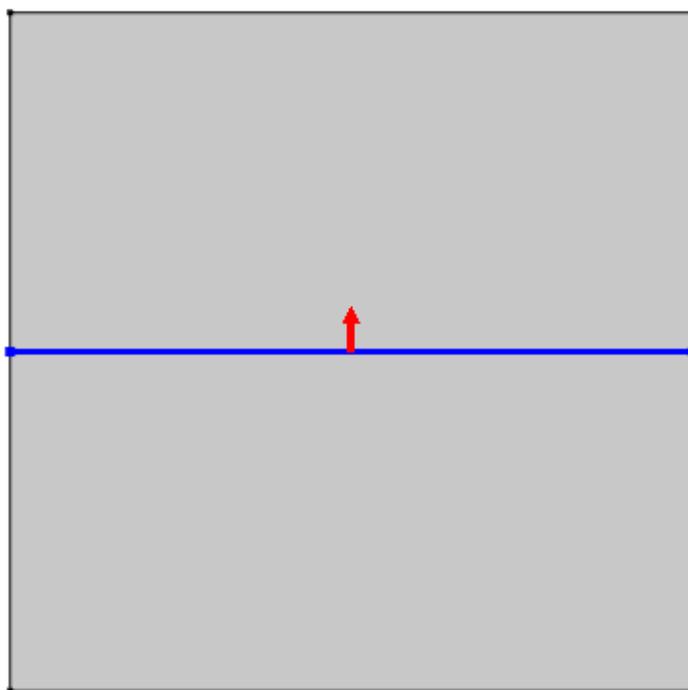


Figure 2.11. modèle géométrique du modèle comsol.

Le modèle est construit comme étant une boîte avec une limite interne séparant les domaines de l'air et du substrat. Cette limite est également l'endroit où les caractéristiques du film diélectrique mince sont ajoutées. La flèche rouge (figure 2.12) montre le sens dans lequel les couches diélectriques fines sont empilées [6] :



*Figure 2.12.*L'emplacement des couches minces.

2.11.2 Les équations de discontinuité

Lors de l'utilisation du logiciel comsol 5.2 il est nécessaire, une fois la géométrie du modèle spécifiée, d'introduire le type de théorie régissant le fonctionnement du modèle .dans le cadre de notre travail et en plus de la théorie optique géométrique il convient d'indiquer l'existence d'une discontinuité entre l'air et le substrat (glass), qui permet d'obtenir les équations de discontinuité (**figure 2.13**).Ces équations régissent les lois de diffusion optique.

Equation

Show equation assuming:

Study 1, Ray Tracing

$$\mathbf{n}_r = \mathbf{n}_i - 2 \cos(\theta_i) \mathbf{n}_s$$

$$\mathbf{n}_t = \eta \mathbf{n}_i + \gamma \mathbf{n}_s$$

$$\eta = \frac{n_1}{n_2} \quad \gamma = -\eta \cos(\theta_i) + \cos(\theta_t)$$

$$r_{\parallel} = \frac{n_2 \cos(\theta_i) - n_1 \cos(\theta_t)}{n_2 \cos(\theta_i) + n_1 \cos(\theta_t)}$$

$$r_{\perp} = \frac{n_1 \cos(\theta_i) - n_2 \cos(\theta_t)}{n_1 \cos(\theta_i) + n_2 \cos(\theta_t)}$$

$$r_{\parallel} = \frac{2n_1 \cos(\theta_i)}{n_2 \cos(\theta_i) + n_1 \cos(\theta_t)}$$

$$r_{\perp} = \frac{2n_1 \cos(\theta_i)}{n_1 \cos(\theta_i) + n_2 \cos(\theta_t)}$$

$$k_{u,r} = k_{u,i} - 2k_{u,s} \cos(\theta_i)$$

$$k_{u,t} = \eta k_{u,i} + \gamma k_{u,s}$$

Figure 2.13. Équations de discontinuité.

2.11.3 Matériaux de discontinuité

La discontinuité consiste à introduire comme données, pour le logiciel, les indices de réflexions des matériaux et leur épaisseur. A titre d'exemple les figures 2.14 et 2.15 définissent une discontinuité a deux couches formées par le CeF3 et le MgF2.

L'épaisseur (tickness en langue anglaise) est égale au quart ($\lambda/4$) de la longueur d'onde utilisée ($\lambda_0=550\text{nm}$, longueur d'onde de vide).

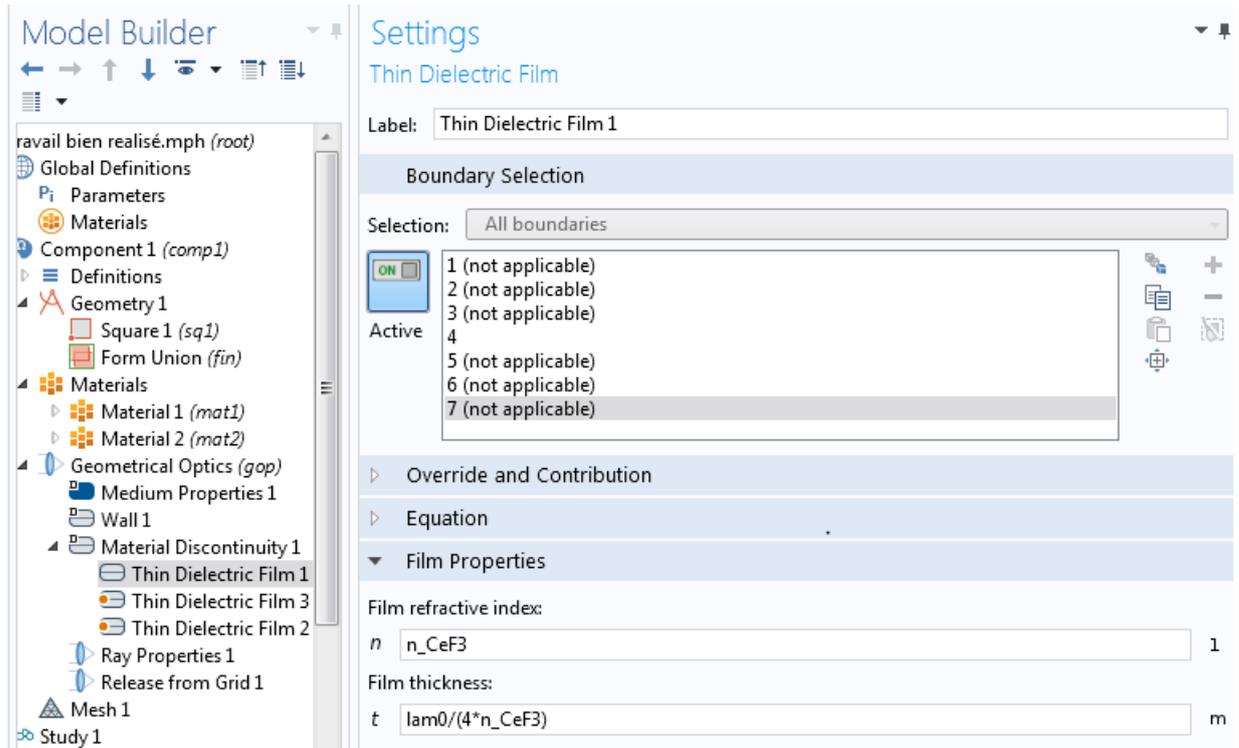


Figure 2.14. Discontinuité formée par le matériau CeF3 comme première couche.

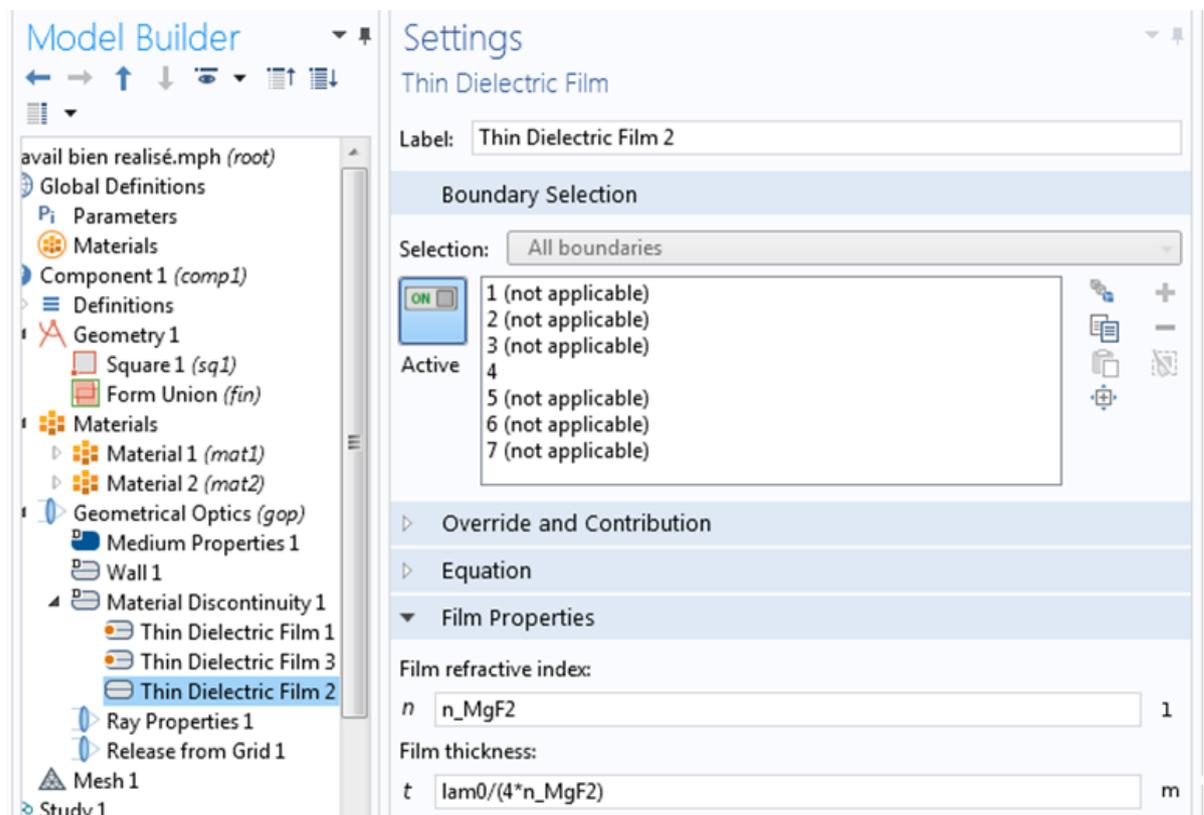


Figure 2.15. Discontinuité formée par le matériau MgF2 comme deuxième couche.

Dans le cas de ce type de discontinuité, on obtient une variation de la Réfexion (en %) en fonction d'une gamme de longueur d'onde [400nm, 800nm] comme indiquer sur la figure 2.16.

Un inconvénient notable du revêtement à deux couches est que la réflexion n'est réduite de manière significative que dans une bande étroite autour d'une seule longueur d'onde [6].

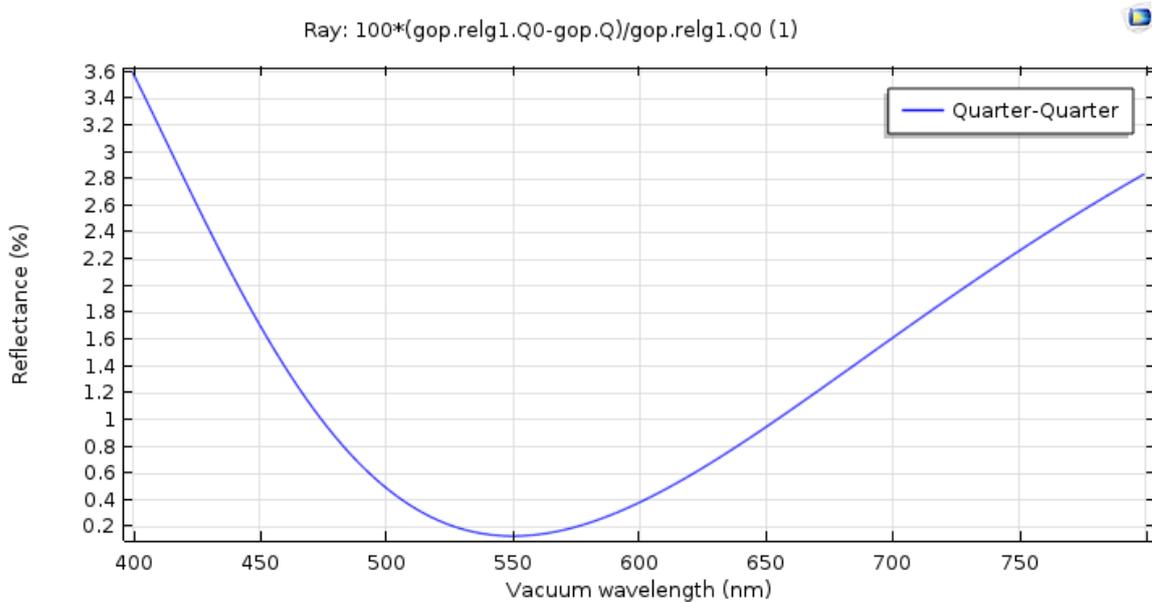


Figure 2.16. Reflexion en fonction de λ_0 pour une épaisseur de couche $(\frac{\lambda_0}{4})$.

La réflexion peut être réduite sur une large gamme de longueurs d'onde en utilisant un film diélectrique avec trois couches ou plus. Un exemple d'un revêtement à trois couches est le Quart-quart de revêtement, dans lequel une mince couche d'épaisseur optique $\lambda / 2$ est placée entre les deux couches de quart de longueur d'onde (Figure 2.17) [6].

Dans le cas de cet exemple, Il apparait (Figure 2.18) que la réflexion est aussi réduite dans la gamme approximative de [470nm, 650nm].

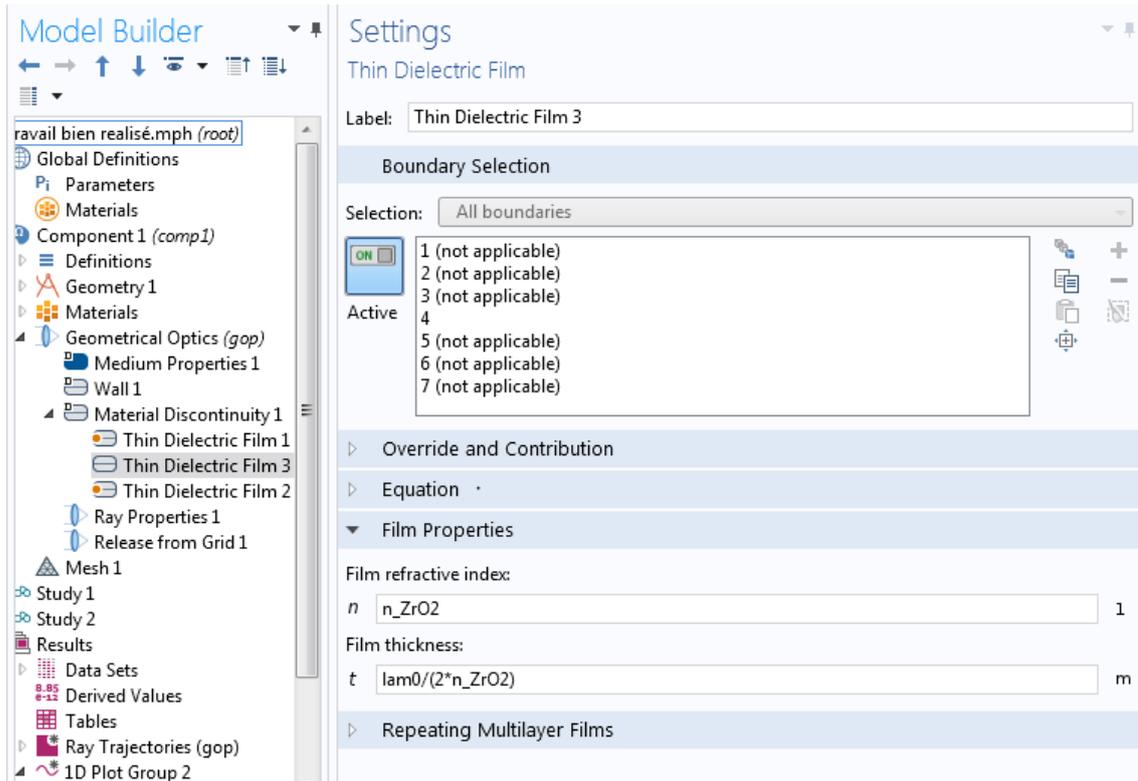


Figure 2.17 .Discontinuité formée par une couche intermédiaire d'épaisseur $\frac{\lambda_0}{2}$.

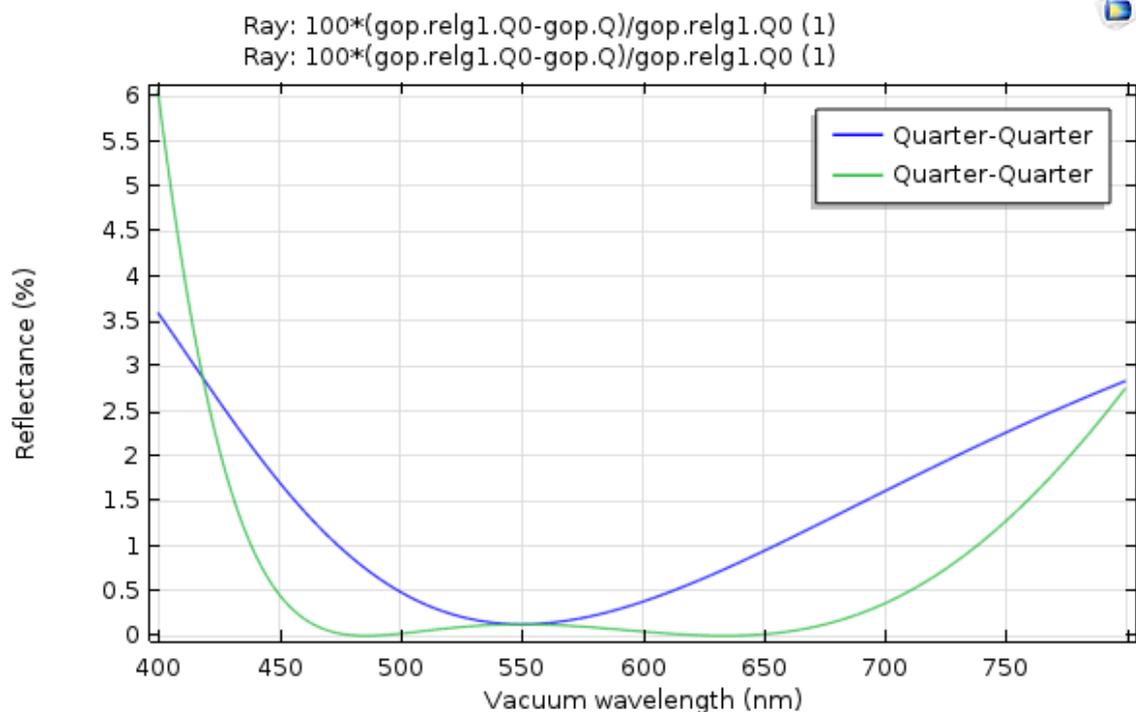


Figure 2.18. Réponse de réflectance pour un quart de quart et quart de quart de revêtement.

La **figure 2.18** Compare la réflectance des films du trimestre et du quart de trimestre.

Du fait que les indices de réfraction des matériaux réels sont utilisés. Le quart de quart de film montre une réflectance légèrement plus élevée au centre de la bande, mais la réflectance est réduite sur une gamme de fréquences beaucoup plus large [6].

2.12 Conclusion

Les couches minces à propriétés optiques se trouvent aujourd'hui utilisées dans de très nombreux dispositifs optiques et Dans ce chapitre nous avons présenté le model de la cellule solaire à base des couche mince avec Manipulation sur la lumière en jouant sur les propriétés de réfraction et de réflexion des matériaux dans le domaine optique pour la réalisation des couches réflectrices, antireflets, aussi nous avons constaté que les performances de la cellules solaire dépend de plusieurs paramètre comme l'épaisseur des couches , le nombre des couches et l'indice de réfraction qui influe sur le coefficient de réflexion mais malheureusement y'a pas de matériau qui donne un coefficient de réflexion nulle .

L'utilisation des épaisseurs optiques que ce soit des multiples des $\lambda_0/2$, $\lambda_0/4$ donnent une réflectivité minimum et une transmission maximum que pour la longueur d'onde λ_0 , Pour cela, et pour une utilisation sur des gammes de spectre de longueur d'onde important, une réflectivité moyenne et une transmission moyenne sont calculés sur toute cette gamme, ce qui nous donnent le droit de varier l'épaisseur des couche librement.

Chapitre 3 Résultat et discussion

3.1 Introduction

Après avoir simulé des couches antireflets selon un modèle de référence, nous avons cherché à améliorer ces structures selon deux axes principaux. Le premier concerne le coefficient de réflexion tandis que le second axe consiste en la formation d'un réflecteur en face arrière des cellules solaires. Ces axes de recherches ont été choisis d'une part parce qu'ils sont propres à la nature de cellules de type couches minces de silicium cristallin, d'autre part parce qu'ils sont tous compatibles entre eux, si bien qu'il est possible d'appliquer toutes les améliorations à la fois sur une même structure.

3.2 Réflectance minimale

Pour avoir une absorption totale des rayons lumineux nous allons modifier plusieurs paramètres tel que l'épaisseur des couches minces et l'ordre des matériaux. On simulera en premier lieu avec les matériaux de notre modèle de référence en utilisant la combinaison de matériaux $\text{CeF}_3, \text{MgF}_2, \text{ZrO}_2$ puis d'autres matériaux tel que le ITO, le a-si , le ZnO.

3.2.1 L'emplacement des couches antireflet

Dans cette partie du travail, on va simuler la réflectivité en fonction de la longueur d'onde, en modifiant la position d'emplacement des matériaux utilisés dans notre modèle de base (CeF₃, MgF₂, ZrO₂).

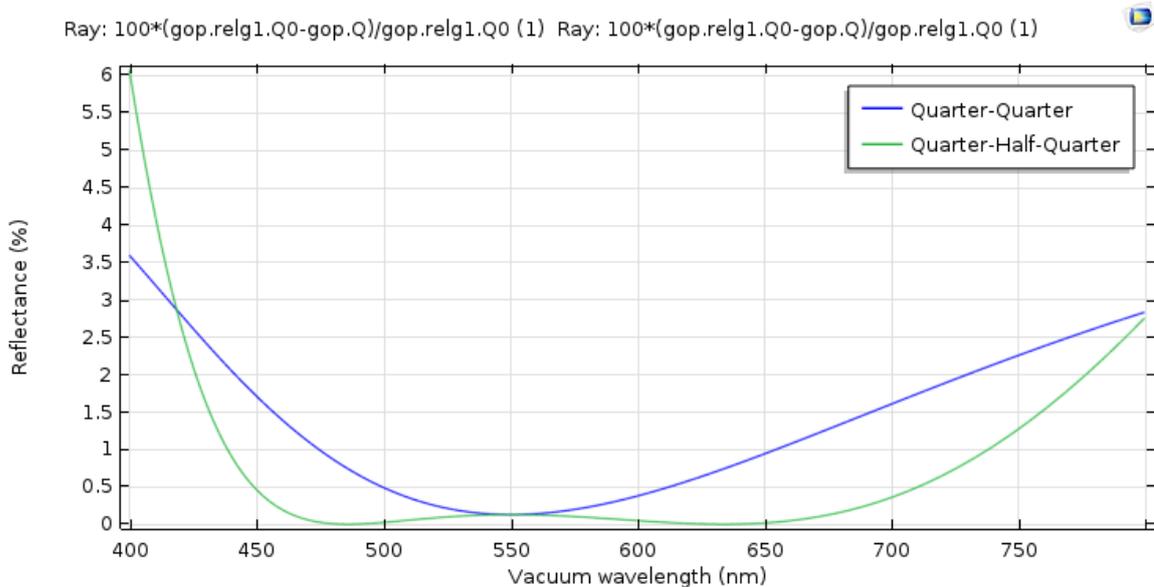


Figure 3.1 .La variation de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde.

On constate d'après la figure 3.1 que la position d'emplacement des couches minces n'a pas d'importance car on obtient les mêmes résultats pour les différentes positions des matériaux.

3.2.2 Modification de l'épaisseur

a Couches d'épaisseurs successives, $\lambda_0/2$, $\lambda_0/4$, $\lambda_0/2$

De manière à minimiser d'avantage les pertes optiques, nous avons cherché d'autres solutions comme l'effet de l'épaisseur ainsi que les meilleures combinaisons des multicouches antireflets (MCAR), composées d'un empilement de plusieurs couches d'indice optique variable, permettant de réduire d'avantage la réflectivité et d'augmenter ainsi la transmission.

On a modifié les épaisseurs des couches en commençant par utiliser des épaisseurs optiques de $\lambda_0/2$ sur la première et la troisième couche et $\lambda_0/4$ pour la couche qui

sépare ces deux dernières. Les résultats obtenus sont présentés sur la **figure 3.2**, suivante :

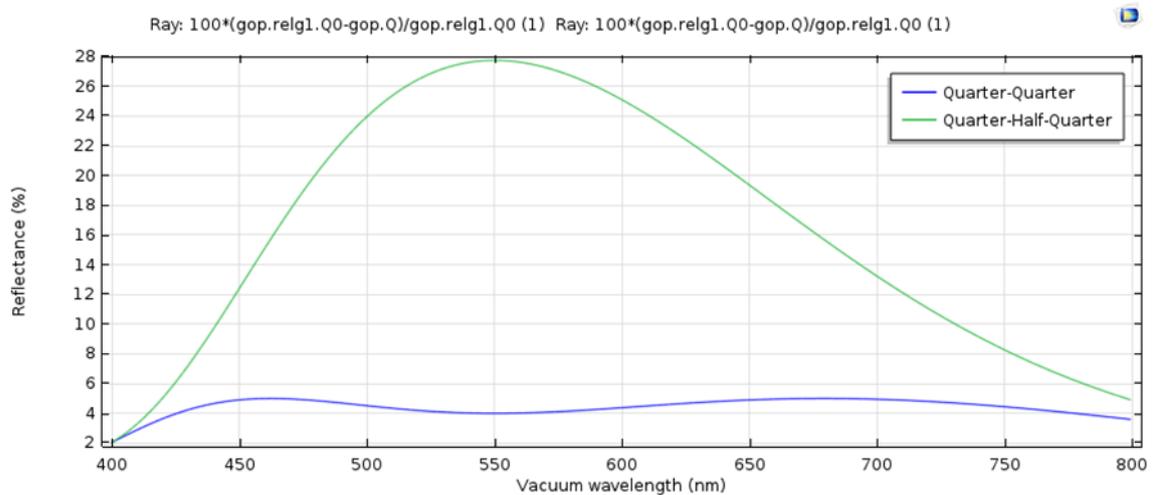


Figure 3.2 .La réponse de la réflectivité en fonction de longueur d'onde.

On constate que la réflectance minima (2%) est atteinte pour un empilement Q-H-Q pour $\lambda=400\text{nm}$ et varie entre 4% et 5% dans la gamme 450 nm à 800 nm. Ce résultat est une amélioration par rapport aux résultats précédents ou on a constaté une variation élevée de 0.2% à 3.5%, pour la même gamme des longueurs d'onde. Par contre l'empilement Q-Q est un empilement caractérisé par des variations importantes, allant jusqu'à 28% pour la longueur d'onde de 550 nm.

b Couches d'épaisseurs successives $\lambda/2$, $\lambda/2$, $\lambda/2$

Les matériaux utilisés passe dont tous la même épaisseur égale à $\lambda/2$. Ce cas de conception entraîne la variation de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde comme indiqué sur la **figure 3.3**.

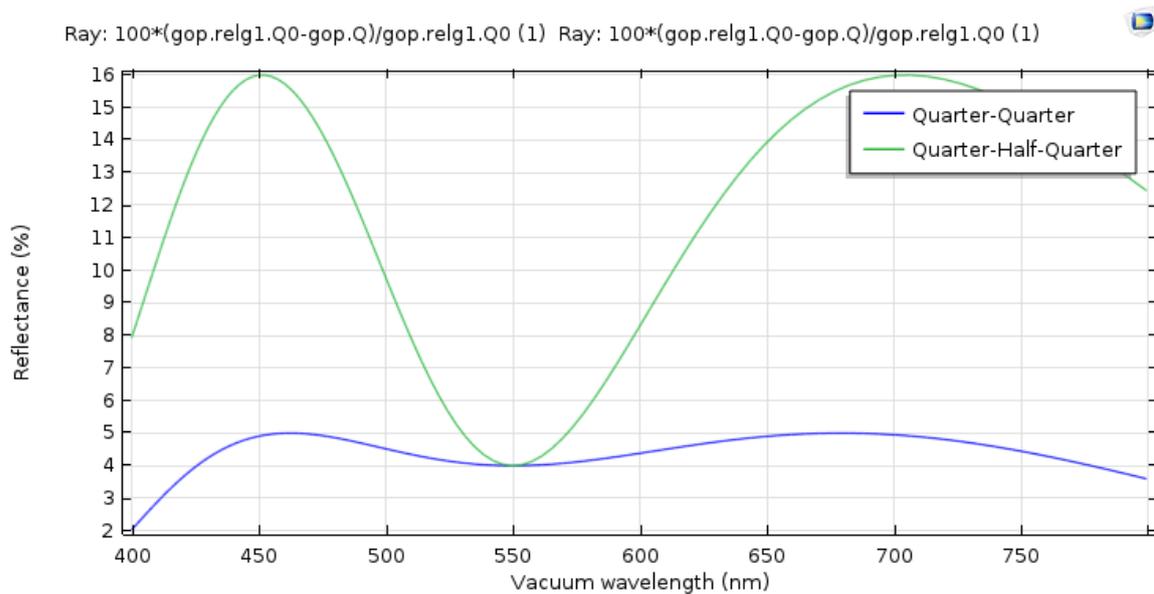


Figure 3.3. La réponse de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde.

Lorsqu'on utilise une combinaison de matériaux avec des épaisseurs optique $\lambda_0/2$ (quarter-half-quarter) on peut minimiser la réflectivité jusqu'à 2% pour $\lambda=400\text{nm}$ et comme maximum des pertes par réflexion environ 16% lorsque on compare cette résultat avec la **figure 3.2** on trouve que avec le quarter half quarter pour tous les couche on peut minimiser la réflectivité de 28 % jusqu'à 16%.

c Couches d'épaisseurs successives $\lambda_0/4$, $\lambda_0/4$, $\lambda_0/4$

Dans cette partie on a simulé en utilisant une épaisseur optique de $\lambda_0/4$ (quarter-quarter) pour toutes les couches de notre structure. Les résultats sont présentés sur la figure 3.4

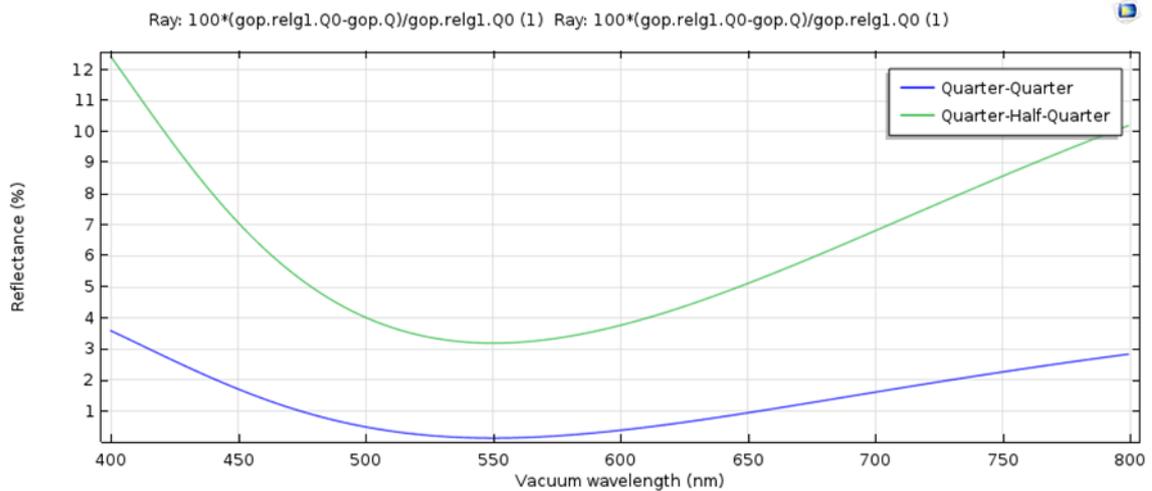


Figure 3.4. La réponse de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde pour le quarter quarter.

Lorsqu'on utilise une combinaison de matériaux avec des épaisseurs optique $\lambda/4$ (**figure 3.4**) on arrive à minimiser la réflectance jusqu'à atteindre une valeur au-dessus de 1% autour d'une longueur d'onde spécifique (550 nm) et comme maximum des pertes par réflectance environ 12% lorsque on compare ce résultat avec celui de la **figure 3.3**. On trouve qu'avec le Q-Q pour toutes les couches on peut minimiser la réflectance de 16% jusqu'à 12%, donc on constate que l'épaisseur des couches joue un rôle très important et les meilleurs résultats de réflectance sont pour des épaisseurs très "petites".

3.2.3 L'organisation des matériaux

On va simuler en modifiant l'ordre d'empilement des couches pour voir l'effet de cet ordre sur la réflectivité, l'empilement des matériaux utilisé est comme suit : CeF_3 , ZrO_2 , MgF_2 .

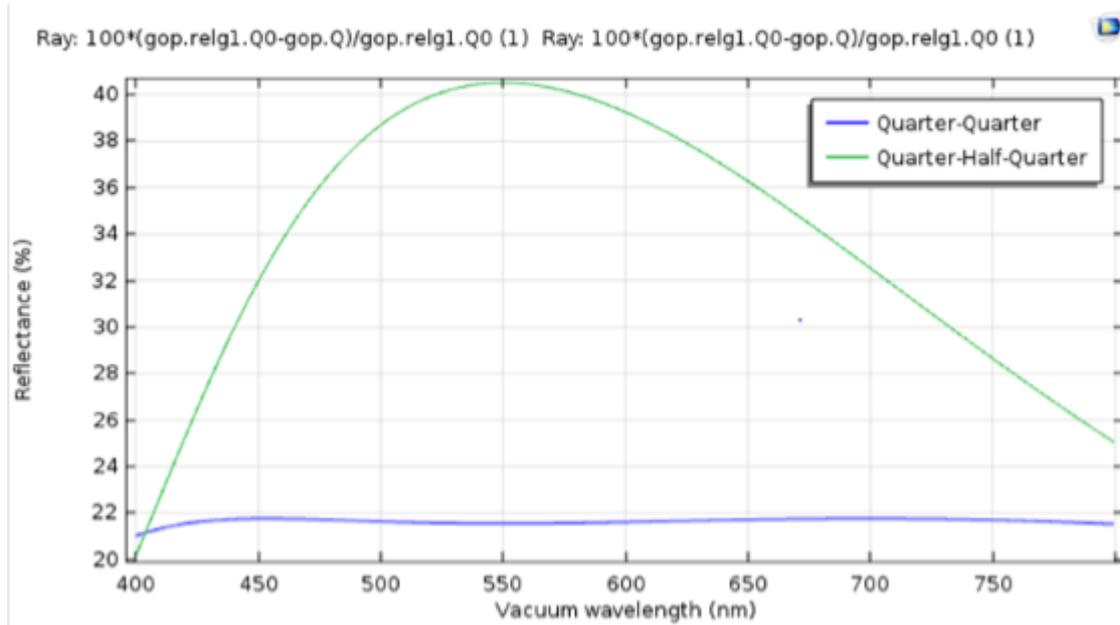


Figure 3.5 : La réponse de la réflectivité pour un empilement CeF3-ZrO2,-MgF2.

A partir de la **figure 3.5** on constate que la combinaison de matériaux n'est pas "améliorante" car elle nous donne une réflectance environ 20% avec des grandes pertes, sur toute la gamme des longueurs d'onde, qui atteint 40%. Le potentiel de réduction de la réflectivité est relativement important comme le montre les résultats.

3.3 Simulation des couches antireflet

3.3.1 Simulation Monocouche (SCAR)

Dans cette partie de simulation ,nous allons utiliser une seule couche .Nous allons utiliser une seule couche .nous allons faire varier l'indice de refraction ,qui est une des proprietes optique,en utilisant a chaque fois un matériau different.

L'objectif etant d'avoir une reflectivite minima .Le substrat utilisé dans ce cas là, reste le verre d'indice de réfraction $n_s = 1.5$.

a Simple couche antireflet (SCAR) basée sur le matériau CeF3

Les caractéristiques physiques de ce matériau sont :

- ✓ indice de réfraction $n_c = 1.63$.

- ✓ épaisseur du matériau $\lambda/4$

Le résultat obtenu est définissant la variation de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde apparait sur **la figure 3.6**.

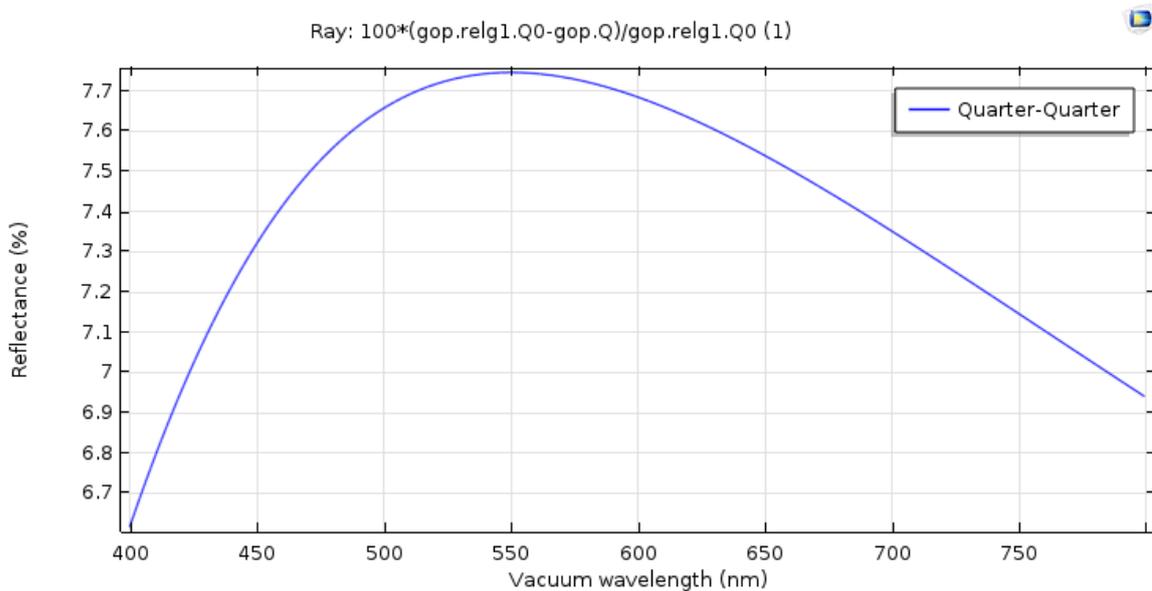


Figure 3.6. La réponse de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde pour une monocouche antireflet CeF_3 .

Ce résultat est valable pour une longueur d'onde spécifique dont la valeur vaut 400 nm. Néanmoins la réflectivité n'excède pas 8% dans toute la gamme 400 à 800 nm.

b Simple couche antireflets (SCAR), basée sur le matériau MgF_2

Les caractéristiques physiques de ce matériau sont :

- ✓ indice de réfraction $n_c=1.38$.
- ✓ épaisseur du matériau $\lambda/4$

Le résultat obtenue est définissant la variation de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde apparait sur **la figure 3.7**.

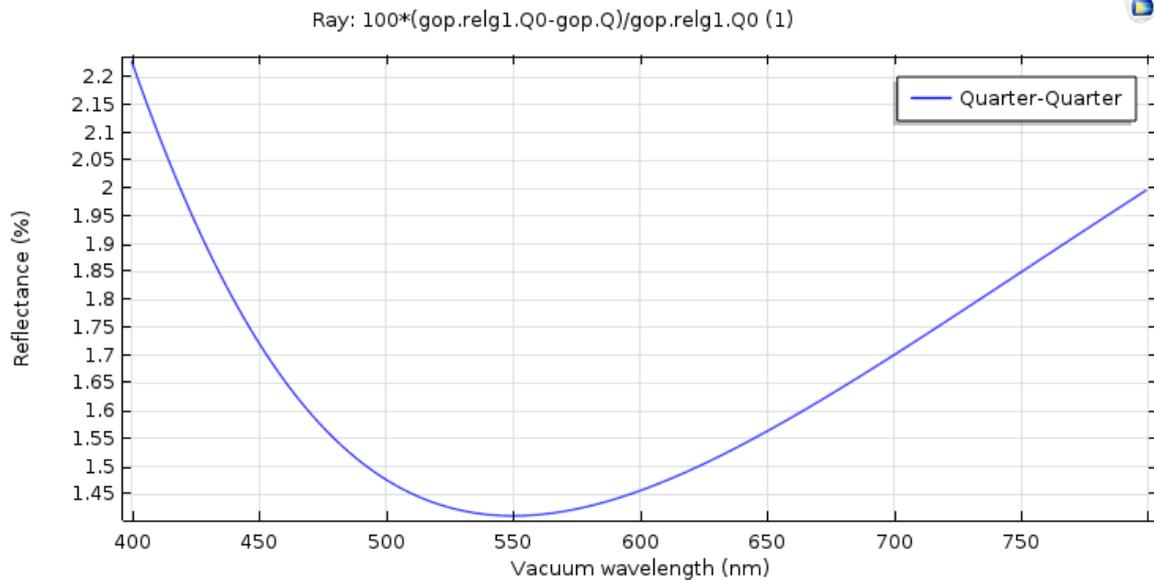


Figure 3.7. La réponse de la réflectivité en fonction de la longueur d’onde pour monocouche antireflet MgF2.

Lorsque on dépose une SCAR d’indice de réfraction $n_c = 1.38$ avec une épaisseur de $\lambda/4$ sur un substrat de glass avec un indice de réfraction $n_s = 1.5$, on constate d’après la **figure 3.7** que le MgF2 nous a permet de diminuer la réflectance environ 1.4% autour d’une longueur d’onde spécifique 550nm.les simulation de réflectivité sont tout à fait satisfaisantes par rapport aux résultats précédents.

c Simple couche antireflets (SCAR), basée sur le matériau ZrO2

Les caractéristiques physiques de ce matériau sont :

- ✓ indice de réfraction $n_c = 2.2$.
- ✓ épaisseur du matériau $\lambda/4$

Le résultat obtenue est définissant la variation de la réflectivité en fonction de la longueur d’onde apparait sur **la figure 3.8**.

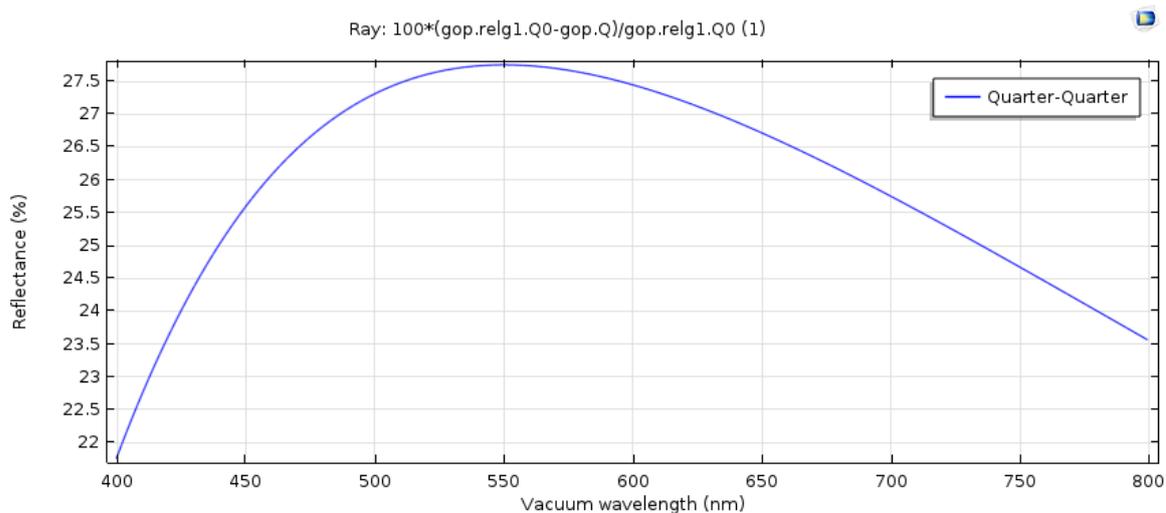


Figure 3.8. La réponse de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde pour une monocouche antireflet ZrO₂.

On remarque que des pertes par réflexion sont importantes environ 27%, car l'indice optique de la SCAR nc est important.

3.3.2 Simulation double couche (DCAR)

a DCAR avec épaisseur commune $\frac{\lambda_0}{4}$

Pour chercher la meilleure configuration de la DCAR (double couche antireflet), nous avons fait varier l'épaisseur des couches en déposant deux couches antireflets MgF₂ puis CeF₃ d'indice de réfraction $n_c=1.38$ et $n_c=1.63$ respectivement déposés sur un substrat de glass d'indice de réfraction $n_s=1.5$ pour avoir le minimum de réflexion. Les résultats obtenus pour une épaisseur commune de $\frac{\lambda_0}{4}$, sont représentés sur la figure 3.9.

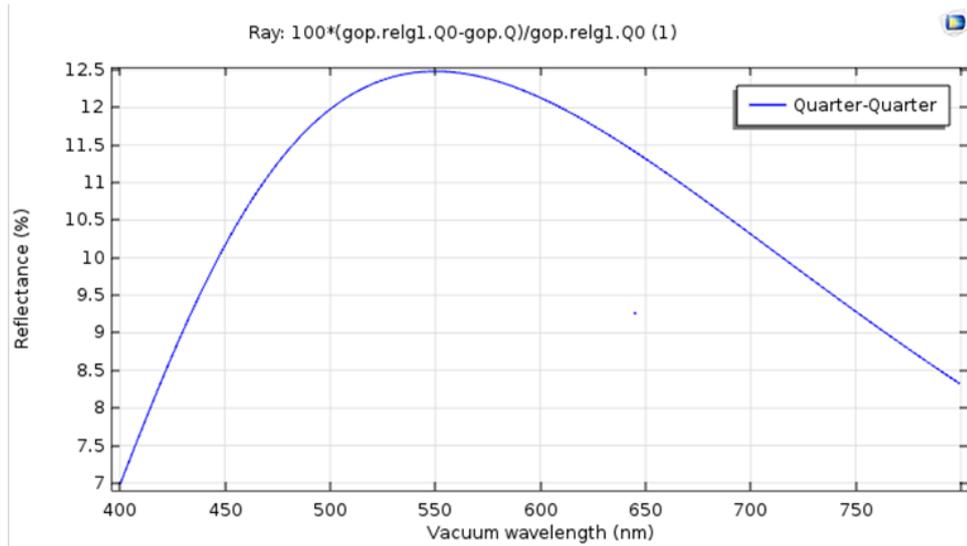


Figure 3.9. la variation de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde avec une épaisseur quarter -quarter ($\lambda/4$).

Pour combiner entre la minimisation de la réflectivité et une bonne passivation en surface, une première approche est le dépôt d'une double couche antireflet (DCAR), composé de deux matériaux avec des indices optiques différents. L'indice de la couche inférieure relativement grand pour permettre la passivation en surface de la cellule et l'indice de réfraction de la couche supérieure petit, pour réduire au minimum la réflectivité. On constate d'après la **figure 3.9** que la réflectivité pour une épaisseur de $\lambda/4$ est environ 12.5% comme maximum lorsque $\lambda=550\text{nm}$.

b (DCAR) avec épaisseur différentes

Nous avons déposé deux couches avec différents indices et différentes épaisseurs. La couche supérieure est formée par le MgF2 avec une épaisseur de $\lambda/4$, et la couche inférieure formée par le CeF3 avec une épaisseur de $\lambda/2$:

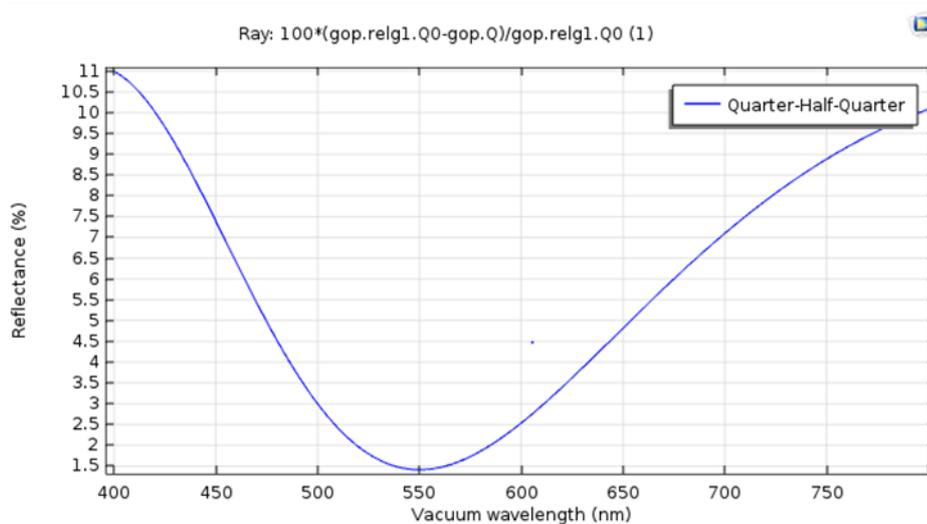


Figure 3.10. La réponse de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde pour DCAR avec différent épaisseur.

On constate, d'après les résultats obtenus en **figure 3.10**, que la réflectivité évolue dans une gamme de [1.5%,11%] avec un minimum autour de 1.5% pour $\lambda_0=550$ nm.

Ce cas d'étude est néanmoins plus acceptable que le cas précédent avec épaisseur commune égale à $\lambda_0/4$.

c (DCAR) avec épaisseur commune $\frac{\lambda_0}{2}$

Dans cette partie, nous avons utilisé DCAR MgF2 et CeF3 avec une épaisseur de $\lambda/2$ pour les deux couches. Les résultats de la simulation apparaissent en figure 3.11

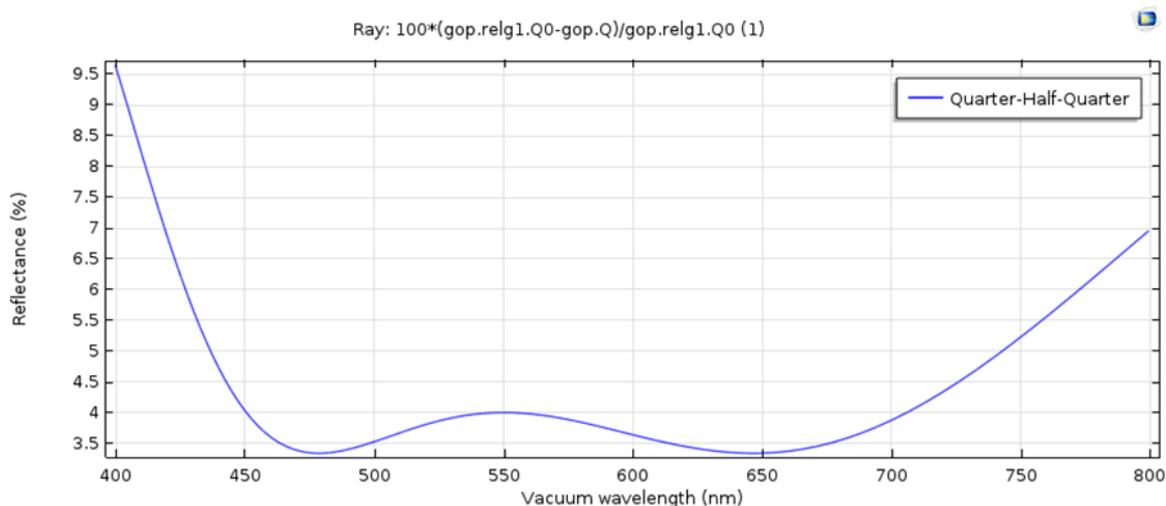


Figure 3.11. La réponse de la réflectivité pour DCAR avec épaisseur de $\lambda/2$.

Les résultats nous permettent de constater que la bande de longueur d'onde [450nm, 700nm] représente une bande élargie ou la valeur de la réflectivité correspond à une valeur variable entre 3.5% et 4%. La variation de la réflectivité varie autour de 3.75% pour cette bande élargie.

3.4 Indice de refraction minimale

Dans le but de transmettre le maximum de photons à la cellule photovoltaïque, il convient de choisir un indice de réfraction et une épaisseur de la CAR adéquats. Cela, nous permettra d'exploiter les phénomènes d'interférences destructives et d'obtenir une réflectivité nulle pour une longueur d'onde considérée. Nous allons, sur la base d'un travail de simulation, comprendre comment améliorer la réflectance.

Dans cette partie on va simuler en remplaçant CeF_3 , MgF_2 , ZrO_2 par ITO, ZnO , a-Si en simulant par une simple couche antireflet puis par une double couche et enfin par une multicouche.

3.4.1 Simulation monocouche SCAR

a Monocouche a base du matériau ITO

La simulation d'une monocouche a base du matériau ITO, permet d'avoir les résultats présentés en figure 3.12

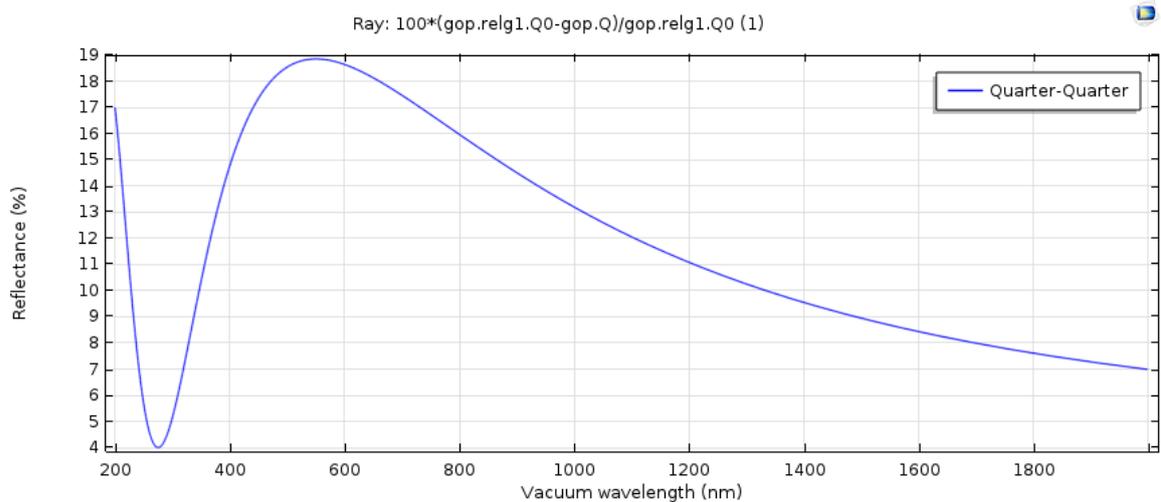


Figure 3.12. La réponse de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde pour une monocouche « ITO ».

Les résultats prédisent une réflectance minima de 4% pour une longueur d'onde approximative de 300 nm. Au-delà de cette longueur d'onde, des pertes considérables (19%) sont remarquées.

En remplaçant la monocouche à base de ITO par une monocouche à base du matériau ZnO, dont l'indice de réfraction vaut $n_c=1.959$ et donc proche de celui du matériau ITO $n_c=1.95$, la courbe de variation reste identique ceci est dû au fait que les indices des deux matériaux sont quasi identiques.

b Monocouche a base du matériau a_Si

L'utilisation d'une simple couche antireflet de a_Si d'indice de réfraction $n_c=3.48$ déposé sur un substrat de glass $n_s=1.5$ donne les résultats suivante :

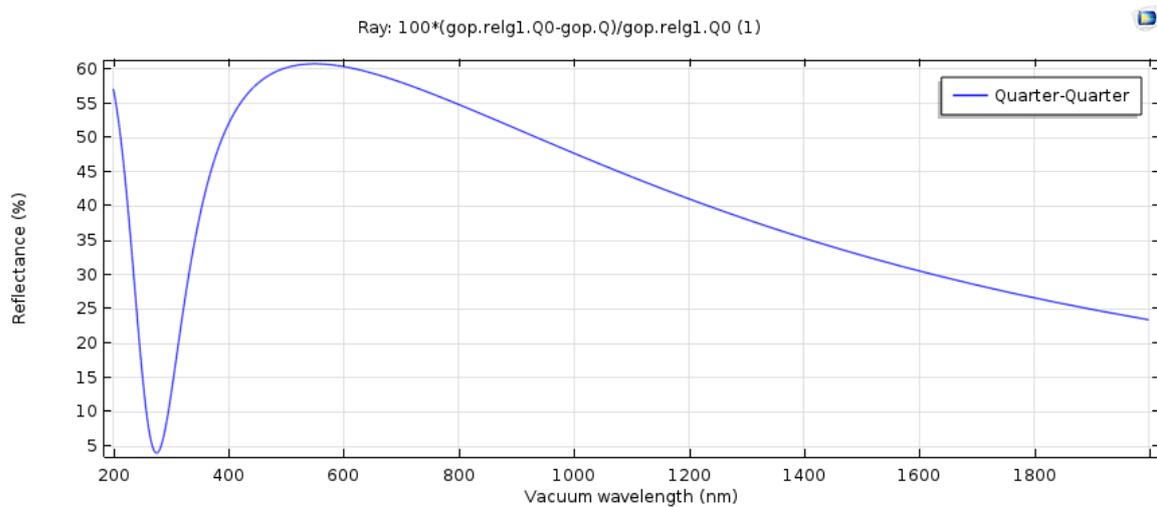


Figure 3.13. La réponse de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde pour une monocouche a_Si.

D'après la **figure 3.13** on constate que la réflectance est très élevée. Ces résultats ne sont pas satisfaisants car les pertes sont très importantes sur toute la gamme ; ceci est dû à la valeur de l'indice de réfraction du matériau utilisé comme couche antireflet. On doit donc choisir des matériaux avec des indices de réfraction "petits" pour minimiser les pertes par réflectance.

3.4.2 Simulation double couche DCAR

a Double couche basées sur la disposition respective substrat, ZnO,ITO

La double couche simulée dans cette partie du travail est formée par une couche du matériau ZnO sur laquelle on dépose de matériau ITO. Cette combinaison nous a permis d'avoir les résultats exposés en figure 3.14.

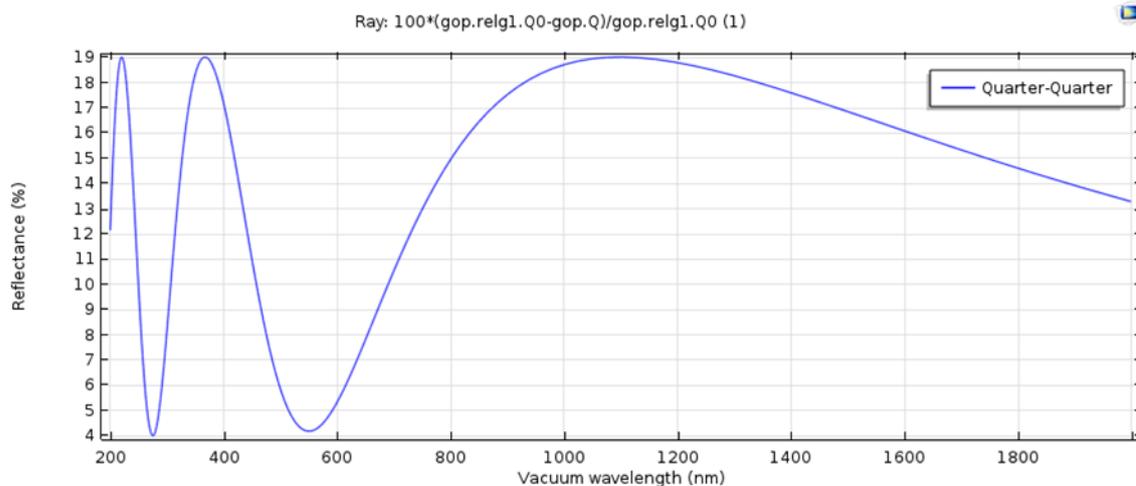


Figure 3.14 .La réponse de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde pour une double couche « ITO, ZnO » quarter quarter

Ces résultats de simulation montrent une différence (amélioration), par rapport au dépôt monocouche, car la réflectance est minima (au tour de 4%) pour deux longueurs d'onde ($\lambda=300$ nm, $\lambda =550$ nm).Néanmoins en dehors de ces deux valeurs les pertes sont considérables, mais restent bien en dessus de ceux constatés pour les monocouches.

La simulation d'une double couche basée sur un dépôt "inversé "des matériaux, couche ITO sur laquelle on dépose du ZnO, donne les même résultats. Ceci est dû au fait que l'indice de réfraction des matériaux reste le même.

b Double couche basées sur la disposition respective substrat,ITO,a_Si

La double couche formée par un dépôt d'a_Si sur l'ITO a entrainé les résultats de simulations présentées en figure 3.15.

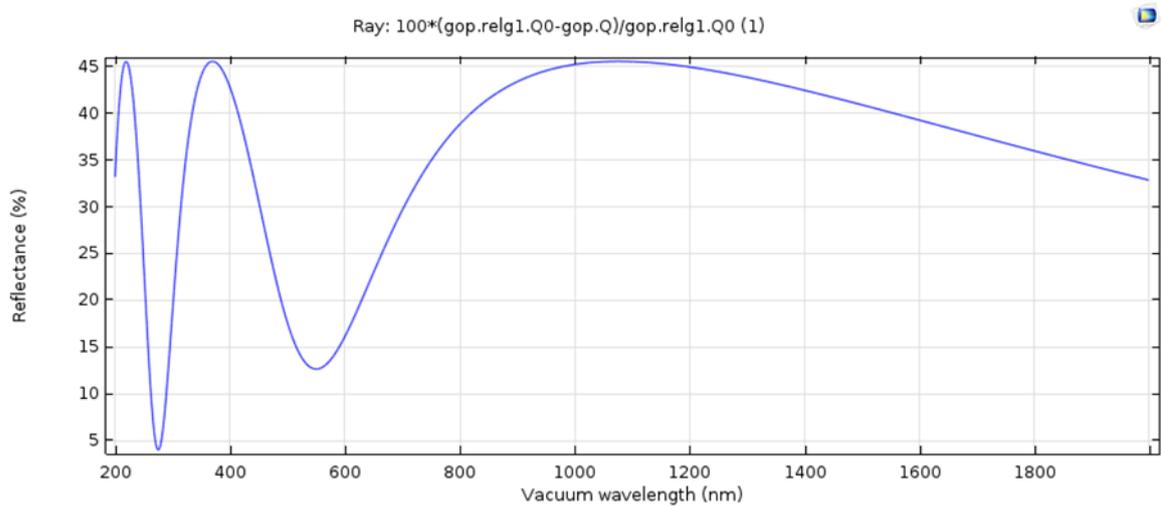


Figure 3.15. La réponse de la réflectivité en fonction de longueur d'onde pour « a_Si, ITO » comme double couche.

Cette combinaison de matériaux ne nous permet pas d'avoir des résultats meilleur que ceux relatifs à la double couche (ITO, ZnO) : les pertes sont nettement élevées (jusqu'à 45%) et la réflectance pour la longueur d'onde de 550nm s'est détériorée et vaut approximativement 13% au lieu de 4%.

La simulation d'une double couche basée sur un dépôt "inversé" des matériaux ITO sur a_Si nous donne les résultats en figure 3.16.

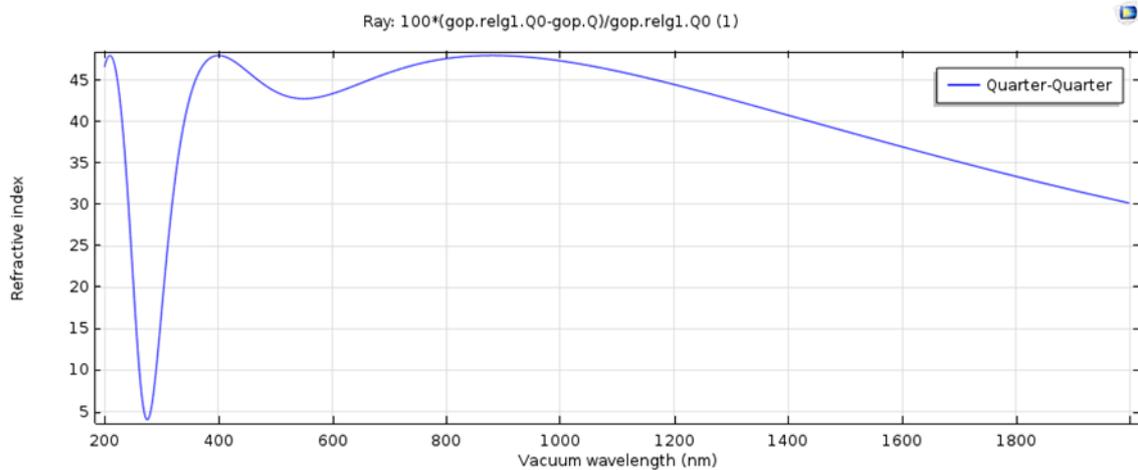


Figure 3.16. La réponse de la réflectance en fonction de la longueur d'onde pour DCAR « ITO, a_Si ».

A partir de la **figure 3.16** on constate que la réflectance est très élevée ce qui influe négativement sur les performances des cellules solaires. L'augmentation de la réflectance crée des pertes par réflectance considérables sur toute la gamme des longueurs d'ondes. On constate que cette combinaison des matériaux (ITO, a_Si) ne donne pas des bons résultats.

La formation d'une double couche dont la disposition des matériaux précédents est inversée aboutit aussi aux résultats de la figure 3.16.

La simulation d'une double couche basée sur un dépôt des matériaux, couche a_Si, déposée sur du ZnO, donne les mêmes résultats que ceux présentés en figure 3.15

L'étude en DCAR donne des résultats améliorés, par rapport à l'étude SCAR, mais en utilisant les matériaux (ITO, ZnO).

3.4.3 Simulation multicouche MCAR

La réflexion des photons incidents par les surfaces des substrats de silicium est une source importante de pertes pour la conversion photovoltaïque. Les solutions existent pour limiter ces pertes, mais ont un coût élevé pour que la production de masse des cellules photovoltaïques soit possible. Des solutions plus performantes sont systématiquement recherchées, comme le dépôt de plusieurs couches antireflets.

Nous allons aborder une simulation pour obtenir une réflectance presque nulle. Pour avoir une absorption total de tous les rayons lumineux dans la gamme [200-2000] nm c'est à dire absorber tous les longueurs d'onde incident (UV, visible, IR) et minimiser les pertes dans les cellules solaires. On va modifier l'emplacement des matériaux jusqu'à avoir des résultats qui valide l'objectif de la simulation.

a Multicouches basées sur la disposition respective substrat, a_Si,ZnO,ITO

Cette disposition des matériaux, nous a permis d'avoir les résultats exposés sur la figure 3.17 :

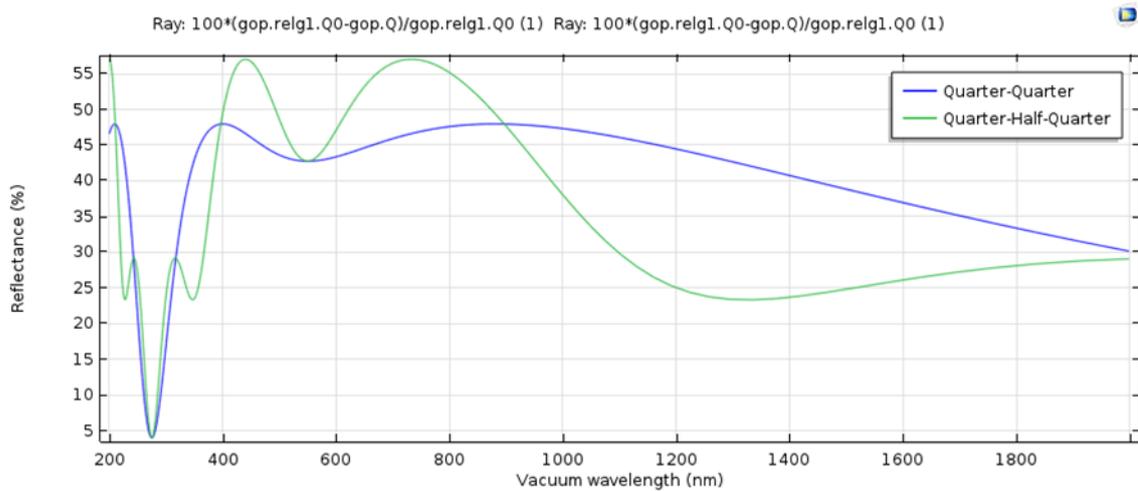


Figure 3.17. La réponse de la réflectance en fonction de la longueur d'onde.

Cette organisation de matériaux ne donne pas de bon résultat car la réflectance est minimale seulement dans le spectre (UV) lorsque la longueur d'onde est entre [200-400] nm. La réflectance est au-dessous de 5%, on remarque également que les pertes par réflexion sont importantes pour les moyennes et grandes longueurs d'ondes (visible et infrarouge). Cela est causé, par la nature et l'emplacement des couches antireflet utilisées.

La combinaison des matériaux : Substrat, a_Si, ITO, ZnO. Entraîne les mêmes résultats que ceux exposés sur la figure 3.17.

b Multicouches basées sur la disposition respective substrat,ZnO ,a_si,ITO

Les résultats de la simulation suite à la combinaison des matériaux substrat, ZnO, a_Si, ITO (figure3.18).

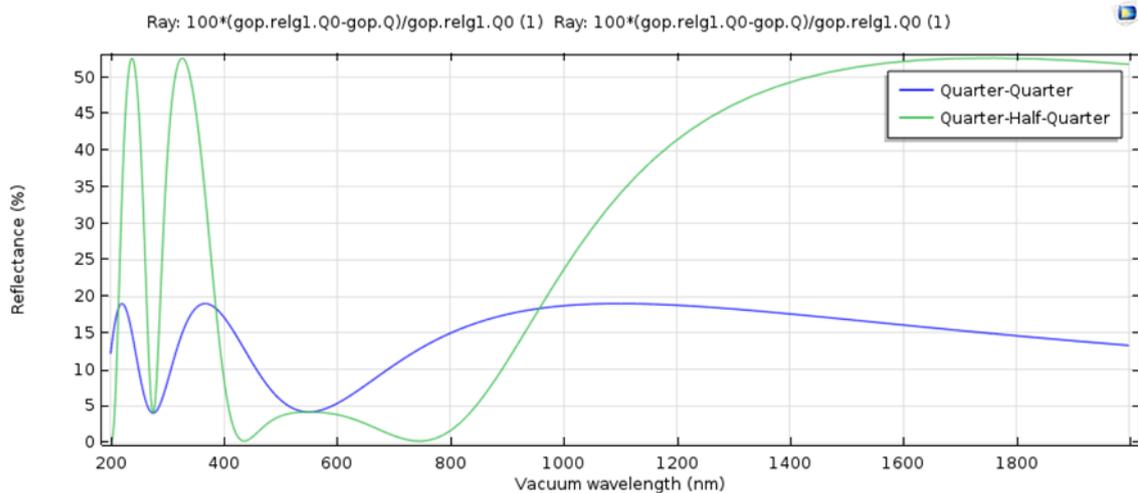


Figure 3.18.La variation de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde.

Les résultats de la simulation suite à la combinaison des matériaux substrat, ZnO, a_Si, ITO La figure 3.18 montre une amélioration considérable .On remarque qu'on a deux minima, l'un au niveau de $\lambda=300\text{nm}$, l'autre au niveau $\lambda=550\text{nm}$.Il y aussi une baisse de la réflectance, autour de 18%, pour le Q-Q. cependant pour le Q-H-Q, les pertes restent considérables mais on a des minima (zéro) pour la réflectance aux niveaux de $\lambda=450\text{nm}$ et $\lambda=750\text{nm}$.Dans cette gamme de longueur d'ondes la réflectance est tout de même minimiser a une valeur inferieur a 5%.

c Multicouches basées sur la disposition respective substrat, ITO,ZnO,a_Si

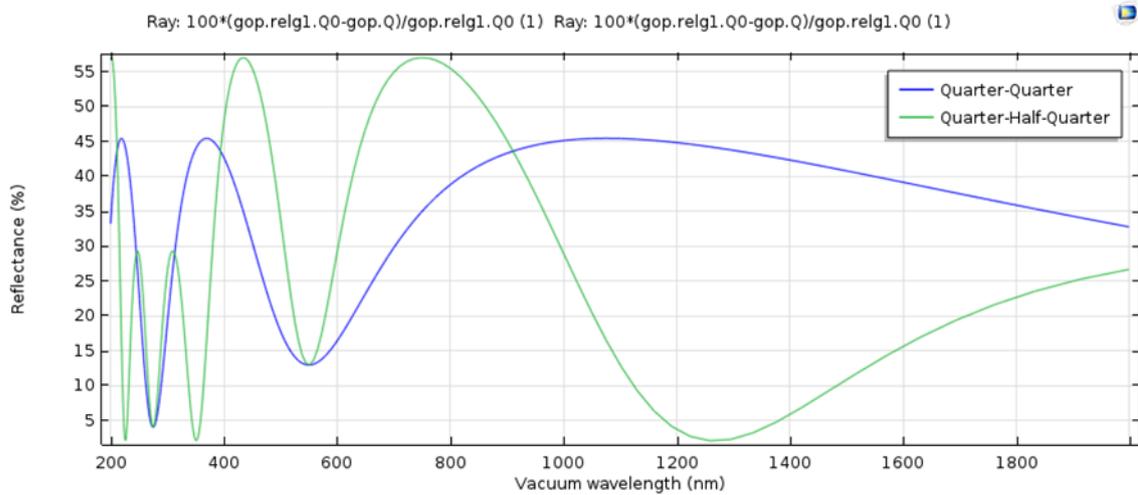


Figure 3.19. La réponse de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde.

Les résultats de cette disposition (figure 3.19) paraissent incorrects, par rapport aux précédents.

d Multicouches basées sur la disposition respective substrat, ITO,a_Si,ZnO

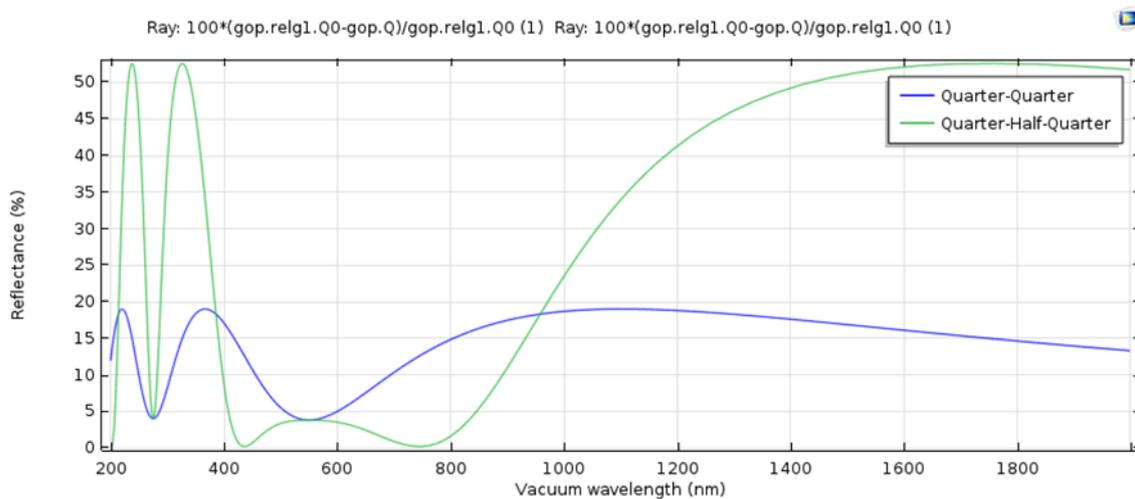


Figure 3.20. La réponse de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde.

La figure 3.20, relative à cette combinaison, montre clairement la concordance des résultats dus à la disposition substrat, ZnO, a_Si, ITO.

Il y a une mise en importance de la couche la couche principale d'absorption dans les deux dispositions (ZnO, ITO). Ces matériaux ayant des indices de réfraction inférieure à ceux des deux autres matériaux.

3.5 Utilisation du materiau Aliminum(Al) comme reflecteur arriere

Bien qu'on ait obtenu des bons résultats avec la simulation précédente on a cherché des méthodes pour diminuer la réflectivité sur des longueurs d'onde plus large parmi ces méthodes l'utilisation de l'aluminium comme (réflecteur arrière) à cause de leur propriété optique qui permet de garder la lumière incidente dans la cellule solaire sans être réfléchi.

3.5.1 Multicouches basées sur la disposition respective substrat,Al,a_Si,ITO

Cette combinaison de dépôt de couche a entrainée les resultats presenté en figure 3.21.

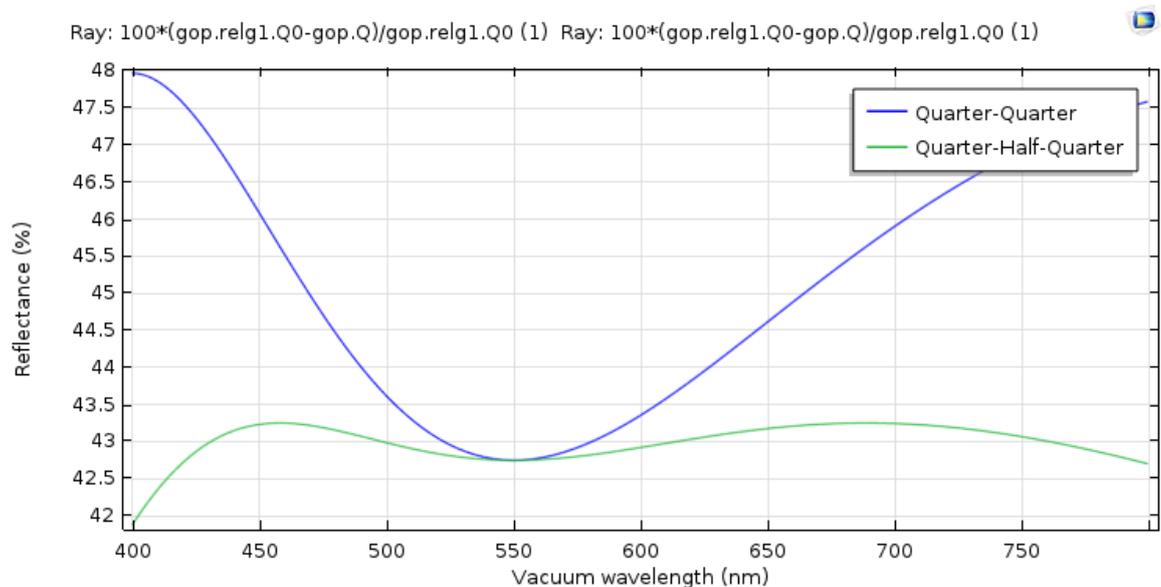


Figure 3.21. La réponse de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde.

L'analyse des résultats apparaissant sur la figure 3.21, indique clairement la détérioration de la réflectance. Les résultats acceptable est notifié pour $\lambda=550$ nm, et $\lambda=400$ nm.

3.5.2 Multicouches basées sur la disposition respective substrat,Al,ZnO,ITO

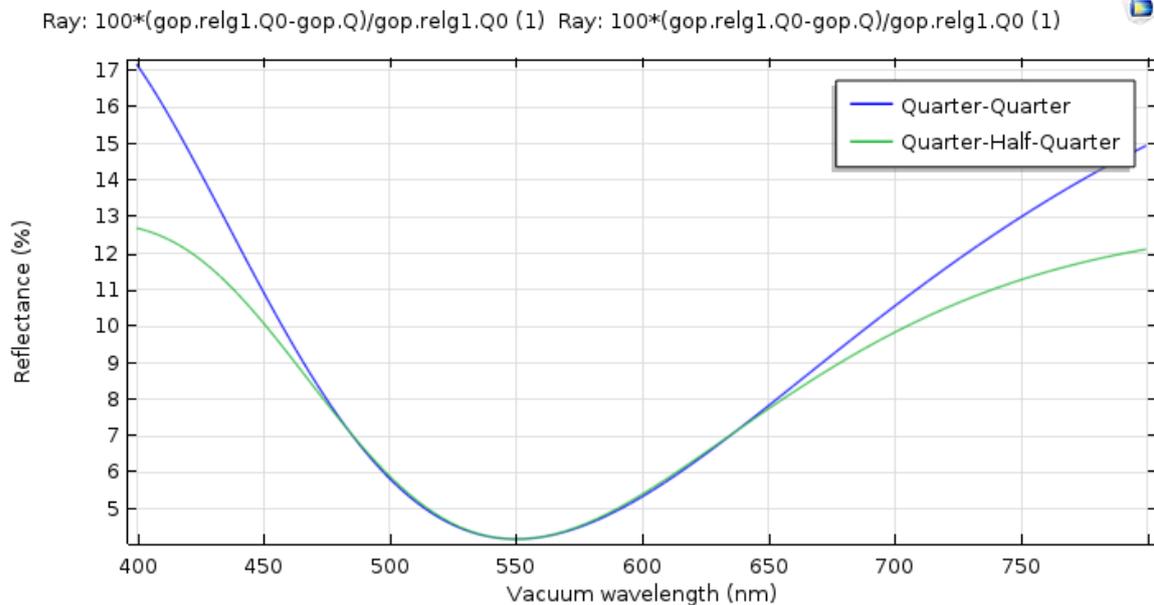


Figure 3.22. La reponse de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde.

Dans ce cas de dépôt la simulation (figure3.22) indique une amélioration dans le cas du Q-Q et du Q-H-Q, ou on remarque que la réflectance est au-dessous de 5% pour une seul longueur d'onde $\lambda=550$ nm.

3.5.3 Multicouches basées sur la disposition respective substrat,Al,a_Si,ZnO

On va utiliser le ZnO comme couche transparent en ajoute une autre couche de a_Si et on termine par le Al et les résultats de simulation sont présentés sur la figure 3.23

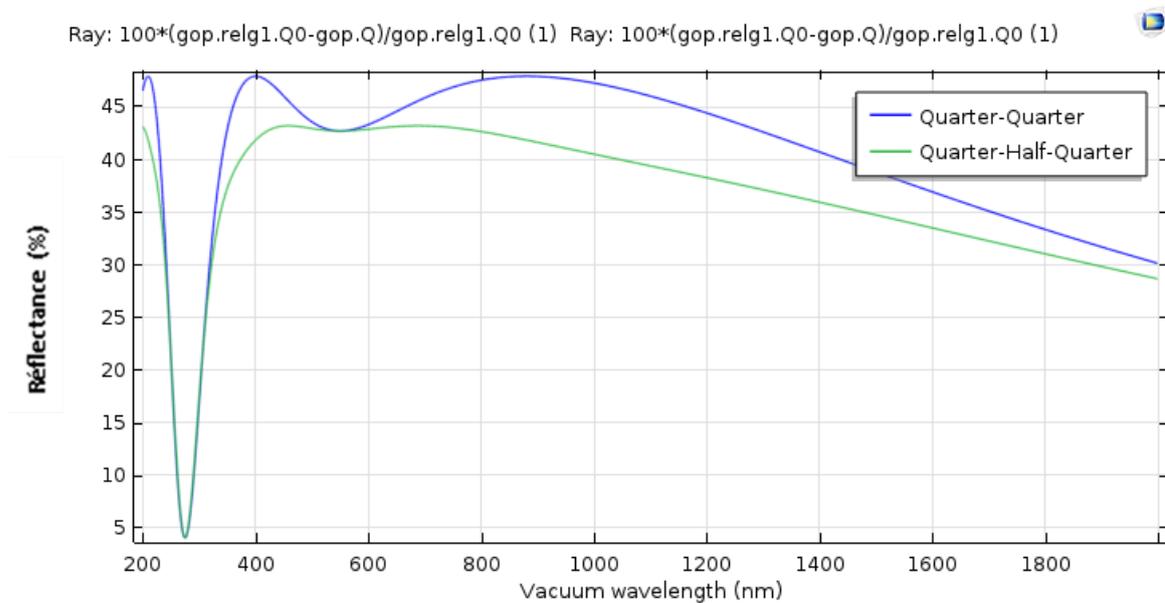


Figure 3.23. La réponse de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde.

On constate que le Q-Q et le Q-H-Q sont proportionnelles lorsque la longueur d'onde est comprise entre [200 nm-400 nm] .La réflectance est d'environ 4%. Cette combinaison de matériaux ne donne pas de bons résultats.

3.5.4 Multicouches basées sur la disposition respective substrat,Al,ZnO,a_si

Les résultats de simulation en utilisant a_Si en premier suit le ZnO et l'Al en dernier sont présenté sur la figure 3.24.

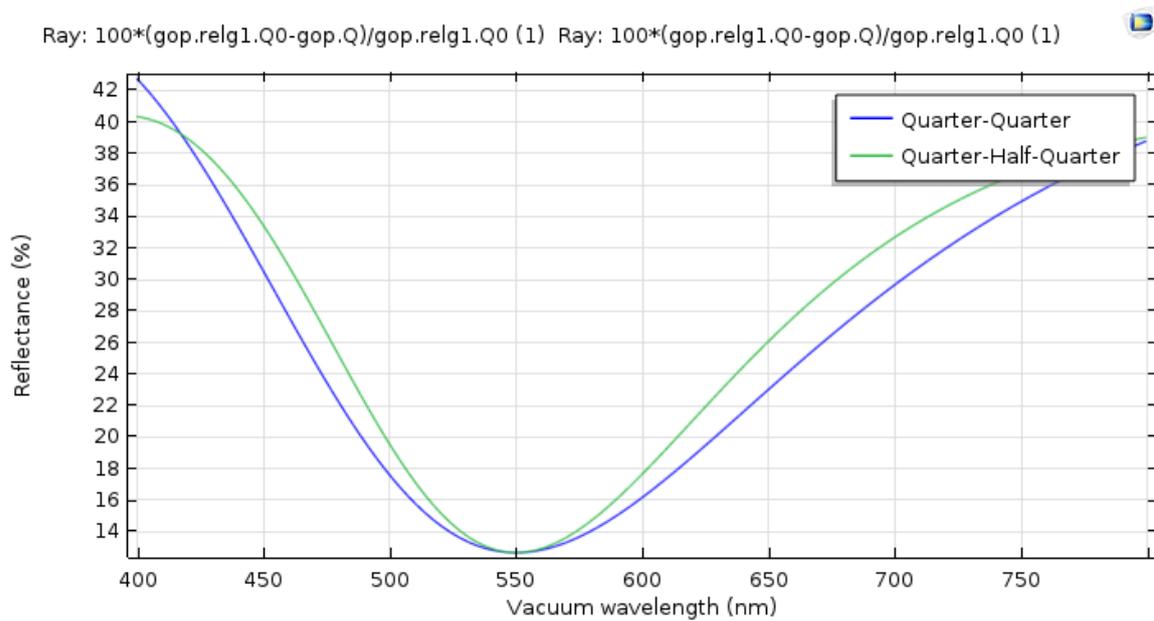


Figure 3.24. La réponse de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde.

On remarque que la réflectance est au-dessous de 14% pour $\lambda = 550$ nm, mais la réflectance reste considérable 42% pour d'autre longueur d'onde. Ceci implique des pertes très important des rayons lumineux sur toute la gamme.

Quand la réflectivité augmente, la couche devient absorbante ce qui influence négativement sur les performances de la cellule.

La combinaison substrat, Al, ITO, a_Si donne des résultats identiques à ceux présentés en figure 3.24.

3.5.5 Multicouches basées sur la disposition respective substrat,Al,ITO,ZnO

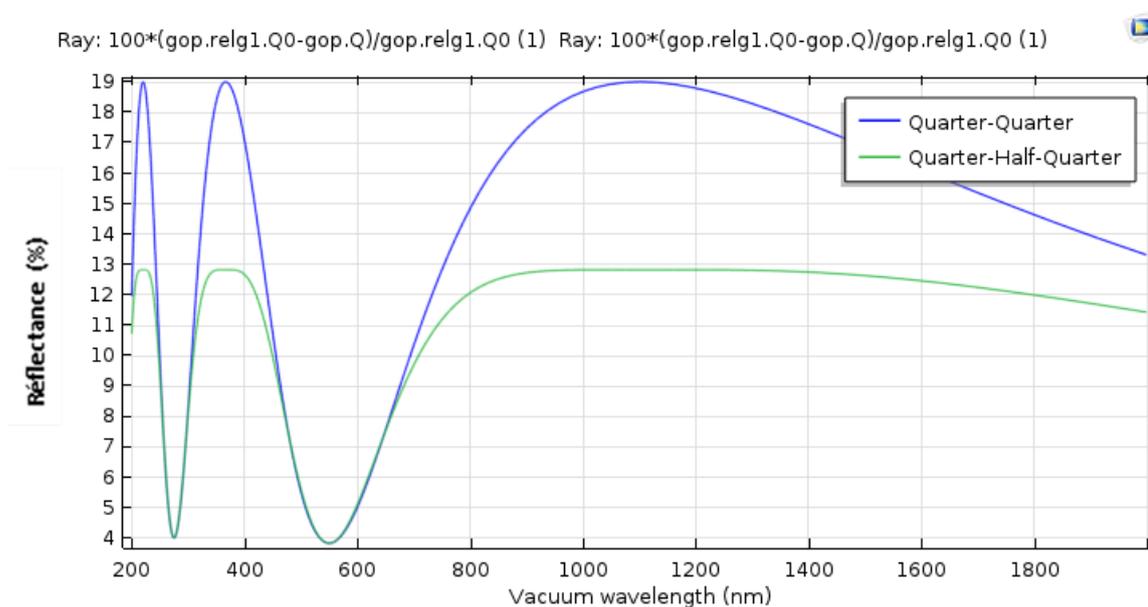


Figure 3.25. La réponse de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde.

Cette simulation qui comporte le changement de position des matériaux ITO, ZnO par rapport à la simulation présentée en figure 3.22 n'a aucune influence sur le cas Q-Q, mais améliore nettement le cas Q-H-Q puisque la réflectance passe à 13% comme cas défavorable alors qu'elle atteigne les 50% au paravent. Une réflectance nulle à 200nm n'existe plus.

3.6 Simulation avec d'autres matériaux

3.6.1 Simulation double couche

Pour voir l'impact d'une DCAR (double couche antireflet) on va simuler en utilisant deux couches tel que :

- La couche supérieure est formée de MgF2 d'indice de réfraction $n=1.38$ et d'épaisseur $\lambda/4$.
- La couche inférieure c'est le Al2O3 avec un indice de réfraction $n=1.76$ et d'épaisseur $\lambda/2$.

Les résultats de la simulation apparaissent en figure 3.26

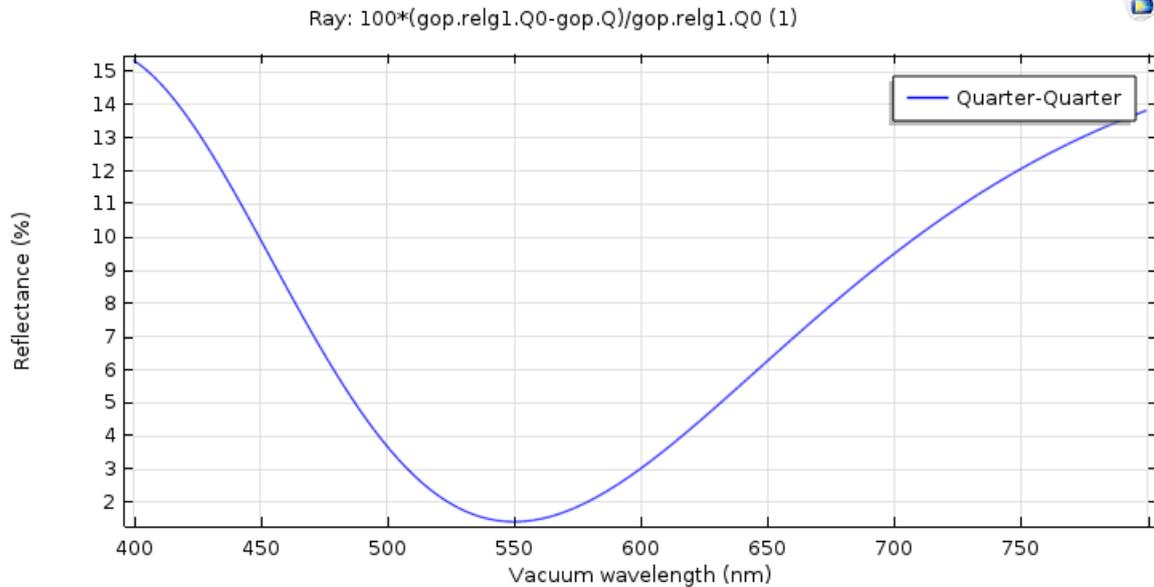


Figure 3.26. La réponse de la réflectivité en fonction de la longueur d’onde pour DCAR avec différent épaisseurs.

La figure 3.26 illustre la variation de la réflectance en fonction de la longueur d’onde en utilisant une double couche antireflet .La réflectance est environ 1% autour de la longueur d’onde centrale avec des pertes considérable environ 15% dans la gamme [VISIBLE et IR].

Le dépôt d’une DCAR MgF2 et Al2O3 avec même épaisseur pour les deux couches quarts de la longueur d’onde centrale $\lambda/4$ donne les résultats suivant :

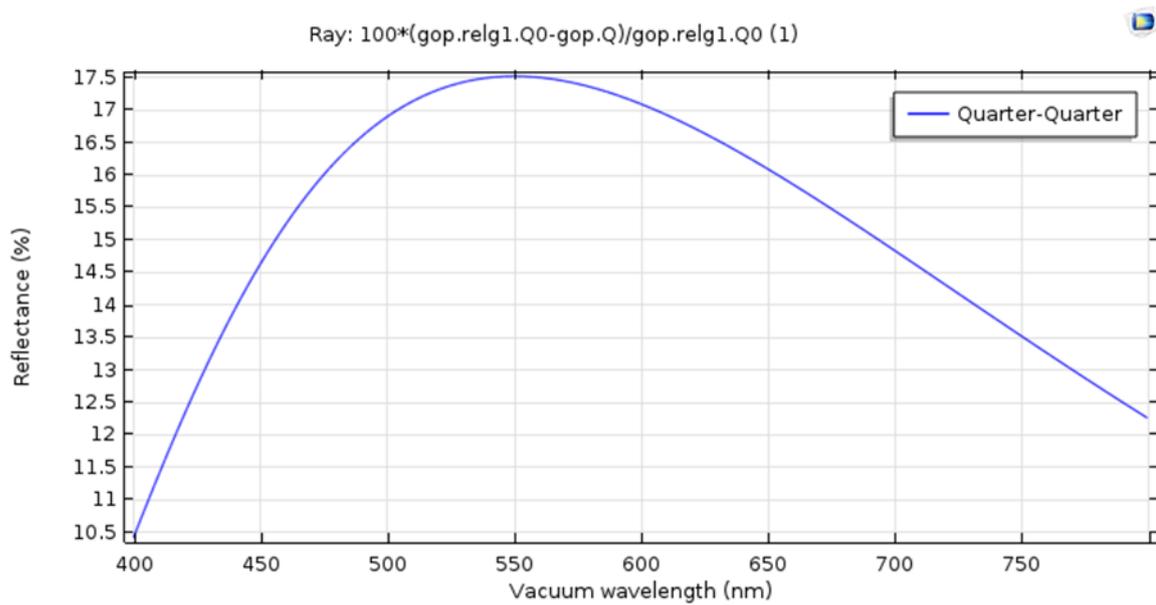


Figure 3.27. La réponse de la réflectivité pour DCAR avec une épaisseur quarter quarter.

D'après la figure 3.27 on constate que la réflectance augmente avec la longueur d'onde dans la gamme [400 nm, 550nm] puis décroît au de la de 550nm. On ne distingue aucun minima pour cette combinaison de matériaux avec épaisseur Q-Q.

Dans la suite, on a simulé en déposant deux couche la couche supérieur c'est du ZnS avec un indice de réfraction $n=2.3862$, et la couche inferieur c'est le MgF2 avec un indice de réfraction $n=1.38$. Les résultats de cette simulation sont représentés sur la figure 3.28

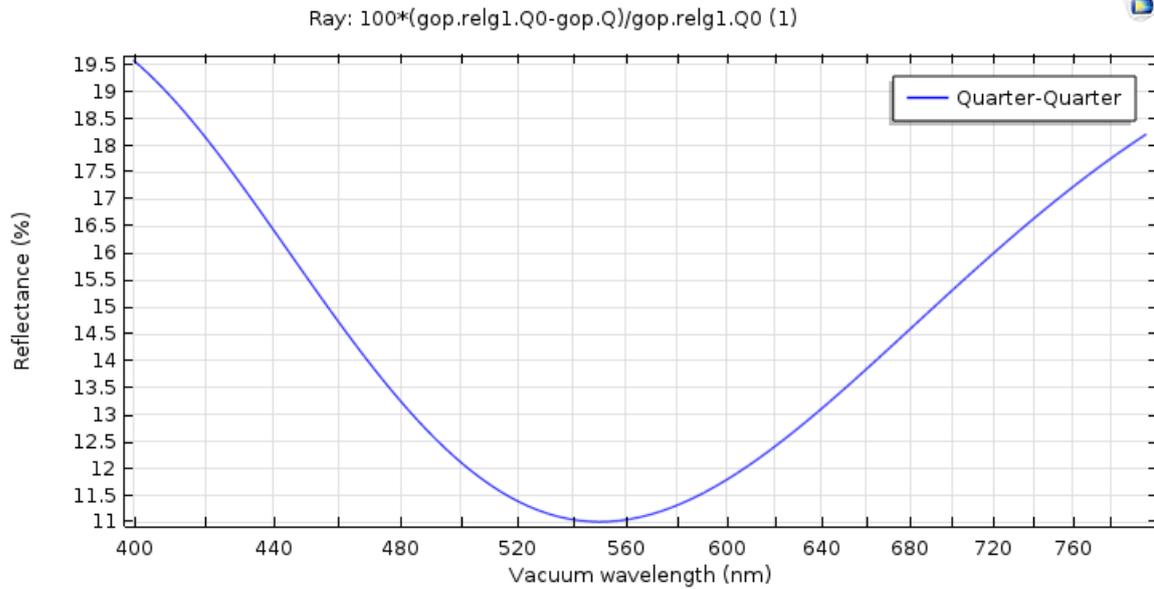


Figure 3. 28. La réponse de la réflectivité pour DCAR quarter quarter.

On constate d'après la **figure 3.28** que cette réflectance est minimale à environ 11% autour de la longueur d'onde centrale. Cette combinaison de matériaux n'est pas adéquate pour atteindre les objectifs fixés c'est-à-dire minimiser les pertes sur une large gamme de longueur d'onde.

Le dépôt d'une DCAR SiO₂ sur une couche c'est Ta₂O₅ avec les indices optimaux pour ces couches $n_1=1.9785$, $n_2=2.1573$ respectivement et avec une épaisseur quart de la longueur d'onde centrale permet de voir les résultats suivantes :

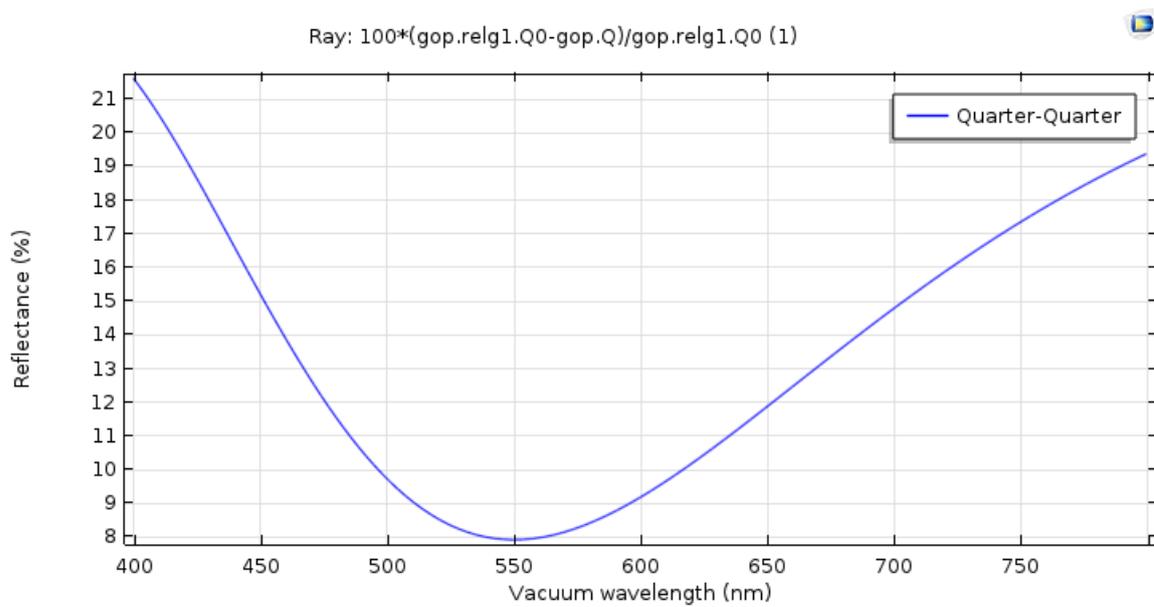


Figure 3.29. La réponse de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde pour DCAR quarter quarter.

Cette combinaison de couches matériaux entraîne des résultats quasi identique à la combinaison précédente (ZnS, MgF₂). Un seul minima de réflectance (8%) pour une longueur d'onde centrale de 550nm.

Cette combinaison reste également non performante pour nos objectifs.

3.6.2 Simulation Multicouche

Dans cette partie on a déposé trois couche sur un substrat de glass : la couche supérieur c'est du SiO₂ d'indice de réfraction $n=1.9785$. La couche inferieur c'est le MgF₂ d'indice de réfraction $n=1.38$ avec une épaisseur quart de la longueur d'onde $\lambda/4$. La couche qui sépare les deux couche précédent c'est du Ta₂O₅ avec un indice de réfraction $n=2.1573$ et une épaisseur $\lambda/2$ les résultats obtenus sont représentés sur la figure 3.30

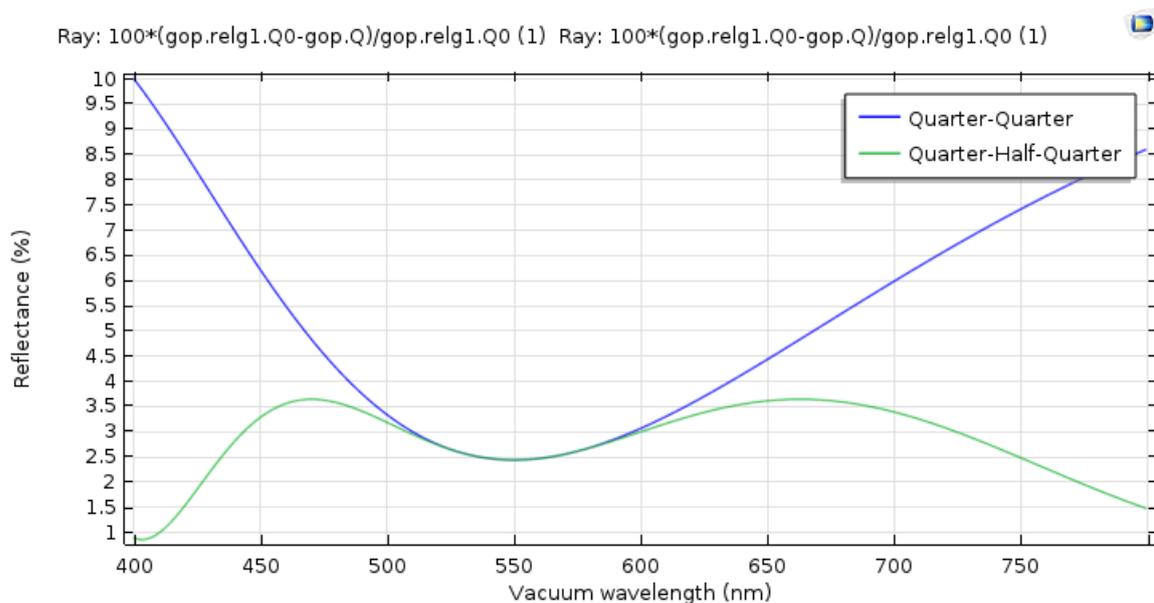


Figure 3.30. La réponse de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde pour MCAR avec des épaisseurs différentes.

La figure 3.30 nous a permis de voir l'impact de la réflectance pour une MCAR. Cette combinaison de matériaux nous a permis d'obtenir des couches homogènes d'indices de réfraction petit ce qui permet de minimiser la réflectance sur large gamme de longueur d'onde. Surtout pour le cas Q-H-Q ou la réflectance sur la gamme [400nm-800nm] n'excède pas 3.5%. Ce type de résultat est très acceptable et concorde avec les objectifs tracés.

Dans ce qui suit on a simulé en utilisant les trois couches SiO₂, MgF₂, Ta₂O₅ avec une épaisseur de quarter half quarter. Les résultats de simulations sont présentés sur la figure 3.31

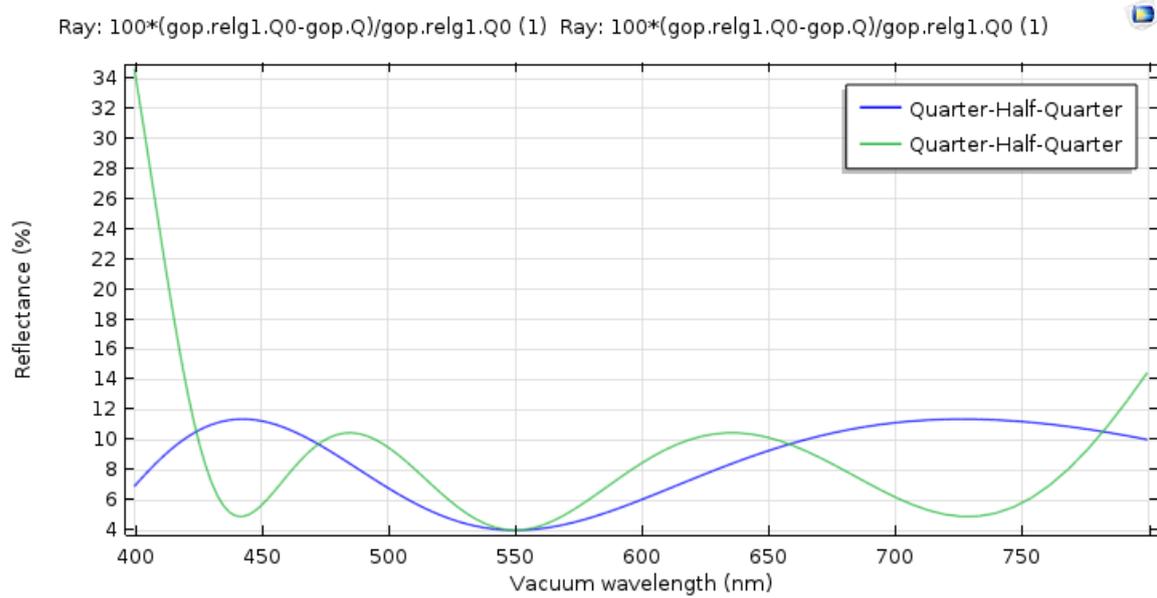


Figure 3.31. La réponse de la réflectivité en fonction de la longueur d’onde pour MCAR avec une épaisseur quarter half quarter.

En comparant avec le dépôt de couche précédent les résultats sont s’améliore pas .

D’autres simulations (figure 3.32-3.33-3.34) basés sur les matériaux ZnS, MgF₂ et Ta₂O₅, dont les indices de réfraction sont respectivement 2.36, 1.38, 2.15, ne donnent pas des résultats satisfaisants et ceci pour toute sorte de combinaison des matériaux ainsi que le changement de leur épaisseur de couche.

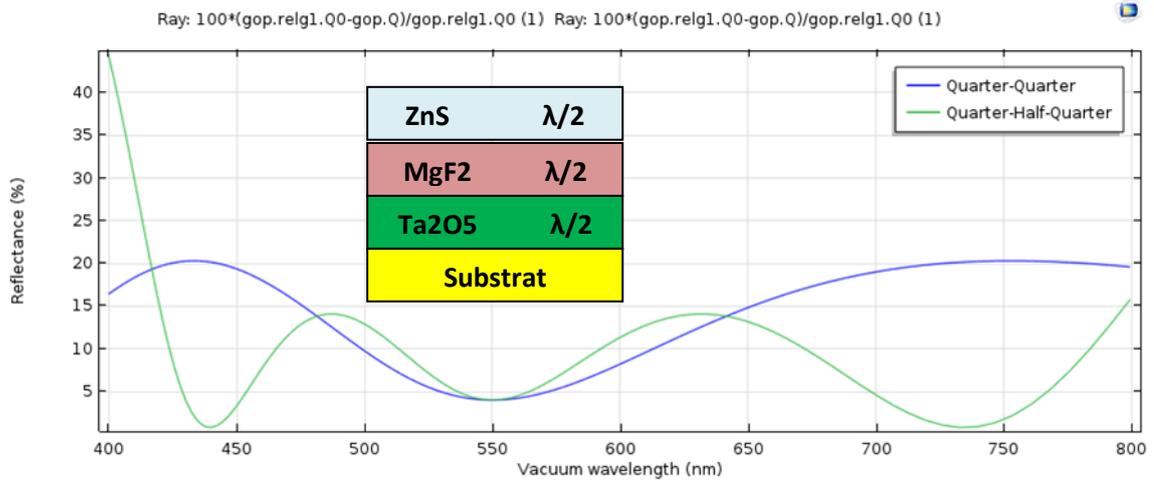


Figure 3.32. La réponse de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde pour MCAR avec une épaisseur quarter half quarter.

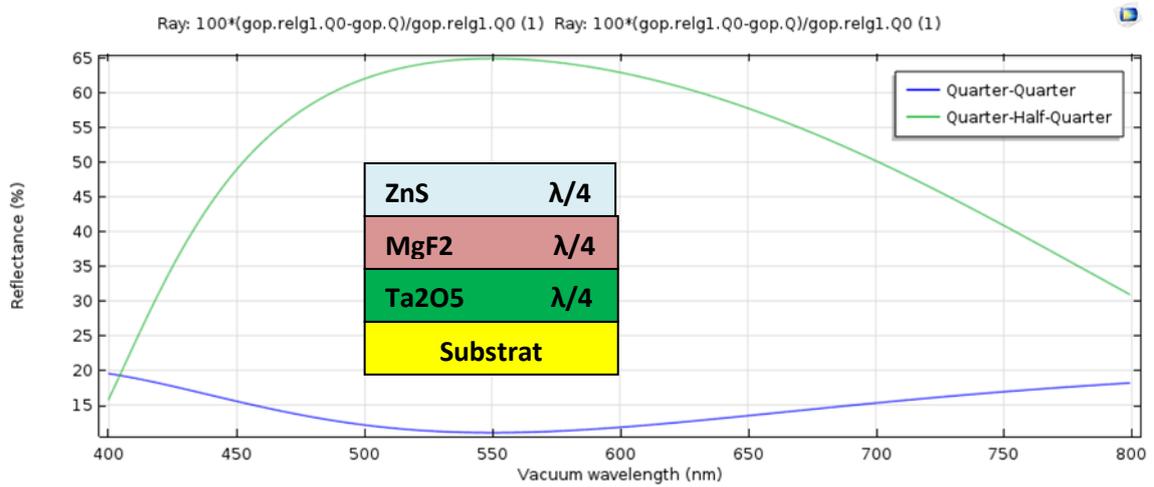


Figure 3.33. La réponse de la réflectivité pour MCAR avec quarter half quarter pour trois couche.

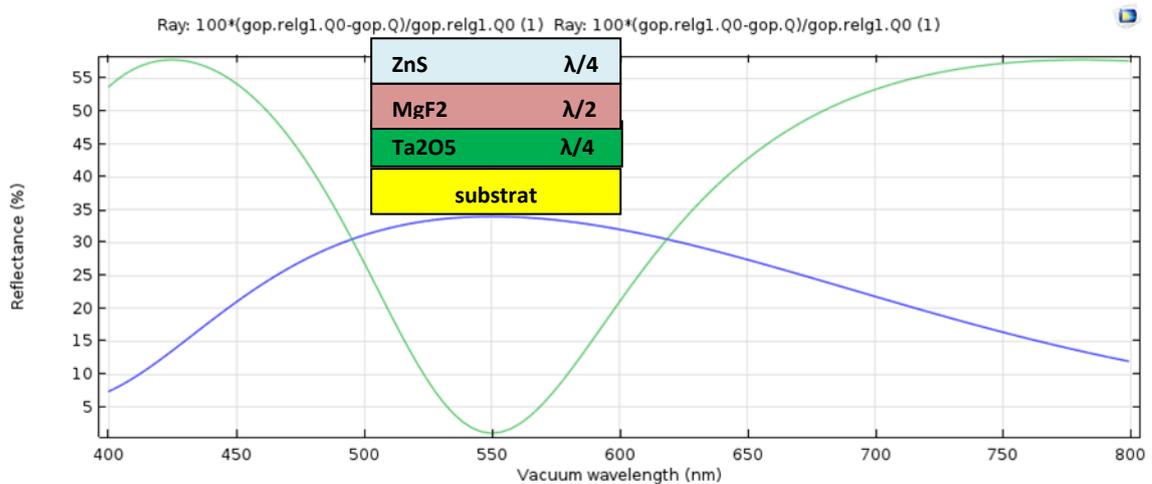


Figure 3.34. La réponse de la réflectivité pour MCAR avec des épaisseurs différentes.

Les couches antireflets		La réflectance		Les longueurs d'ondes	Les indices de réfractions	Les conclusions
SCAR	CeF3 ($\lambda/4$)	Max	N'excède pas 8%	$\lambda = 550\text{nm}$	$n_c = 1.63$	
		Min	Au-dessus de 6.7%	$\lambda = 400\text{nm}$		
	MgF2 ($\lambda/4$)	Max	N'excède pas 3%	$\lambda = 400\text{nm}$	$n_c = 1.38$	
		Min	Au-dessus de 1.45%	$\lambda = 550\text{nm}$		
	ZrO2 ($\lambda/4$)	Max	Plus de 27.5%	$\lambda = 550\text{nm}$	$n_c = 2.2$	
		Min	Au-dessus de 22%	$\lambda = 400\text{nm}$		
SCAR	ITO, ZnO ($\lambda/4$)	Max	19%	$\lambda = 550\text{nm}$	$n_c = 1.95,$ $n_c = 1.959$	Le ITO, ZnO donne le meilleur résultat par rapport au a_Si car son indice est le plus petit
		Min	4%	$\lambda = 300\text{nm}$		
	a_Si ($\lambda/4$)	Max	60%	$\lambda = 550\text{nm}$	$n_c = 3.48$	
		Min	Au-dessus de 5%	$\lambda = 300\text{nm}$		

Tableau 3.1 .Les meilleurs résultats pour SCAR.

Les couches antireflets		La réflectance (%)		Les longueurs d'onde	Les indices de réfractions	Les conclusions
DCAR	MgF2 $\lambda/4$	Max	12.5%	$\lambda = 550\text{nm}$	1.38	
	CeF3 $\lambda/4$	Min	7%	$\lambda = 400\text{nm}$	1.63	
	MgF2 $\lambda/4$	Max	11%	$\lambda = 400\text{nm}$	1.38	
	CeF3 $\lambda/2$	Min	1.5%	$\lambda = 500\text{nm}$	1.63	
	MgF2 $\lambda/2$	Max	Plus de 9.5%	$\lambda = 400\text{nm}$	1.38	
	CeF3 $\lambda/2$	Min	Au-dessus de 3.5%	$\lambda = 475\text{nm}$ $\lambda = 650\text{nm}$	1.63	
DCAR	ITO $\lambda/4$	Max	19%	$\lambda = 400\text{nm}$	1.95	On constate que la meilleure disposition est ITO sur a_Si
	ZnO $\lambda/4$			$\lambda = 1100\text{nm}$		
		Min	4%	$\lambda = 250\text{nm}$	1.959	
				$\lambda = 300\text{nm}$ $\lambda = 550\text{nm}$		
	a_Si $\lambda/4$	Max	45%	$\lambda = 400\text{nm}$	3.48	
	ITO $\lambda/4$			$\lambda = 250\text{nm}$	1.95	
		Min	13%	$\lambda = 1100\text{nm}$		
				Au-dessus de 5%	$\lambda = 550\text{nm}$ $\lambda = 300\text{nm}$	
ITO $\lambda/4$	Max	Plus de 45%	$\lambda = 200\text{nm}$	1.95		
a_Si $\lambda/4$			$\lambda = 400\text{nm}$	3.48		
			$\lambda = 900\text{nm}$			

		Min	Au-dessus de 5%	$\lambda=300\text{nm}$				
DCAR	<table border="1"> <tr><td>MgF2 $\lambda/4$</td></tr> <tr><td>Al2O3 $\lambda/2$</td></tr> </table>	MgF2 $\lambda/4$	Al2O3 $\lambda/2$	Max	Plus de 15%	$\lambda=400\text{nm}$	1.38	
		MgF2 $\lambda/4$						
	Al2O3 $\lambda/2$							
	Min	Au-dessus de 2%	$\lambda=550\text{nm}$	1.76				
	<table border="1"> <tr><td>MgF2 $\lambda/4$</td></tr> <tr><td>Al2O3 $\lambda/4$</td></tr> </table>	MgF2 $\lambda/4$	Al2O3 $\lambda/4$	Max	17.5%	$\lambda=550\text{nm}$	1.38	
		MgF2 $\lambda/4$						
	Al2O3 $\lambda/4$							
	Min	10.5%	$\lambda=400\text{nm}$	1.76				
<table border="1"> <tr><td>ZnS $\lambda/4$</td></tr> <tr><td>MgF2 $\lambda/4$</td></tr> </table>	ZnS $\lambda/4$	MgF2 $\lambda/4$	Max	19.5%	$\lambda=400\text{nm}$	2.3862		
	ZnS $\lambda/4$							
MgF2 $\lambda/4$								
Min	11%	$\lambda=550\text{nm}$	1.38					
<table border="1"> <tr><td>SiO2 $\lambda/4$</td></tr> <tr><td>Ta2O5 $\lambda/4$</td></tr> </table>	SiO2 $\lambda/4$	Ta2O5 $\lambda/4$	Max	Plus de 21%	$\lambda=400\text{nm}$	1.9785		
	SiO2 $\lambda/4$							
Ta2O5 $\lambda/4$								
Min	8%	$\lambda=550\text{nm}$	2.1573					

Tableau 3.2. Les meilleurs resultats pour DCAR.

Les couches antireflets		La reflectance(%)		Les longueurs d'ondes	Les indices de refraction	Les conclusions
MCA	ITO $\lambda/4$	Max	Plus de 55%	$\lambda=200\text{nm}$	1.95	
	ZnO $\lambda/2$			$\lambda=450\text{nm}$	1.959	
	a_Si $\lambda/4$	$\lambda=750\text{nm}$	3.48			
		Min	Au dessus de 5%	$\lambda=300\text{nm}$		
	ITO $\lambda/4$	Max	Plus de 50%	$\lambda=250\text{nm}$	1.95	
	a_Si $\lambda/2$			$\lambda=350\text{nm}$	3.48	
	ZnO $\lambda/4$			$\lambda=1700\text{nm}$	1.959	
				Min	0%	
				$\lambda=450\text{nm}$		
			5%	$\lambda=750\text{nm}$		
			$\lambda=300\text{nm}$			
			$\lambda=550\text{nm}$			
a_Si $\lambda/4$	Max	Plus de 55%	$\lambda=200\text{nm}$	3.48		
ZnO $\lambda/2$			$\lambda=450\text{nm}$	1.959		
ITO $\lambda/4$			$\lambda=750\text{nm}$	1.95		
			Min	13%		$\lambda=550\text{nm}$
		Au dessus de 5%	$\lambda=[200\text{nm}-400\text{nm}]$			
			$\lambda=1250\text{nm}$			
ITO $\lambda/4$	Max	48%	$\lambda=400\text{nm}$	1.95		
a_Si $\lambda/4$			$\lambda=400\text{nm}$	3.48		
Al $\lambda/2$	Min	42%	$\lambda=400\text{nm}$	1.097		
			$\lambda=550\text{nm}$			

	<table border="1"> <tr><td>ITO</td><td>$\lambda/4$</td></tr> <tr><td>ZnO</td><td>$\lambda/4$</td></tr> <tr><td>Al</td><td>$\lambda/2$</td></tr> </table>	ITO	$\lambda/4$	ZnO	$\lambda/4$	Al	$\lambda/2$	Max	17%	$\lambda=400\text{nm}$	1.95	
		ITO	$\lambda/4$									
		ZnO	$\lambda/4$									
	Al	$\lambda/2$										
Min	Au dessus de 5%	$\lambda=550\text{nm}$	1.959									
			1.097									
<table border="1"> <tr><td>ZnO</td><td>$\lambda/4$</td></tr> <tr><td>a_Si</td><td>$\lambda/4$</td></tr> <tr><td>Al</td><td>$\lambda/2$</td></tr> </table>	ZnO	$\lambda/4$	a_Si	$\lambda/4$	Al	$\lambda/2$	Max	Plus de 45%	$\lambda=200$ $\lambda=400$ $\lambda=900$	1.959 3.48 1.097		
	ZnO	$\lambda/4$										
	a_Si	$\lambda/4$										
Al	$\lambda/2$											
Min	Au dessus de 5%	$\lambda=300\text{nm}$										
	<table border="1"> <tr><td>A_Si</td><td>$\lambda/4$</td></tr> <tr><td>ZnO</td><td>$\lambda/4$</td></tr> <tr><td>Al</td><td>$\lambda/2$</td></tr> </table>	A_Si	$\lambda/4$	ZnO	$\lambda/4$	Al	$\lambda/2$	Max	42%	$\lambda=400\text{nm}$	3.48	
		A_Si	$\lambda/4$									
		ZnO	$\lambda/4$									
	Al	$\lambda/2$										
Min	Au dessus de 14%	$\lambda=550\text{nm}$	1.959									
			1.097									
<table border="1"> <tr><td>ZnO</td><td>$\lambda/4$</td></tr> <tr><td>ITO</td><td>$\lambda/4$</td></tr> <tr><td>Al</td><td>$\lambda/2$</td></tr> </table>	ZnO	$\lambda/4$	ITO	$\lambda/4$	Al	$\lambda/2$	Max	19%	$\lambda=200\text{nm}$ $\lambda=350\text{nm}$ $\lambda=1100\text{nm}$	1.959 1.95 1.097		
	ZnO	$\lambda/4$										
	ITO	$\lambda/4$										
Al	$\lambda/2$											
Min	4%	$\lambda=300\text{nm}$ $\lambda=550\text{nm}$										

Tableau 3.3.Les meilleurs resultats pour MCAR

3.7 Conclusion

Au cours de cette partie on a tester differentes façon de former les couches antireflets.On a travailler dur les monocouches,les double couches et les tri-couches avec differents combinaisons d'épaisseur .On a pu aboutir a une combinaison de couches donnant des resultats acceptables.La simulation est un travail de patience et de longue horaire ,mais permet un gain economique considerable .

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce projet de fin d'étude a porté sur l'étude, et la simulation de structure antireflet.

Nous avons mis en relief des résultats basés sur une simulation de monocouche de double couche et de multicouche (trois couche).

Ces résultats nous ont permis d'aboutir à des structures dont le comportement est acceptable par rapport à l'objectif fixé et qui été la minimisation de la réflectivité sur une bande de longueurs d'onde assez large.

D'après la simulation réalisée on peut conclure aussi que :

- Pour avoir une réflectivité minimale on doit choisir des matériaux avec des indices et épaisseurs petits.
- Le choix de la couche supérieur ainsi que la couche inferieur (au contact du substrat) est primordial

Bibliographie

- [1] Maillys Grau (Ingénieur ESPCI) : 'la réalisation de nouvelles structures de cellules solaires photovoltaïques à partir de couches minces de silicium cristallin sur substrat de silicium préparé par frittage de poudre', l'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2012.
- [2] Naïma TOUAFEK : 'contribution à l'étude d'une cellule solaire en couche mince à base de $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ ', université des frères Mentouri-constantine, 2015.
- [3] Model comsol, 'Anti-Reflective Coating with Multiple Layers'.
- [4] Khaled Kirah, Sameh Abdellatif, Ahmed Saad Gomaa Khalil: 'Enhancing the absorption capabilities of thin film solar cells using sandwiched light trapping Structures', Egypt, 8, 2015.
- [5] Meriem MESSAOUDI : 'Elaboration et Caractérisation de Couches Minces SnS ', UNIVERSITE DES FRERES MENTOURI-CONSTANTINE, 2016.
- [6] Mr SAHOUANE Nordine : 'Elaboration, Modélisation et Caractérisation des Cellules Solaires de type IIIème Génération dotées de Couches Antireflets à Indice Graduel', UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID – TLEMCEM, 2016.
- [7] Jean-François LELIEVRE : 'élaboration de SiN_x : H par PECVD : optimisation des propriétés optiques, passivantes et structurales pour application photovoltaïques', l'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2007.
- [8] Reflection and Fermat principle : Hyperphysics .phy-astr.gsu.edu/.../Fermat.
- [9] Dr Aissat ABDELKADER : 'optique optoélectronique', University Of Blida Département Of electronics.
- [10] Richard Taillet, optique physique : propagation de la lumière, de Boeck ,2006
- [11] Richard Taillet, Pascal Febvre, Loïc Villain : physique générale, de Boeck ,2009

[12] J.A. Savage: Infrared optical materials and their antireflection coatings, Adam Hilger ltd, 1985.

[13] Boubrik Nacer : ' comparaison des effets antireflets du SnO₂ et ZnO utilisé comme couches antireflet sur les propriétés de la cellule solaire a homo-jonction ', Université mouloud Mammeri de Ti ZI – Ouzo, 2013

[14] Rudolf Kingslake: A History of the photographic lens, academic press, 1989