

ETUDE DE MULTICOUCHES ANTIREFLETS DE SiN_y/SiO_x

Introduction

Ce chapitre est destiné à exposer les principaux résultats de l'étude des multicouches antireflets de SiN_y/SiO_x élaborées par pulvérisation cathodique magnétron en conditions réactives. Comme dans les chapitres précédents, plusieurs procédés de pulvérisation cathodique réactive seront utilisés pour étudier leurs impacts sur les caractéristiques des multicouches. Le but final sera d'élaborer des multicouches de SiN_y/SiO_x antireflets dans le visible, les plus performantes sur différents substrats.

La première partie a pour objectif de rappeler certains travaux marquants des multicouches antireflets. Le principe de fonctionnement d'une multicouche antireflet sera exposé pour permettre une meilleure configuration de celle-ci et pour mieux appréhender les différentes caractéristiques et propriétés de ces systèmes.

Dans la deuxième partie, nous présenterons le principe de fonctionnement du logiciel de simulation Essential Macleod et les simulations des couches minces de SiN_y et SiO_x précédemment élaborées en pulvérisation cathodique réactive. Ces simulations permettent d'une part de vérifier les aptitudes du logiciel de simulation et d'autre part, de confirmer les caractéristiques optiques de films de SiN_y et SiO_x.

Dans la troisième partie, l'étude de multicouches antireflets décrira leurs élaborations suivant les différents procédés de pulvérisation cathodique réactive retenus et leurs caractérisations optiques. Celle-ci permettra d'examiner l'effet des différents procédés et l'influence du nombre de couches empilées, sur les performances antireflets des multicouches.

La dernière partie fera l'objet d'une étude du comportement des multicouches antireflets réalisées sur différents substrats afin de déterminer les procédés de pulvérisation et les empilements les plus adaptés aux fonctions antireflets dans le domaine du visible.

1. Etude bibliographique des multicouches antireflets

1.1. Multicouches

Les systèmes multicouches peuvent présenter des propriétés optiques très différentes selon la nature et les propriétés des matériaux empilés et également selon le type d'empilement [98]. Ces empilements multicouches permettent de réaliser des fonctions optiques très variées : revêtement antireflet [99–103], miroir [104–107], filtre [108–110], polariseur [111–113]... L'étude des systèmes multicouches est réalisée avec le logiciel essentiel Macleod (cf. chapitre I, § 4.2) qui permet de calculer les propriétés optiques d'un empilement mais aussi de concevoir un empilement ayant des propriétés optiques déterminées. Dans le cadre de cette étude, l'objectif est de concevoir un revêtement antireflet capable de diminuer la réflexion dans les longueurs d'ondes du visible (400-750 nm) pour des applications telles que lunettes, pour des objectifs d'appareil photographie, montres ...

1.2. Propriétés optiques d'un substrat transparent

Un rayonnement lumineux est réfléchi, transmis et absorbé lorsqu'il se propage dans un nouveau milieu (cf. figure 4.1). Les directions des composantes réfléchies et transmises sont prévues par les lois de Snell-Descartes. Pour pouvoir déterminer l'intensité de chaque composante, il est nécessaire de connaître les indices optiques des milieux dans lesquels le rayonnement se propage.

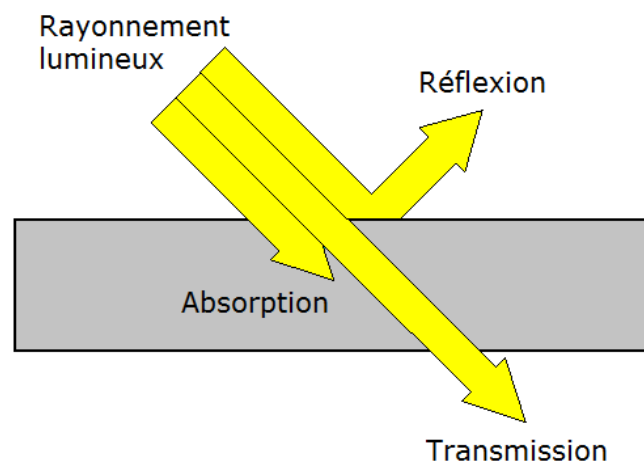


Figure 4.1 : Schéma de principe d'un rayonnement lumineux traversant un nouveau milieu.

Les intensités des composantes réfléchies et transmises du rayonnement à l'interface de deux milieux d'indice de réfraction différents sont déterminées grâce aux coefficients de Fresnel (cf. figure 4.2). Dans un cas simplifié, en incidence normale, pour une interface entre deux milieux

diélectriques, homogènes, isotropes, non absorbants, d'indices de réfraction différents n_1 et n_2 , les coefficients de réflexion (R) et de transmission (T) en énergie sont égaux à :

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}\right)^2 \quad T = \frac{4 \times n_1 \times n_2}{(n_1 + n_2)^2} \quad \text{avec } T + R = 1 \quad (\text{IV-1})$$

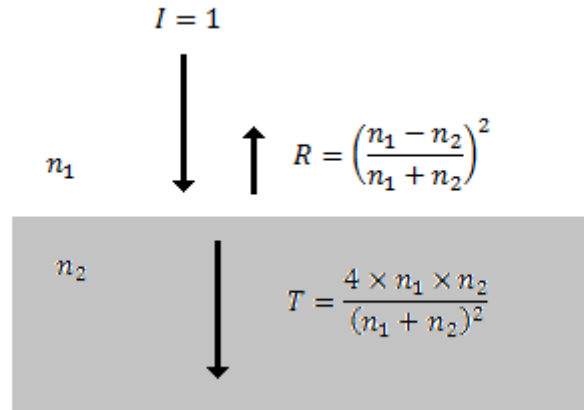


Figure 4.2 : Schéma représentant les coefficients de Fresnel en incidence normale.

Pour un rayonnement monochromatique se propageant dans l'air en direction d'un substrat transparent ayant un indice de réfraction $n = 1,5$, la réflexion totale (R_T) du substrat est égale à la réflexion de la face avant $R_{av} = 4 \%$ plus la réflexion de la face arrière $R_{ar} = 3,8 \%$ (les réflexions multiples étant négligeables inférieures à $0,006 \%$). La réflexion totale d'un substrat d'indice $n = 1,5$ est donc égale à $7,8\%$ de l'intensité du rayonnement initial. Remarque : pour les substrats transparents à haut indice de réfraction (supérieur à $1,8$), la réflexion de ces substrats peut atteindre plus de 15% .

1.3. Revêtement antireflet

Par définition, un revêtement antireflet est un traitement de surface permettant de diminuer la part de lumière réfléchi. La plupart de ces traitements consistent à déposer une ou plusieurs couches minces transparentes sur la surface de l'objet pour diminuer le coefficient de réflexion sur un spectre de longueur d'onde donnée. En 1935, le premier revêtement antireflet en couche mince est réalisé par Alexander Smakula travaillant chez Carl Zeiss Jena [114]. Il est constitué d'une couche mince et est basé sur la nature ondulatoire de la lumière. Le principe de ce revêtement antireflet, représenté dans la figure 4.3, est de créer des interférences destructives entre les ondes réfléchies aux deux interfaces (air-couche puis couche-substrat). Pour annuler la réflexion, il faut que l'onde réfléchi à l'interface air-couche soit en opposition de phase et de même amplitude que celle à l'interface couche-substrat. Pour avoir une opposition de phase entre les ondes réfléchies sur les deux interfaces, il faut que la différence de chemin optique entre les deux ondes soit égale à une demi-longueur d'onde. Il faut donc que l'épaisseur du revêtement corresponde à $\frac{\lambda}{4}$, puisque la couche est traversée deux fois par la seconde onde réfléchi. Pour avoir une amplitude identique,

dans le cas d'une incidence normale, la réflexion sur un dioptré dépendant directement de la différence des indices de réfraction des deux milieux, il faut que :

$$R_1 = R_2 \text{ soit } \left(\frac{n_a - n_1}{n_a + n_1} \right)^2 = \left(\frac{n_1 - n_s}{n_1 + n_s} \right)^2 .$$

où n_a correspond à l'indice de réfraction de l'air,

n_1 correspond à l'indice de réfraction de la couche,

n_s correspond à l'indice de réfraction du substrat.

L'indice de réfraction de la couche antireflets doit donc être de $n_1 = \sqrt{n_s}$.

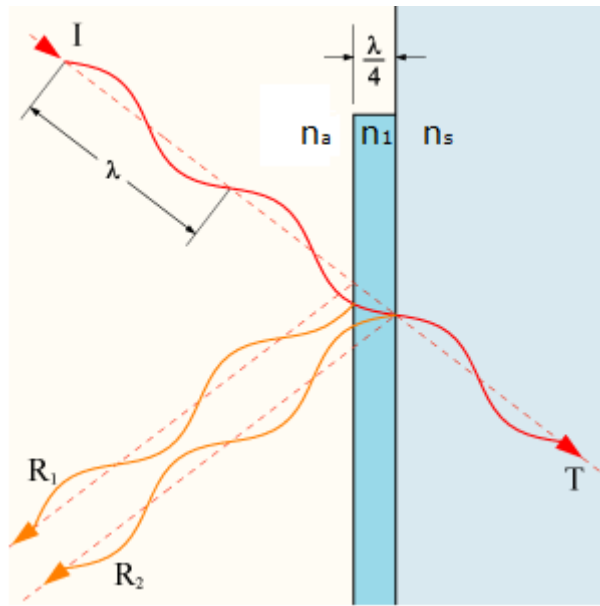


Figure 4.3 : Schéma de principe d'un traitement antireflet monocouche.

L'inconvénient de ce traitement antireflet monocouche est qu'une atténuation maximale de la réflexion n'est obtenue que pour seulement une longueur d'onde. Pour atténuer la réflexion sur une plage de longueur d'onde, il faut concevoir des traitements multicouches.

1.4. Empilements multicouches antireflets

Deux types d'empilements multicouches peuvent être envisagés pour réaliser un revêtement antireflet sur un substrat (cf. figure 4.1).

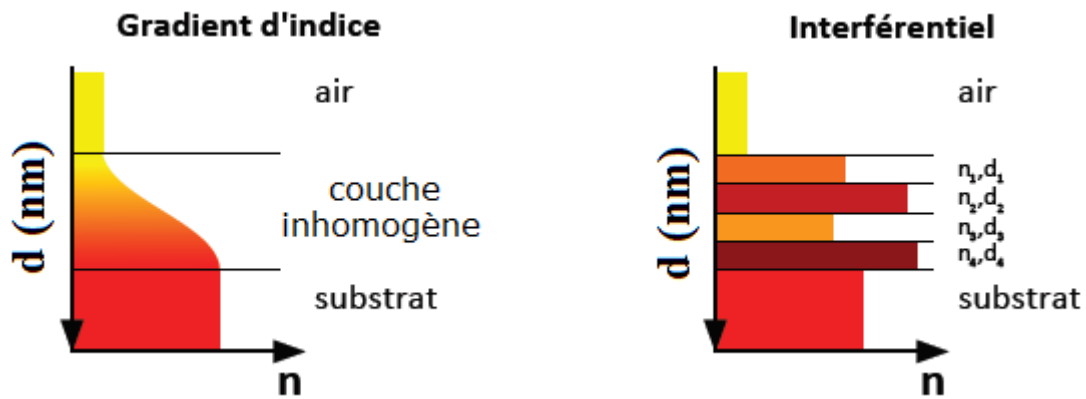


Figure 4.4 : Représentation schématique des deux types d'empilements (gradient d'indice et interférentiel) pour obtenir un traitement antireflet [115].

Le premier empilement, dit à gradient d'indice [103,116], est une couche dont l'indice de réfraction croît de l'extérieur vers le substrat. Le principe de ce type d'empilement est d'avoir un indice de réfraction qui varie progressivement entre celui de l'air ($n_a = 1$) et celui du substrat (n_s). Un faisceau traversant cet empilement est alors intégralement transmis car il ne rencontre pas d'interfaces (cf. figure 4.5). En pratique, le gradient d'indice peut être rendu discret et l'empilement antireflet est obtenu en réalisant un empilement de couches homogènes d'indice de réfraction de plus en plus bas de n_1 à n_2 (avec $n_1 \sim n_a$ et $n_2 \sim n_s$). Cette méthode d'empilement à gradient d'indice ne sera pas réalisée car il faut pouvoir déposer un matériau avec un indice de réfraction très proche de celui de l'air ($n_a = 1$). En revanche, les travaux de Xi et al. [96,103] grâce à l'élaboration d'un film de SiO_x ayant un indice de réfraction de $n_{633} = 1,05$, ont réussi à élaborer un empilement antireflet à gradient d'indice sur AlN permettant de diminuer la réflexion à moins de 0,5 % entre 574 et 1010 nm.

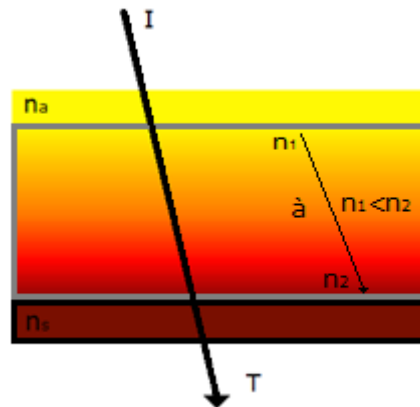


Figure 4.5 : Représentation schématique d'un faisceau traversant un empilement à gradient d'indice.

La seconde méthode, dite interférentielle, utilise un empilement de couches d'indices de réfraction différents et exploite les interférences destructives entre les faisceaux réfléchis sur les multiples dioptries [101,117–119]. Le principe de ce type d'empilements est d'exploiter les interférences destructives entre les faisceaux réfléchis sur les interfaces des couches à bas et à haut indice de réfraction (cf. figure 4.6). C'est ce type d'empilement qui sera mis en œuvre pour réaliser des multicouches antireflets grâce aux propriétés des couches minces de SiO_x et SiN_y déterminées

dans les chapitres précédents. L'optimisation de ces empilements antireflets sera réalisée à l'aide du logiciel de simulation Macleod [58].

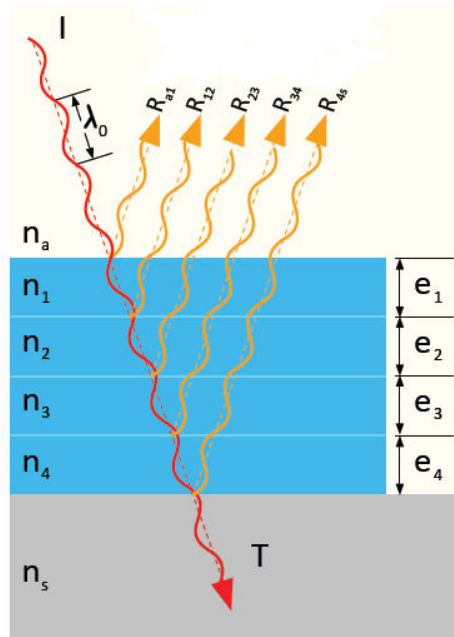


Figure 4.6 : Représentation schématique des réflexions successives aux différentes interfaces d'un empilement antireflet [115].

2. Comparaison des monocouches SiN_y et SiO_x simulées et expérimentales

Avant toute simulation de multicouches antireflets, le logiciel de simulation Macleod est testé pour se familiariser avec ses différents menus et d'autre part vérifier ses aptitudes à décrire des empilements antireflets. Dans un premier temps, nous présenterons le fonctionnement du logiciel Macleod. Puis, pour vérifier son bon fonctionnement et son utilité, la comparaison des monocouches de SiN_y et SiO_x simulées et expérimentales est réalisée. Les films de SiN_y correspondent aux couches choisies dans le chapitre II, § 2 et 3. Ils sont élaborés en pulvérisation cathodique réactive en mode conventionnel et RGPP. Les films de SiO_x correspondent aux couches choisies dans le chapitre III, § 2 et 4 élaborées en pulvérisation cathodique réactive en mode conventionnel et GLAD Moteur. Ces différentes couches testées seront celles utilisées pour élaborer les multicouches antireflets.

2.1. Logiciel Essential Macleod

Le logiciel Essential Macleod [57,58] est un logiciel complet pour la conception, l'analyse et la construction de revêtements aux propriétés optiques sélectives (cf. chap. I, § 4.2). Dans un premier temps, pour exploiter au mieux ce logiciel de simulation, il est impératif de lui intégrer les

propriétés optiques des films minces élaborés en pulvérisation cathodique réactive ainsi que celles des substrats utilisés. Ceci permettra d'une part, de vérifier les propriétés optiques déterminées précédemment en comparant les spectres de transmission et de réflexion simulés et expérimentaux et d'autre part, d'avoir un meilleur contrôle sur la conception et les propriétés optiques des revêtements conçus et envisagés avec le logiciel.

2.2. Etude des substrats

Les différents spectres de transmission et de réflexion expérimentaux (substrat, film/substrat et empilement/substrat) sont réalisés grâce aux modules de transmission et de réflexion (URA) à 8° du spectrophotomètre UV-visible-PIR lambda 950 (cf. chap. I, § 3.3). Les propriétés optiques des substrats et des films minces sont déterminées grâce au spectre de transmission et d'après la méthode de calcul de Swanepoel [40,41] (cf. chap. I, II et III). L'indice de réfraction (n) et le coefficient d'extinction (k) (calcul cf. chap. I, § 3.3.2) suivant la longueur d'onde (entre 200 et 1200 nm) des films et des substrats sont enregistrés dans le logiciel Macleod pour créer de nouveaux matériaux. Ces matériaux serviront comme base de données pour simuler les spectres de transmission et de réflexion puis pour concevoir et simuler les caractéristiques des empilements multicouches aux propriétés antireflets.

Les premières simulations réalisées sont celles des substrats utilisés lors de l'élaboration des films minces de SiN_y et SiO_x . Les figures 4.7 et 4.8 représentent les comparaisons entre les spectres de transmission et de réflexion simulés et expérimentaux des substrats de quartz et de saphir. Pour ces deux substrats, les spectres de transmission simulés et expérimentaux concordent. En revanche, les spectres de réflexion simulés présentent une réflexion légèrement supérieure (moins de 1 %) à celle des spectres expérimentaux. Cette légère sous-évaluation expérimentale peut être due à une très légère absorption du substrat ou à la rugosité de surface du substrat. En effet, en simulation, l'absorption des substrats est égale à 0, $T + R = 1$ alors que pour les mesures expérimentales, $T + R$ est légèrement inférieure à 1 (exemple : $T + R = 0,996$ à $\lambda = 633$ nm pour le substrat de quartz). Le quartz possède une transmission de 93 % et une réflexion de 7 % dans les longueurs d'onde du visible. Son indice de réfraction est de 1,46 à $\lambda = 633$ nm. Le saphir possède une transmission de 86 % et une réflexion de 14 % dans les longueurs d'onde du visible. Son indice de réfraction est de 1,77 à $\lambda = 633$ nm.

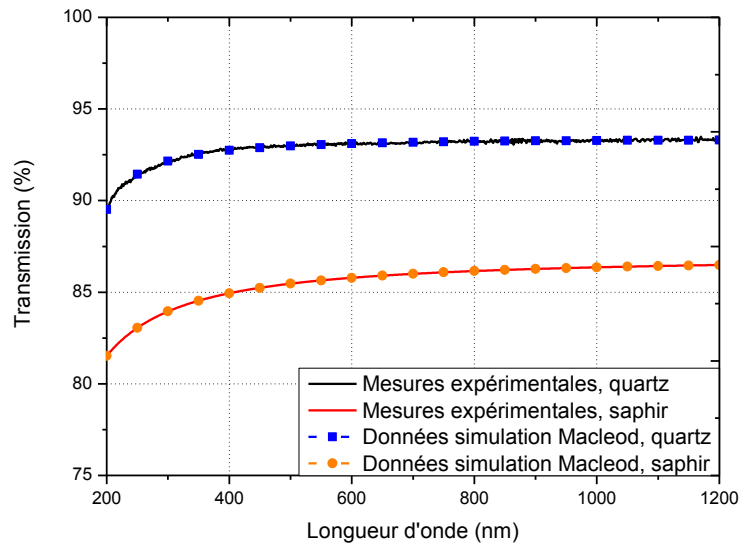


Figure 4.7 : Spectres de transmission simulés avec le logiciel Macleod et expérimentaux des substrats de quartz et de saphir en fonction de la longueur d'onde.

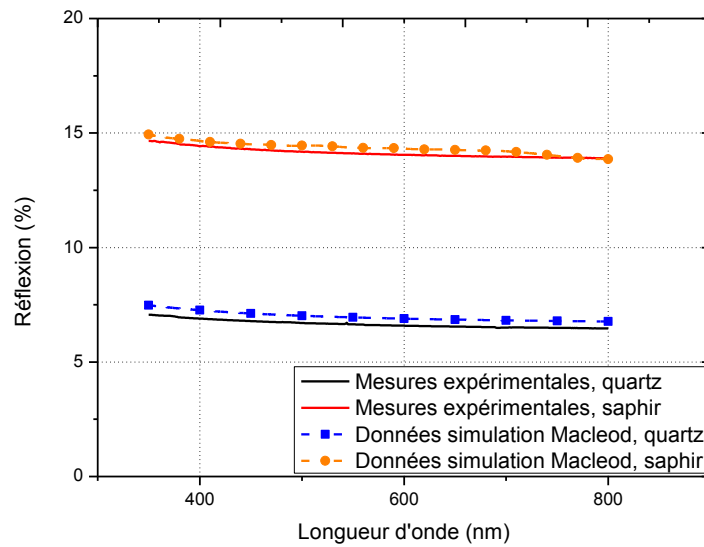


Figure 4.8 : Spectres de réflexion simulés avec le logiciel Macleod et expérimentaux des substrats de quartz et de saphir en fonction de la longueur d'onde.

2.3. Etude des monocouches de SiN_y sur quartz

Après vérification de la correspondance entre la simulation et les données expérimentales de la transmission et de la réflexion des substrats, les prochains essais de concordance simulation/expérience seront réalisés sur les couches minces de SiN_y . Le chapitre II a permis de mettre en évidence les conditions de dépôt les plus performantes pour avoir un indice de réfraction du SiN_y le plus élevé. Deux conditions de dépôt sont conservées pour réaliser la couche à haut indice de réfraction dans les systèmes multicouches antireflets. La première est une couche mince de SiN_y élaborée en pulvérisation cathodique réactive en procédé conventionnel, la seconde est élaborée en procédé RGPP.

- Procédé conventionnel

Les conditions de dépôt de la couche mince de SiN_y élaborée en pulvérisation cathodique réactive selon le procédé conventionnel (CP) sont : $P = 50 \text{ W}$, $Q_{\text{Ar}} = 3 \text{ sccm}$ et $Q_{\text{N}_2} = 0,5 \text{ sccm}$. Le dépôt est élaboré sur un substrat de quartz avec une épaisseur de 300 nm. L'indice de réfraction déterminé dans ces conditions de dépôt est de 2,07 à 633 nm et le coefficient d'extinction (k) est très faible ($5,7 \times 10^{-3}$). Les simulations des spectres de transmission et de réflexion utilisant le matériau SiN-CP réalisées dans les conditions précédemment citées, sont présentées dans la figure 4.9. Tant au niveau de la transmission que de la réflexion, les spectres simulés reproduisent fidèlement les spectres expérimentaux. Les positions des franges d'interférences et l'amplitude de celles-ci concordent entre l'expérience et la simulation.

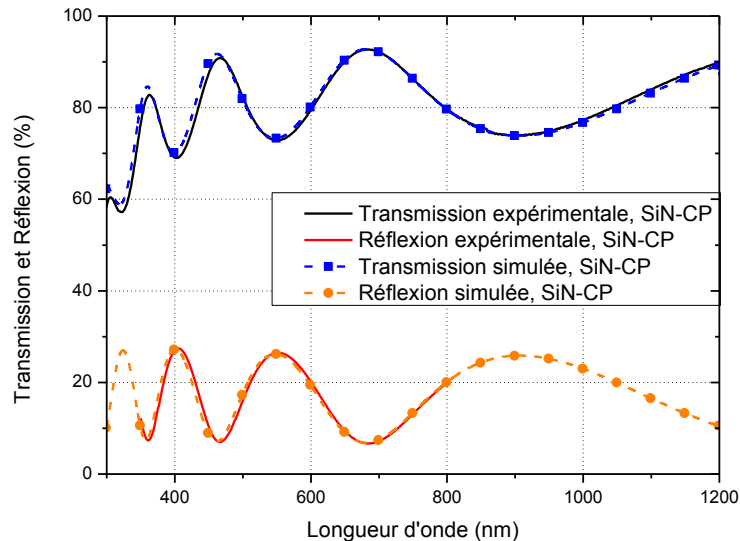


Figure 4.9 : Spectres de transmission et de réflexion simulés et expérimentaux d'une couche mince de SiN_y élaborée selon le procédé conventionnel sur quartz en fonction de la longueur d'onde.

Ces résultats permettent donc de vérifier que les propriétés optiques déterminées et enregistrées dans le logiciel de simulation pour cette couche mince sont en accord tant vis-à-vis de

l'indice de réfraction n que du coefficient d'extinction k . De plus, ces simulations permettent d'être plus précis sur l'épaisseur réelle de la couche mince déposée, comparé aux mesures effectuées au profilomètre et donc de calculer plus précisément la vitesse de dépôt des différents films. En effet, lors de la simulation, il est apparu que la position des franges d'interférences est très sensible à l'épaisseur du film. Augmenter ou diminuer de quelques nanomètres décale fortement la position des franges. Il est donc possible grâce au logiciel de simulation de déterminer l'épaisseur du film mince déposé avec une erreur inférieure à 1 nm. Cette méthode a donc été utilisée pour déterminer précisément les vitesses de dépôt des différents films SiN_y et SiO_x utilisés dans les empilements multicouches.

- Procédé RGPP

L'autre couche mince de SiN_y est élaborée en pulvérisation cathodique réactive en procédé RGPP avec les conditions de dépôt : $P = 50 \text{ W}$, $Q_{\text{Ar}} = 3 \text{ sccm}$ et Q_{N_2} pulsé avec un signal exponentiel : $T = 45 \text{ s}$, $t_{\text{ON}} = 10 \text{ s}$, $\tau_{\text{mou}} = 10 \text{ s}$, $Q_{\text{N}_2, \text{max}} = 1 \text{ sccm}$ et $Q_{\text{N}_2, \text{min}} = 0,3 \text{ sccm}$. Le dépôt appelé SiN-RGPP est élaboré sur un substrat de quartz avec une épaisseur de 325 nm. Dans ces conditions, l'indice de réfraction est de 2,21 et le coefficient d'extinction est de $5,7 \times 10^{-2}$, tous deux à $\lambda = 633 \text{ nm}$. La figure 4.10 représente les spectres de transmission et de réflexion simulés et expérimentaux du film mince SiN-RGPP. Il apparaît que les spectres simulés reproduisent fidèlement les spectres expérimentaux entre 400 et 1200 nm. Seule l'amplitude du spectre de transmission simulé entre 300 et 400 nm est un peu surévaluée par rapport à celui expérimental, sans qu'il y ait d'incidence sur le spectre de réflexion. Cette différence est due au coefficient d'extinction k légèrement sous-estimé pour ces longueurs d'onde.

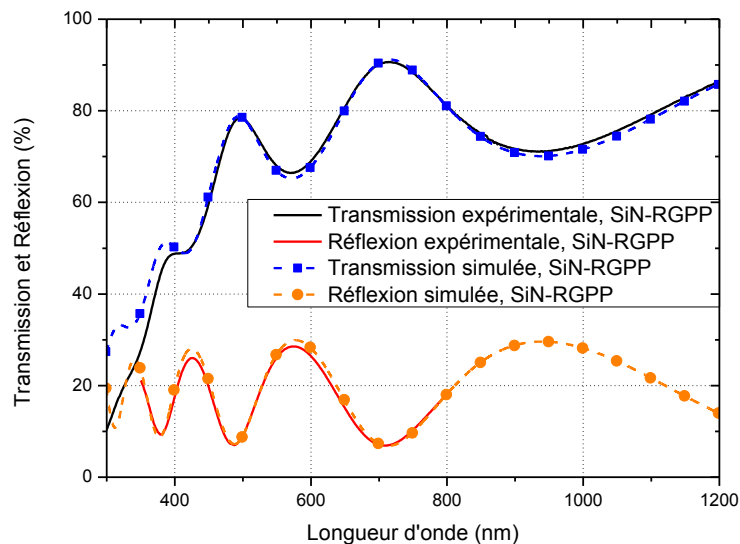


Figure 4.10 : Spectres de transmission et de réflexion simulés et expérimentaux d'une couche mince de SiN_y élaborée selon le procédé RGPP sur quartz en fonction de la longueur d'onde.

Pour une utilisation antireflet recherchée, ici dans le domaine du visible, les spectres sont en bon accord dans le domaine 400-1200 nm. L'indice de réfraction et le coefficient d'extinction semblent donc concorder.

2.4. Etude des monocouches de SiO_x sur saphir et quartz

Après vérification du parfait fonctionnement du logiciel de simulation pour les couches minces de SiN_y , des simulations sont réalisées sur celles de SiO_x . Le chapitre III a permis de mettre en évidence les meilleures conditions de dépôt pour avoir un indice de réfraction du SiO_x le plus bas. Deux conditions de dépôt sont conservées pour réaliser la couche à bas indice de réfraction dans les systèmes multicouches antireflets. La première couche mince de SiO_x est élaborée en pulvérisation cathodique réactive en procédé conventionnel. La seconde est élaborée en pulvérisation cathodique réactive selon le procédé GLAD Moteur.

- Procédé conventionnel

Les conditions de dépôt de la couche mince de SiO_x élaborée en pulvérisation cathodique réactive en procédé conventionnel sont : $P = 50 \text{ W}$, $Q_{\text{Ar}} = 3 \text{ sccm}$ et $Q_{\text{O}_2} = 0,5 \text{ sccm}$. L'indice de réfraction déterminé dans ces conditions de dépôt est de 1,48 à $\lambda = 633 \text{ nm}$ et le coefficient d'extinction est nul. Le dépôt est élaboré sur un substrat de saphir avec une épaisseur de 835 nm. Les simulations des spectres de transmission et de réflexion utilisant le matériau SiO-CP réalisées dans les conditions précédemment citées, sont présentées dans la figure 4.11. Les spectres simulés qu'ils soient de transmission ou de réflexion sont semblables aux spectres expérimentaux entre 400 et 1200 nm, tant au niveau des positions des franges d'interférences que sur l'amplitude de celles-ci. En revanche, entre 300 et 400 nm, les positions des franges d'interférences en transmission et en réflexion sont légèrement décalées sur ces longueurs d'onde. Ce décalage peut être dû soit à un indice de réfraction légèrement sous-estimé soit à une légère absorption du film + substrat dans ces longueurs d'onde.

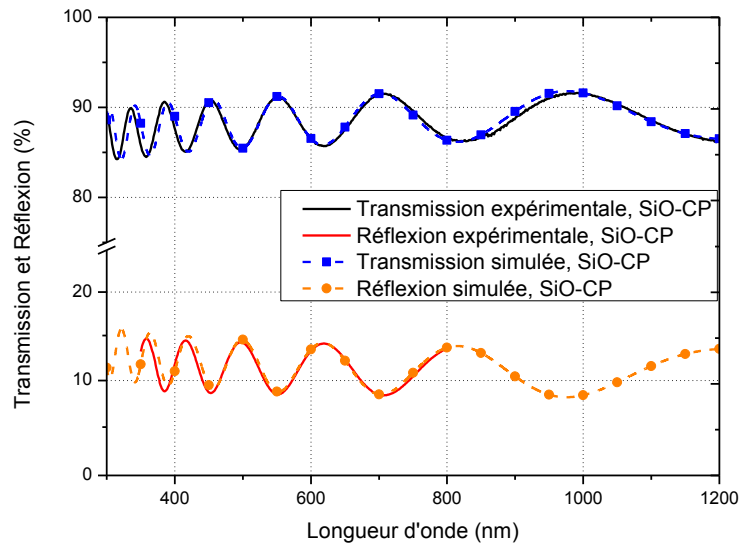


Figure 4.11 : Spectres de transmission et de réflexion simulés et expérimentaux d'une couche mince de SiO_x élaborée selon le procédé conventionnel sur saphir en fonction de la longueur d'onde.

Ces résultats permettent donc de vérifier que les propriétés optiques déterminées et enregistrées dans le logiciel de simulation pour la couche SiO-CP sont en accord tant vis-à-vis de l'indice n que du coefficient k dans le domaine 400-1200 nm

- Procédé GLAD

Les conditions de dépôt de la couche mince de SiO_x élaborée en pulvérisation cathodique réactive en procédé GLAD Moteur sont : $P = 160$ W, $Q_{\text{Ar}} = 3$ sccm, $Q_{\text{O}_2} = 0,75$ sccm. Les angles d'inclinaison du substrat par rapport au flux déposé sont maintenus successivement de $\alpha_M = 50^\circ$ pendant la moitié du temps de dépôt et à $\alpha_M = -50^\circ$ l'autre moitié. L'indice de réfraction déterminé pour ces conditions de dépôt est de 1,39 à $\lambda = 633$ nm et le coefficient d'extinction est nul. Le dépôt est élaboré sur un substrat de quartz avec une épaisseur de 400 nm. La figure 4.12 représente les spectres simulés et expérimentaux du film mince SiO-GLAD élaboré dans les conditions citées ci-dessus. Les spectres issus de simulations sont très proche des spectres expérimentaux. Les propriétés optiques déterminées et enregistrées dans le logiciel de simulation pour cette couche mince sont donc en accord tant vis-à-vis de l'indice de réfraction n que du coefficient d'extinction k .

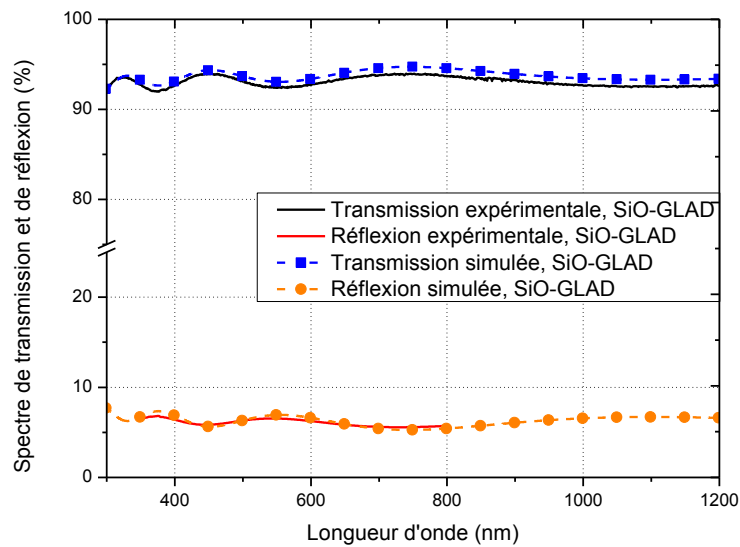


Figure 4.12 : Spectres de transmission et de réflexion simulés et expérimentaux d'une couche mince de SiO_x élaborée selon le procédé GLAD Moteur sur quartz en fonction de la longueur d'onde.

Ces différentes simulations ont permis de vérifier le fonctionnement du logiciel Macleod mais aussi la conformité des propriétés optiques des quatre matériaux étudiés. En effet, le logiciel Macleod a permis de simuler et reproduire efficacement les spectres expérimentaux dans les longueurs d'onde 400-1200 nm. De plus, il a permis de déterminer l'épaisseur réelle d'un film déposé avec une grande précision. Il sera donc essentiel dans l'étude et la conception de multicouches à propriétés antireflets en utilisant les propriétés optiques de ces quatre matériaux, SiO_x (CP et GLAD) et SiN_y (CP et RGPP).

3. Etude de multicouches antireflets suivant différents procédés de pulvérisation

Dans cette partie, l'étude portera sur la conception d'empilements multicouches antireflets dans le domaine des longueurs d'onde du visible (400-750 nm) sur un substrat de quartz. Ces différentes multicouches antireflets seront élaborées suivant les différents procédés de pulvérisation (CP, RGPP et GLAD). La conception de ces empilements se fera grâce au logiciel de simulation Macleod. Celle-ci est assez simple car les propriétés optiques réelles de nos matériaux élaborés en pulvérisation cathodique réactive sont enregistrées dans le logiciel de simulation. Il suffit de configurer les paramètres principaux qui sont :

- les propriétés optiques souhaitées pour l'empilement désiré (pourcentage de transmission ou de réflexion aux longueurs d'onde visées)
- le nombre de matériaux souhaité pour réaliser cet empilement
- la nature des matériaux utilisés et leurs propriétés optiques (indice n et k)

Ensuite, le logiciel étudie toutes les possibilités d'empilements et plus particulièrement l'ordre d'empilement des matériaux, le nombre d'alternances de chaque matériau et l'épaisseur de chaque couche individuelle. Le logiciel de simulation permettra donc de déterminer les meilleures configurations d'empilements se rapprochant le plus possible des propriétés optiques antireflets souhaitées. L'objectif dans cette partie est d'élaborer un empilement multicouche antireflet le plus performant possible dans le domaine du visible sur un substrat de quartz transparent. L'empilement antireflet devra donc minimiser la réflexion entre 400 à 750 nm tout en gardant le substrat transparent. Il est aussi recherché dans le milieu industriel l'élaboration d'un traitement antireflet incolore. Pour plus de clarté, une nomenclature a été adoptée comme suit :

ARXC-CP

où AR : signifie empilement antireflet,

XC : X correspond au nombre de couches de l'empilement,

CP : correspond au procédé de pulvérisation utilisé.

Quatre exemples possibles :

- AR4C-CP : antireflets 4 couches avec SiO_x et SiN_y élaborés en pulvérisation selon le procédé conventionnel.

- AR4C-RGPP : antireflets 4 couches avec SiO_x élaboré en pulvérisation selon le procédé conventionnel et SiN_y élaboré en pulvérisation selon le procédé RGPP.

- AR4C-GLAD : antireflets 4 couches avec SiO_x élaboré en pulvérisation selon le procédé GLAD Moteur et SiN_y élaboré en pulvérisation selon le procédé conventionnel.

- AR4C-GLAD&RGPP : antireflets 4 couches avec SiO_x élaboré en pulvérisation selon le procédé GLAD Moteur et SiN_y élaboré en pulvérisation selon le procédé RGPP.

Pour la conception de toutes les multicouches, le protocole expérimental a été le suivant :

- Décapage de la cible (puissance de 50 W) et du substrat (tension de - 200 V) sous un plasma d'argon avec un débit de 3 sccm pendant 10 min. Après 5 minutes de pulvérisation dans les conditions de dépôt souhaitées, le cache est retiré.

- Puis, pour chaque couche, à la fin du dépôt, le cache est remis, l'introduction du gaz réactif est arrêté, la puissance remise à 50 W sous un plasma d'argon avec un débit de 3 sccm pendant 10 min pour décaper la cible et après 5 minutes de pulvérisation dans les conditions de dépôt souhaitées, le cache est retiré.

De plus, pour avoir un ordre de grandeur de la réflexion des multicouches et pouvoir comparer les performances de l'antireflet réalisé, une réflexion moyenne (R_m) est calculée correspondant à la moyenne des valeurs de réflexion tous les 1 nm entre 400 et 750 nm donc à l'équation suivante :

$$R_m = \frac{R_{400\text{nm}} + \dots + R_{750\text{nm}}}{351} \quad (\text{IV-2})$$

3.1. Etude par procédé CP

Les premiers tests d'empilements antireflets sont réalisés à partir des couches minces de SiN_y et SiO_x élaborées en pulvérisation cathodique réactive selon le procédé conventionnel (SiN-CP et SiO-CP). Ce paragraphe est consacré à l'influence du nombre de couches SiN_y et SiO_x présentes dans l'empilement multicouche sur les propriétés optiques globales du système sur un substrat de quartz. Plus particulièrement, les spectres de réflexion simulés pour les différents empilements multicouches sont comparés aux spectres de réflexion mesurés expérimentalement pour les mêmes empilements réalisés par pulvérisation cathodique selon le procédé conventionnel.

3.1.1. Simulations multicouches antireflets

Dans un premier temps, des simulations avec le logiciel Macleod ont été effectuées pour concevoir un empilement multicouche antireflet le plus performant possible dans le domaine du visible. Le protocole de simulation utilisé a donc nécessité les exigences suivantes :

- utilisation des matériaux SiO-CP et SiN-CP sur un substrat de quartz,
- un spectre de réflexion égal à zéro entre 390 à 760 nm,
- un nombre de couches maximal égal à 10.

La figure 4.13 présente schématiquement différents empilements antireflets à 2, 4, 5 et 10 couches, optimisés par le logiciel Macleod. Pour ces empilements, l'épaisseur des couches varie de 7 à 138 nm et l'empilement se termine toujours par une couche de SiO-CP de 88 nm d'épaisseur.

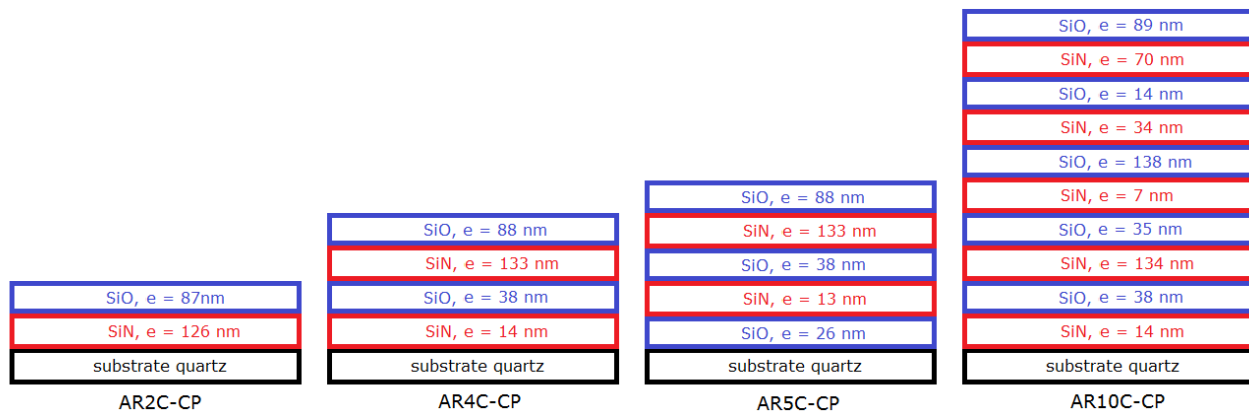


Figure 4.13 : Schémas des empilements multicouches antireflets conçus et simulés par le logiciel Macleod avec les propriétés optiques des matériaux SiO-CP et SiN-CP sur quartz.

Les différents spectres de réflexion simulés de ces empilements antireflets élaborés en procédé conventionnel sont représentés dans la figure 4.14. Le spectre de réflexion du substrat de quartz est stable dans le domaine du visible (400-750 nm) avec une réflexion moyenne de 6,9 %. Il apparaît une forte diminution de la réflexion pour les empilements possédant un nombre de couches

supérieur ou égal à 4. En effet, les spectres de réflexion simulés de ces empilements (AR4C-CP, AR5C-CP et AR10C-CP) montrent une réflexion quasiment constante d'environ 4 % entre 400 et 750 nm avec une augmentation rapide avant et après ces longueurs d'onde. L'antireflet pour l'empilement AR2C-CP est moins efficace. Son spectre de réflexion a la forme d'un W et la réflexion varie entre 3,5 et 7,5 % dans le domaine du visible. D'après les simulations, avec les matériaux SiO-CP et SiN-CP, il faut concevoir un empilement d'au moins 4 couches pour avoir une réflexion la plus faible possible dans le domaine du visible. En revanche, à partir d'un empilement 4 couches, augmenter encore le nombre de couches n'influe pas significativement la valeur de la réflexion sauf pour $\lambda < 420$ nm et $\lambda > 720$ nm

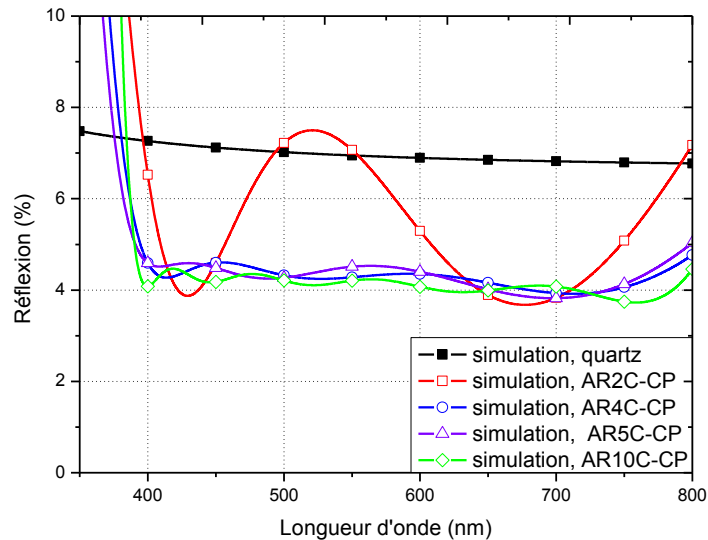


Figure 4.14 : Comparaison des spectres de réflexion simulés en fonction de la longueur d'onde pour les empilements multicouches antireflets élaborés en procédé conventionnel sur quartz.

3.1.2. Multicouches antireflets 2 couches (AR2C-CP)

Le premier empilement multicouche simulé et élaboré sur quartz se compose de deux couches minces, l'une de SiN-CP de 126 nm et l'autre de SiO-CP de 87 nm. Pour élaborer cet empilement, la couche de SiN-CP est déposée pendant 1081 s et celle de SiO-CP pendant 1081 s également.

La figure 4.15 présente les spectres de réflexion simulés et expérimentaux de l'empilement AR2C-CP déposé sur quartz. La simulation 1 correspond à la simulation de l'empilement Quartz / SiN-CP (126 nm) / SiO-CP (87 nm) tandis que la simulation 2 correspond à la simulation de l'empilement avec des épaisseurs augmentées de 3%, soit Quartz / SiN-CP (130 nm) / SiO-CP (90 nm). Il apparaît que l'allure du spectre de réflexion de la multicouche expérimentale est similaire à celui de la simulation 1 mais décalé vers les faibles longueurs d'onde. Ce décalage est dû à une épaisseur plus importante des couches SiN-CP et SiO-CP expérimentalement. D'après la simulation 2, le spectre de réflexion étant semblable à celui expérimental, cette surépaisseur est estimée à environ 3% pour les deux couches minces (soit SiN-CP = 130nm et SiO-CP = 90 nm). La réflexion moyenne (R_m) de cet empilement AR2C-CP expérimental est calculée à 5,25 %. En comparaison, la

valeur R_m du substrat de quartz est de 6,7 %. Cet empilement permet donc bien de diminuer la réflexion dans le domaine du visible. De plus, ce premier empilement a permis de voir l'utilité du logiciel Macleod pour concevoir et prédire les propriétés optiques des empilements multicouches souhaités.

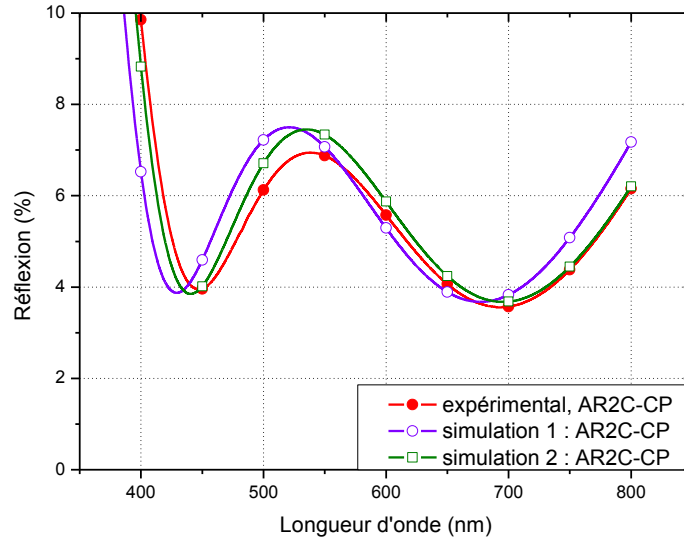


Figure 4.15 : Spectres de réflexion simulés et expérimentaux en fonction de la longueur d'onde du substrat pour la multicouche AR2C-CP déposée sur quartz.

3.1.3. Multicouches antireflets 4 couches (AR4C-CP)

Pour améliorer les propriétés antireflets, le nombre de couches dans l'empilement est augmenté à quatre couches. La multicouche AR4C-CP est constituée comme suit : Quartz / SiN-CP (14 nm) / SiO-CP (38 nm) / SiN-CP (133 nm) / SiO-CP (88 nm). Pour l'élaboration de cet empilement, le temps de dépôt des couches est déterminé à : Quartz / $\text{SiN}_y = 112$ s / $\text{SiO}_x = 311$ s / $\text{SiN}_y = 1051$ s / $\text{SiO}_x = 1025$ s.

La comparaison entre les spectres de réflexions simulés et expérimentaux est représentée dans la figure 4.16. Le spectre de réflexion de la multicouche AR4C-CP expérimental ressemble à celui simulé entre 500 et 800 nm. En revanche, entre 500 et 400 nm, la réflexion expérimentale diminue légèrement ce qui est contraire à la simulation. Ce désaccord peut être du soit à la rugosité de surface des différentes couches, soit à la formation d'une couche d'oxynitride de silicium aux interfaces $\text{SiN}_y/\text{SiO}_x$. La réflexion expérimentale est toujours plus faible que celle simulée. Cette diminution de réflexion provient du substrat qui a déjà une différence de réflexion entre les spectres simulé et expérimental (cf. partie 2.2). Au final, cet empilement possède une faible réflexion sur toutes les longueurs d'onde du visible avec une valeur moyenne R_m de 3,9 %. Augmenter le nombre de couches dans l'empilement multicouches permet donc d'améliorer les performances antireflets.

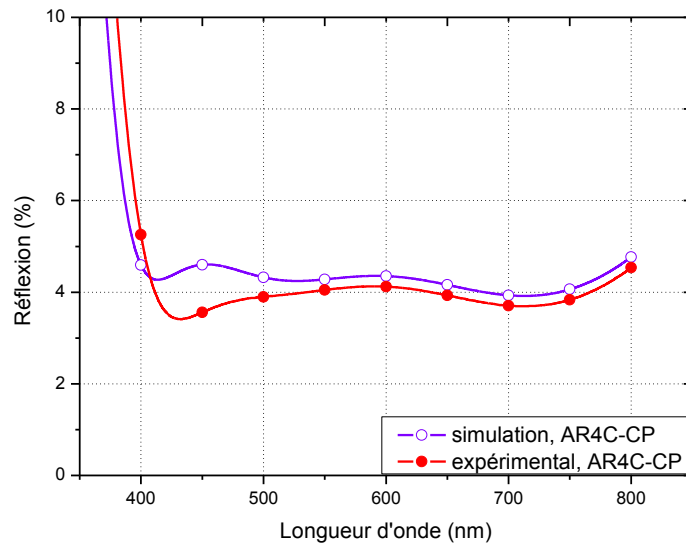


Figure 4.16 : Spectres de réflexion simulés et expérimentaux en fonction de la longueur d'onde du substrat pour la multicouche AR4C-CP déposée sur quartz.

3.1.4. Multicouches antireflets 5 couches (AR5C-CP)

Les performances antireflets de la multicouche AR4C-CP étant excellentes, un empilement cinq couches est réalisé pour essayer d'améliorer encore le système. La multicouche AR5C-CP est constituée du substrat de Quartz / SiO_x -CP (26 nm) / SiN_y -CP (13 nm) / SiO_x -CP (38 nm) / SiN_y -CP (133 nm) / SiO_x -CP (88 nm). Pour l'élaboration de cet empilement, le temps de dépôt des couches est déterminé à : $\text{SiO}_x = 299$ s / $\text{SiN}_y = 108$ s / $\text{SiO}_x = 435$ s / $\text{SiN}_y = 1051$ s / $\text{SiO}_x = 1024$ s.

La figure 4.17 présente les différents spectres de réflexion simulés et expérimentaux dans les longueurs d'onde du visible de la multicouche AR5C-CP déposée sur quartz. La simulation 1 correspond à la simulation de la multicouche avec les épaisseurs initiales tandis que la simulation 2 correspond à la simulation de la multicouche avec les épaisseurs augmentées de 3% (Quartz / SiO_x -CP (27 nm) / SiN_y -CP (14 nm) / SiO_x -CP (39 nm) / SiN_y -CP (137 nm) / SiO_x -CP (91 nm).

L'augmentation d'un pourcentage identique de l'épaisseur de chaque couche permet de décaler l'ensemble du spectre de réflexion vers les longueurs d'onde élevées (simulation 1 comparée à la simulation 2). L'allure générale, entre 550 et 800 nm, du spectre de réflexion de l'empilement AR5C-CP est similaire (avec une réflexion générale proche de 4 %) à celui de la simulation 2. Il y a donc une sous-estimation de la vitesse de dépôt des couches de SiN_y et SiO_x , ce qui provoque une augmentation des épaisseurs de chaque couche expérimentale (soit un décalage du spectre de réflexion vers les longueurs d'onde élevées comparé à la simulation 1). Comme dans l'empilement AR4C-CP, la réflexion expérimentale diminue entre 425 et 525 nm alors que la simulation prévoyait une réflexion augmentée, attribuée à une couche de SiO_xN_y aux interfaces et/ou la rugosité des différentes couches.

Au final, pour cet empilement multicouche, la réflexion moyenne $R_m = 4$ % soit un peu plus élevée que l'empilement à 4 couches. Il apparaît donc que l'augmentation du nombre de couches n'améliore pas les propriétés antireflets moyenne de la multicouche. En revanche, plus le nombre de couches

augmente, plus il est difficile de contrôler l'élaboration des multicouches. L'empilement multicouche (AR10C-CP) déterminé en simulation ne sera donc pas réalisé.

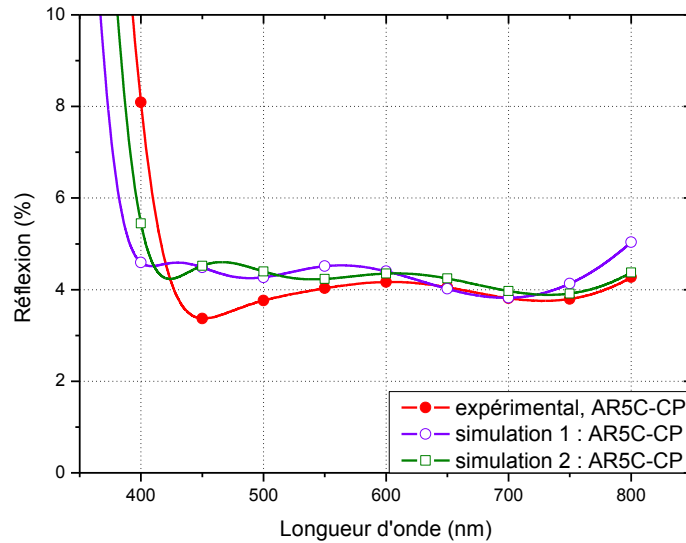


Figure 4.17 : Spectres de réflexion simulés et expérimentaux en fonction de la longueur d'onde du substrat pour la multicouche AR5C-CP déposée sur quartz.

3.1.5. Comparaison multicouches antireflets

Les résultats précédents ont permis de déterminer et comparer les propriétés antireflets des empilements simulés et expérimentaux. Le logiciel de simulation permet donc de prédire assez fidèlement les propriétés optiques des multicouches et surtout de concevoir les empilements de ces multicouches élaborés en procédé conventionnel. Le tableau 4.5 présente les différents empilements élaborés en procédé conventionnel. Pour les trois multicouches, les deux dernières couches déposées correspondent systématiquement à une couche de SiN-CP puis de SiO-CP de forte épaisseur ($\text{SiN}_y = 130 \text{ nm}$ et $\text{SiO}_x = 88 \text{ nm}$).

Multicouches Matériaux	AR2C-CP	AR4C-CP	AR5C-CP
	Air	Air	Air
SiO-CP	87	88	88
SiN-CP	126	133	133
SiO-CP		38	38
SiN-CP		14	13
SiO-CP			26
Substrat	Quartz		

Tableau 4.1 : Comparaison des configurations des multicouches antireflets élaborées en procédé conventionnel.

La comparaison des spectres de réflexion expérimentaux des empilements antireflets élaborés en procédé conventionnel est représentée dans la figure 4.18. Les propriétés antireflets de l'empilement AR2C sont médiocres ($R_m = 5,25 \%$) comparées à celles des empilements AR4C et

AR5C qui sont meilleures ($R_m = 4 \%$). Le passage à un empilement quatre couches permet d'améliorer significativement les propriétés antireflets du revêtement. Sachant que les propriétés optiques expérimentales sont en concordance avec les propriétés optiques simulées, des simulations ont été réalisées en augmentant encore le nombre de couches dans l'empilement. Les résultats montrent une stagnation de la réflexion autour de 4 % dans les longueurs d'onde du visible. Cette stagnation est due au fait que le traitement est réalisé sur seulement une face du quartz alors que le quartz est transparent. Le revêtement ne permet donc pas de minimiser la réflexion provoquée par la face arrière du substrat. La meilleure multicouche élaborée en procédé conventionnel est donc l'AR4C-CP possédant une réflexion moyenne de 3,9 %. La réflexion totale du quartz étant de 6,9 %, la réflexion de la face avant est de 3,5 % et celle de la face arrière de 3,4 %. Le revêtement étant réalisé seulement sur la face avant du substrat, il sera donc difficile d'améliorer les performances antireflets de cet empilement avec les propriétés optiques des films minces de SiN_y et SiO_x élaborés en pulvérisation cathodique réactive par procédé conventionnel.

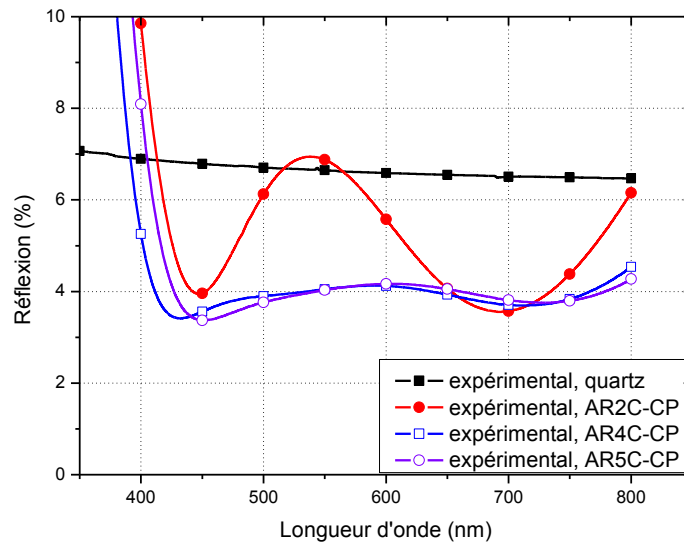


Figure 4.18 : Comparaison des spectres de réflexion expérimentaux en fonction de la longueur d'onde, pour le substrat de quartz et les empilements multicouches antireflets élaborés en procédé conventionnel déposés sur quartz.

3.2. Etude par procédé RGPP

Les propriétés optiques des empilements élaborés en procédé conventionnel ne permettent plus d'améliorer les performances antireflets. Les nouveaux empilements seront réalisés en pulvérisation cathodique réactive par procédé RGPP pour la couche de SiN_y . Quant à la couche de SiO_x , elle restera élaborée selon le procédé conventionnel. L'indice de réfraction de la couche de SiN -RGPP étant plus élevé (soit 2,2 à $\lambda = 633 \text{ nm}$), les propriétés antireflets devraient pouvoir être améliorées.

3.2.1. Simulations multicouches antireflets

De la même manière que précédemment, des simulations avec le logiciel Macleod ont été effectuées pour concevoir un empilement multicouche antireflet le plus performant possible dans le domaine du visible. Le protocole de simulation utilisé a donc nécessité les exigences suivantes :

- utilisation des matériaux SiO-CP et SiN-RGPP sur un substrat de quartz,
- un spectre de réflexion égal à zéro entre 390 à 760 nm,
- un nombre de couches maximal égal à 10.

La figure 4.19 présente schématiquement différents empilements antireflets à 2, 4, 5 et 8 couches, optimisés par le logiciel Macleod. Pour ces empilements, l'épaisseur des couches varie de 6 à 146 nm et l'empilement se termine toujours par une couche de SiO-CP d'environ 87 nm d'épaisseur.

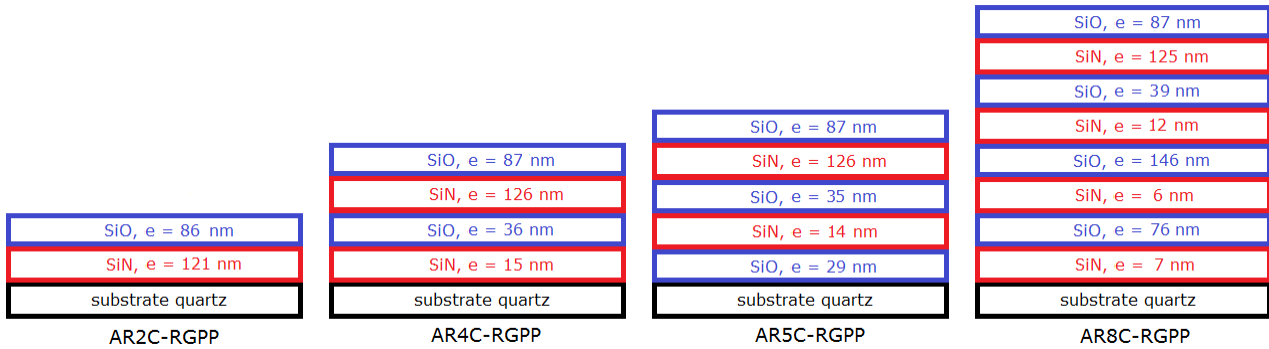


Figure 4.19 : Schémas des empilements multicouches antireflets conçus et simulés par le logiciel Macleod avec les propriétés optiques des matériaux SiO-CP et SiN-RGPP sur quartz.

Les différents spectres de réflexion simulés de ces empilements antireflets élaborés en procédé RGPP sont représentés dans la figure 4.20. Le spectre de réflexion du substrat de quartz est stable dans le domaine du visible (400-750 nm) avec une réflexion moyenne de 6,9 %. Comme les simulations des empilements multicouches élaborées en procédé conventionnel, l'empilement bicouche (AR2C-RGPP) a un spectre de réflexion de la forme d'un W mais la réflexion est légèrement plus faible (elle varie entre 3,5 à 6,5 % dans le domaine du visible). Il apparaît à partir de l'empilement 4 couches, une forte diminution de la réflexion. Les spectres de réflexion simulés de ces empilements (AR4C-RGPP, AR5C-RGPP et AR8C-RGPP) montrent une réflexion stable légèrement inférieure à 4 % entre 400 et 750 nm avec une augmentation rapide de la réflexion avant et après ces longueurs d'onde. En revanche, à partir de l'empilement AR4C-RGPP, la réflexion reste quasiment la même quel que soit le nombre de couches ajoutées. Après les tests effectués dans le paragraphe précédent et les simulations, l'étude portera donc uniquement sur l'élaboration de l'empilement AR4C-RGPP.

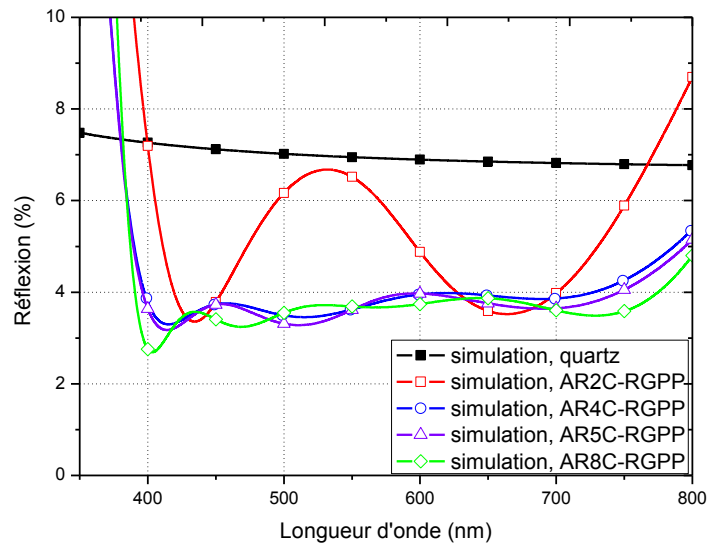


Figure 4.20 : Comparaison des spectres de réflexion simulés en fonction de la longueur d'onde pour les empilements multicouches antireflets élaborés en procédé RGPP sur quartz.

3.2.2. Multicouches antireflets 4 couches (AR4C-RGPP)

La structure de l'empilement AR4C-RGPP a donc été optimisée avec le logiciel Macleod pour élaborer l'antireflet le plus performant possible. Cet empilement est constitué comme suit : Quartz / SiN -RGPP (14 nm) / SiO -CP (36 nm) / SiN -RGPP (126 nm) / SiO -CP (87 nm). Pour l'élaboration de cet empilement, le temps de dépôt des couches est déterminé à : $\text{SiN}_y = 119$ s / $\text{SiO}_x = 470$ s / $\text{SiN}_y = 1040$ s / $\text{SiO}_x = 1142$ s.

La figure 4.21 présente les spectres de réflexion simulés et expérimentaux de l'empilement AR4C-RGPP déposé sur quartz. Pour cette multicouche, il apparaît un écart entre la réflexion simulée et expérimentale entre 400 et 700 nm. Pour les longueurs d'onde de 500 à 400 nm, la réflexion expérimentale diminue alors que la simulation prédit une augmentation de la réflexion. Comme pour les empilements élaborés en procédé CP, cette différence peut être due soit à la rugosité de surface des différentes couches, soit à la formation d'une couche d'oxynitride de silicium aux interfaces $\text{SiN}_y/\text{SiO}_x$. Pour les longueurs d'onde comprises entre 550 à 700 nm, la diminution de la réflexion de l'empilement expérimental, comparée à la réflexion simulée peut être due à l'absorption du substrat. Au final, la réflexion de l'échantillon AR4C-RGPP diminue à environ 2,3 % à 430 nm pour remonter progressivement à 4 % à 725 nm. La réflexion moyenne calculée pour cet empilement est de 3,3 %. Grâce à l'indice de réfraction plus élevé du SiN_y élaboré en RGPP (2,2 au lieu de 2,07 à $\lambda = 633$ nm), l'écart entre les deux indices de réfraction des couches minces de SiO_x et de SiN_y est plus important. Ceci permet d'élaborer un antireflet plus performant dans le domaine du visible mais sur une gamme de longueurs d'onde plus faible. En effet, pour cet empilement, le spectre de réflexion augmente rapidement au-delà de 700 nm alors que pour l'empilement AR4C-CP, le spectre de réflexion augmentait au-delà de 780 nm.

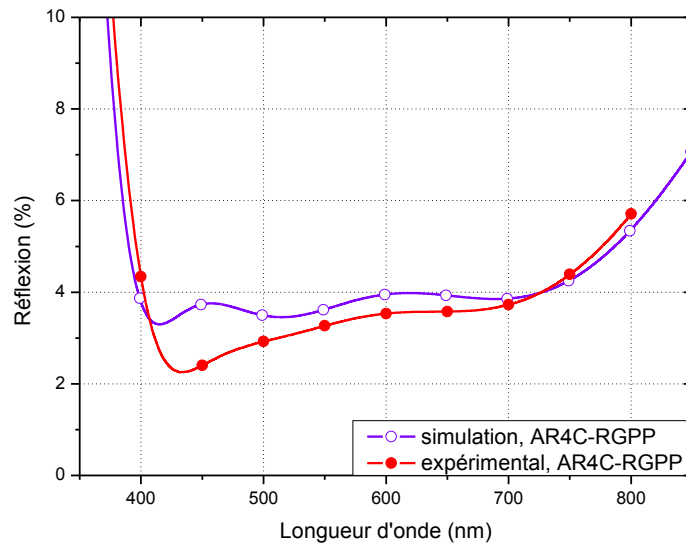


Figure 4.21 : Spectres de réflexion simulé et expérimental en fonction de la longueur d'onde du substrat pour la multicouche AR4C-RGPP déposée sur quartz.

3.3. Etude par procédé GLAD

Les performances antireflets des empilements multicouches élaborés avec SiN_y en procédé RGPP étant déterminées, de nouveaux empilements antireflets sont donc réalisés en pulvérisation cathodique réactive en utilisant le procédé GLAD Moteur pour la couche de SiO_x . La couche de SiN_y sera élaborée en procédé conventionnel. L'indice de réfraction de la couche de SiO_x élaborée en GLAD étant plus faible (1,39 à $\lambda = 633$ nm), les propriétés antireflets devraient donc pouvoir être améliorées.

3.3.1. Simulations multicouches antireflets

De la même manière que précédemment, des simulations avec le logiciel Macleod ont été effectuées pour concevoir un empilement multicouche antireflet le plus performant possible dans le domaine du visible. Le protocole de simulation utilisé a donc nécessité les exigences suivantes :

- utilisation des matériaux SiO -GLAD et SiN -CP sur un substrat de quartz,
- un spectre de réflexion égal à zéro entre 390 à 760 nm,
- un nombre de couches maximal égal à 10.

La figure 4.22 présente schématiquement différents empilements antireflets à 2, 4, 5 et 8 couches, optimisés par le logiciel Macleod. Pour ces empilements, l'épaisseur des couches varie de 8 à 136 nm et l'empilement se termine toujours par une couche de SiO -GLAD d'environ 95 nm d'épaisseur.

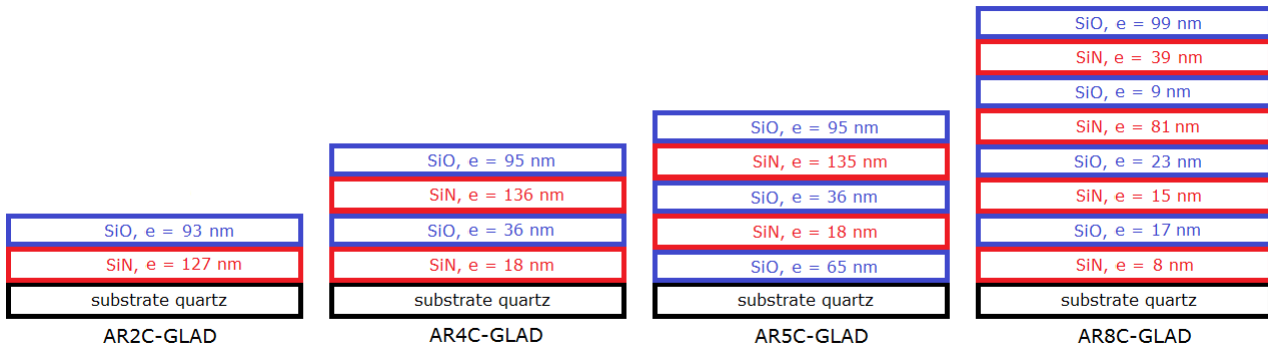


Figure 4.22 : Schémas des empilements multicouches antireflets conçus et simulés par le logiciel Macleod avec les propriétés optiques des matériaux SiO-GLAD et SiN-CP sur quartz.

Les différents spectres de réflexion simulés de ces empilements antireflets élaborés en procédé GLAD sont représentés dans la figure 4.23. Le spectre de réflexion du substrat de quartz est stable dans le domaine du visible (400-750 nm) avec une réflexion moyenne de 6,9 %. Comme les simulations des empilements multicouches élaborés en procédé conventionnel et RGPP, l'empilement bicouche (AR2C-GLAD) possède un spectre de réflexion de la forme d'un W. En revanche, sa réflexion est plus faible (de 4 à 5,75 % entre 425 et 725 nm). De même, il apparait une forte diminution de la réflexion à partir des empilements 4 couches. Les spectres de réflexion simulés de ces empilements (AR4C-GLAD, AR5C-GLAD et AR8C-GLAD) montrent une réflexion constante et inférieure à 4 % entre 400 et 750 nm quel que soit type d'empilements. Dans la suite de l'étude, seul l'empilement AR4C-GLAD sera élaboré.

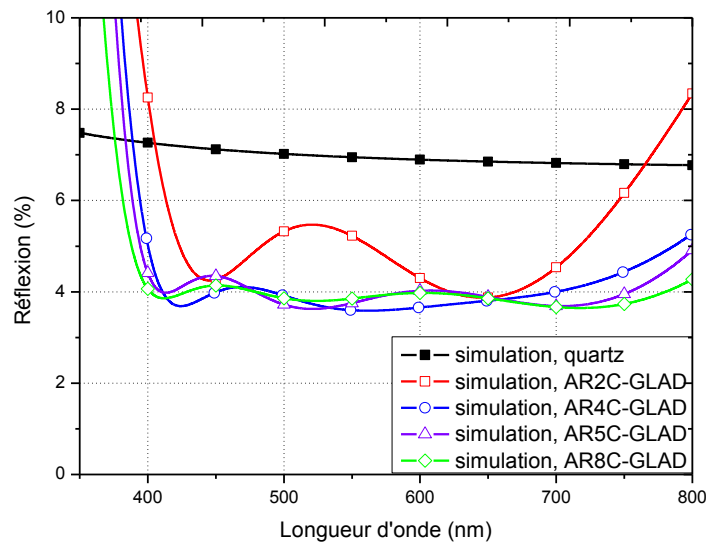


Figure 4.23 : Comparaison des spectres de réflexion simulés en fonction de la longueur d'onde pour les empilements multicouches antireflets élaborés en procédé GLAD sur quartz.

3.3.2. Multicouches antireflets 4 couches (AR4C-GLAD)

L'empilement multicouche antireflet optimisé avec le logiciel Macleod sera donc un empilement quatre couches (AR4C-GLAD). Cet empilement est constitué comme suit : Quartz / SiN-CP (18 nm) / SiO-GLAD (36 nm) / SiN-CP (136 nm) / SiO-GLAD (95 nm). Pour l'élaboration de cet empilement, le temps de dépôt des couches est déterminé à : $\text{SiN}_y = 136 \text{ s}$ / $\text{SiO}_x = 654 \text{ s}$ / $\text{SiN}_y = 1017 \text{ s}$ / $\text{SiO}_x = 1701 \text{ s}$.

La figure 4.24 présente les spectres de réflexion simulés et expérimentaux de l'empilement AR4C-GLAD. Pour cet empilement, le spectre de réflexion expérimental est similaire à celui simulé. Seul le seuil de réflexion est décalé vers les longueurs d'onde plus élevées pour l'empilement expérimental (440 nm au lieu de 420 nm en simulation). Cette différence peut provenir de la rugosité de surface et de la formation de couches SiO_xN_y aux interfaces $\text{SiO}_x/\text{SiN}_y$. Grâce aux propriétés optiques du SiO_x élaboré en GLAD, la réflexion de l'empilement AR4C-GLAD reste quasiment constante et proche de 3,7 % entre 440 et 700 nm. La réflexion moyenne est égale à 3,8 %. Comme pour l'AR4C-RGPP, l'écart plus important entre l'indice de réfraction du SiO-GLAD et du SiN-CP permet d'élaborer un empilement multicouche antireflet plus performant mais sur un domaine de longueurs d'onde plus faible (440 à 700 nm) comparé à l'AR4C-CP.

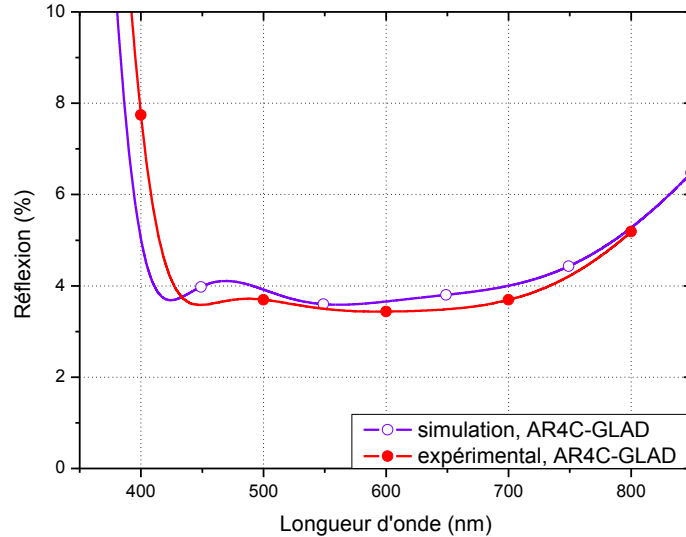


Figure 4.24 : Spectres de réflexion simulé et expérimental en fonction de la longueur d'onde du substrat pour la multicouche AR4C-GLAD déposée sur quartz.

3.4. Etude par procédés GLAD & RGPP

De nouveaux empilements multicouches antireflets sont simulés et élaborés en pulvérisation cathodique réactive, par la technique GLAD Moteur pour la couche de SiO_x et selon le procédé RGPP pour la couche de SiN_y .

3.4.1. Simulations multicouches antireflets

De la même manière que précédemment, des simulations avec le logiciel Macleod ont été effectuées pour concevoir un empilement multicouche antireflet le plus performant possible dans le domaine du visible. Le protocole de simulation utilisé a donc nécessité les exigences suivant :

- utilisation des matériaux SiO -GLAD et SiN -RGPP sur un substrat de quartz,
- un spectre de réflexion égal à zéro entre 390 à 760 nm,
- un nombre de couches maximal égal à 10.

La figure 4.25 présente schématiquement différents empilements antireflets à 2, 4, 5 et 8 couches, optimisés par le logiciel Macleod. Pour ces empilements, l'épaisseur des couches varie de 7 à 126 nm et l'empilement se termine toujours par une couche de SiO -GLAD de 94 nm d'épaisseur.

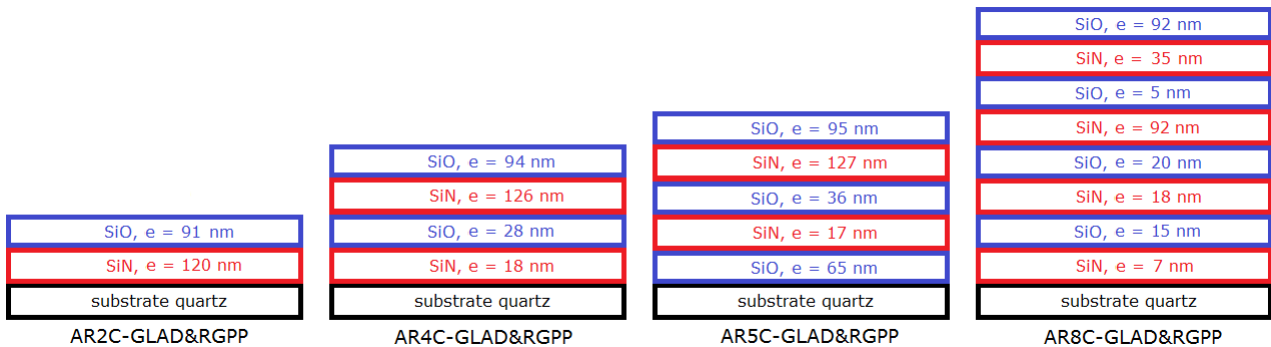


Figure 4.25 : Schémas des empilements multicouches antireflets conçus et simulés par le logiciel Macleod avec les propriétés optiques des matériaux SiO -GLAD et SiN -RGPP sur quartz.

Les différents spectres de réflexion simulés de ces empilements antireflets élaborés en procédé GLAD&RGPP sont représentés dans la figure 4.26. Le spectre de réflexion du substrat de quartz est stable dans le domaine du visible (400-750 nm) avec une réflexion moyenne de 6,9 %. Pour l'empilement bicouche (AR2C-GLAD&RGPP), le spectre de réflexion est toujours de la forme d'un W avec une réflexion toujours plus faible (de 4 à 5,5 %) mais dans un domaine de longueurs d'onde toujours plus restreint (entre 450 et 660 nm). Pour les empilements multicouches supérieurs ou égales à 4 couches, la forte diminution de la réflexion est quasiment identique quel que soit le nombre de couches supplémentaires dans le domaine 400 à 720 nm. Les spectres de réflexion simulés de ces empilements (AR4C-GLAD&RGPP, AR5C-GLAD&RGPP et AR8C-GLAD&RGPP) montrent une réflexion stable autour de 4 % entre 400 et 720 nm. Après les tests effectués dans le paragraphe précédent et ces simulations, la suite de l'étude portera uniquement sur l'élaboration de l'empilement AR4C-GLAD&RGPP.

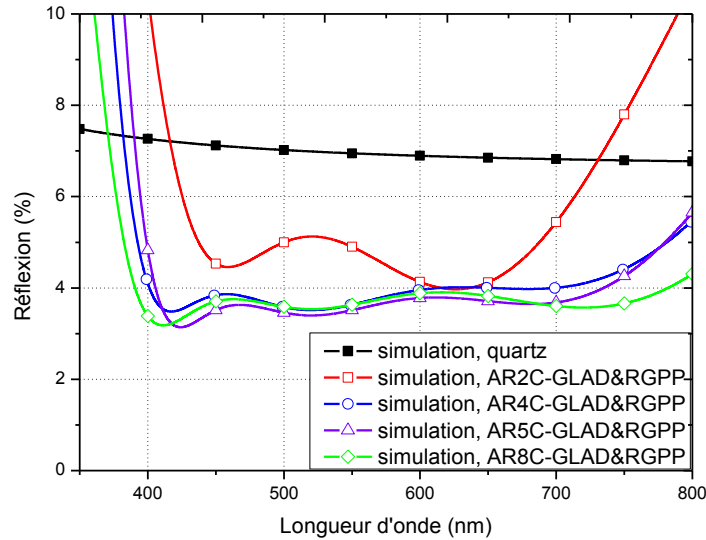


Figure 4.26 : Comparaison des spectres de réflexion simulés en fonction de la longueur d'onde pour les empilements multicouches antireflets élaborés en procédé GLAD&RGPP sur quartz.

3.4.2. Multicouches antireflets 4 couches (AR4C-GLAD&RGPP)

L'empilement multicouche antireflet optimisé avec le logiciel Macleod et réalisé est donc un empilement quatre couches (AR4C-GLAD&RGPP). Il est constitué comme suit : Quartz / SiN-RGPP (18 nm) / SiO-GLAD (28 nm) / SiN-RGPP (126 nm) / SiO-GLAD (94 nm). Pour son élaboration, le temps de dépôt des couches est déterminé à : $\text{SiN}_y = 159$ s / $\text{SiO}_x = 487$ s / $\text{SiN}_y = 1080$ s / $\text{SiO}_x = 1606$ s.

La figure 4.27 présente les spectres de réflexion simulés et celui expérimental de l'empilement AR4C-GLAD&RGPP. L'allure générale du spectre de réflexion expérimental diffère de celui simulé (simulation 1). Pour expliquer cette différence, une deuxième simulation est effectuée en changeant l'épaisseur des différentes couches composant cet empilement. Lors de l'élaboration de cet empilement, la vitesse de dépôt du SiN-RGPP est sous-estimée d'environ 6 % et la vitesse de dépôt du SiO-GLAD est sur estimée d'environ 4%. En effet, d'après la simulation 2, l'allure générale du spectre de réflexion étant similaire à celui expérimental et l'épaisseur des couches de l'empilement simulé (simulation 2) AR4C-GLAD&RGPP est : SiN-CP (19 nm) / SiO-GLAD (26 nm) / SiN-CP (134 nm) / SiO-GLAD (90 nm). Au final, si l'on considère la simulation 2 comme la représentation de l'empilement expérimental, le léger décalage du seuil de réflexion déjà observé dans AR4C-GLAD, peut provenir de la rugosité des couches de SiO_x élaborés par la technique GLAD et de la formation de couches de SiO_xN_y aux interfaces $\text{SiO}_x/\text{SiN}_y$. Au final, la réflexion

moyenne calculée est de 3,9 %, les propriétés optiques du SiO_x élaboré en GLAD et du SiN_y élaboré en RGPP ne permettent donc pas d'améliorer les performances antireflets de la multicouche.

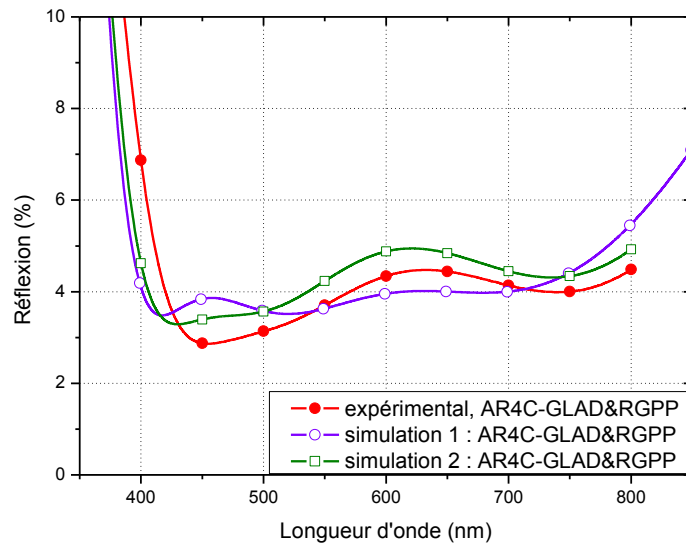


Figure 4.27 : Spectres de réflexion simulés et expérimentaux en fonction de la longueur d'onde du substrat pour la multicouche AR4C-GLAD&RGPP déposée sur quartz.

3.5. Comparaison des différents procédés de pulvérisation

Les résultats précédents ont permis de déterminer les meilleures caractéristiques des multicouches antireflets réalisées suivant les différents procédés d'élaboration. Pour ces différents procédés, les empilements obtenus sont tous formés de 4 couches minces de la forme $\text{SiN}_y / \text{SiO}_x / \text{SiN}_y / \text{SiO}_x$. Le tableau 4.10 résume les différentes structures de ces multicouches. Au final, quel que soit le procédé d'élaboration, il apparaît que la structure et l'épaisseur des couches sont semblables. Les empilements sont conçus sur quartz de deux couches de $\text{SiN}_y / \text{SiO}_x$ (14 nm / 38 nm) puis de deux couches de $\text{SiN}_y / \text{SiO}_x$ plus épaisses (133 nm / 88 nm).

Multicouches		AR4C-CP	AR4C-RGPP	AR4C-GLAD	AR4C-GLAD&RGPP
Matériaux					
	Air	Air			
	SiO	88	87	95	94
	SiN	133	126	136	126
	SiO	38	36	36	28
	SiN	14	14	18	18
	Substrat	Quartz			

Tableau 4.2 : Comparaison des configurations des meilleures multicouches antireflets élaborées en procédé conventionnel, RGPP, GLAD et GLAD&RGPP.

Les spectres de réflexion et de transmission expérimentaux des différents empilements multicouches dans les longueurs d'onde du visible sont représentées dans les figures 4.28 a) et b). Pour ces quatre empilements antireflets, la réflexion dans le domaine du visible est confinée autour de 3 et 4 %. La réflexion moyenne du quartz étant de 6,6 %, les propriétés antireflets sont donc significatives. En revanche, les spectres de transmission montrent une nette diminution de la transmission entre 600 et 400 nm (de 90 à 60 %) pour les empilements élaborés avec des couches de SiN_y selon le procédé RGPP. Cette perte de transmission provient de l'absorption plus importante de la couche SiN -RGPP dans ce domaine de longueurs d'onde comparée à la couche de SiN -CP. Les empilements AR4C élaborés avec des couches de SiN_y en procédé conventionnel possèdent une transmission supérieure à celle du substrat (95 au lieu de 93 %) sur quasiment toutes les longueurs d'onde du visible (450 à 750 nm). Les différentes couches SiN -CP et SiO -CP ou SiO -GLAD n'étant pas absorbantes dans le domaine du visible, la diminution de réflexion provoque l'augmentation de la transmission de ces empilements. Ces résultats permettent donc de différencier ces multicouches en deux catégories.

- Les empilements réalisés avec des couches de SiN -RGPP permettent l'élaboration des multicouches antireflets les plus performantes (réflexion moyenne de 3,3 %) grâce à l'indice de réfraction du SiN -RGPP élevé (2,2). Toutefois, ces multicouches ne sont plus totalement transparentes dans le visible (teinte légèrement jaune foncé). Ces multicouches serviront pour élaborer des antireflets performants sur des substrats opaques.

- Les empilements réalisés avec des couches de SiN -CP permettent l'élaboration des multicouches totalement transparentes. Cependant, l'antireflet est légèrement moins performant (réflexion moyenne de 3,9 %). Ces multicouches serviront pour élaborer des antireflets performants sur des substrats transparents.

Pour cette deuxième catégorie, la différence entre l'empilement antireflet AR4C-CP et AR4C-GLAD se retrouve au niveau du rendu visuel. En effet, l'antireflet de l'empilement AR4C-CP est très légèrement jaune alors que la réflexion de l'empilement AR4C-GLAD est incolore. Cette différence peut être expliquée par la légère hausse de réflexion à 600 nm pour l'empilement AR4C-CP alors que le spectre de réflexion de l'empilement AR4C-GLAD est quasiment constant dans le visible. Elle provient de l'indice de réfraction de SiO -GLAD plus faible (1,39 au lieu de 1,48) permettant un meilleur lissage du spectre de réflexion dans le domaine du visible. D'après les caractéristiques obtenues, la technique GLAD est donc la technique la plus intéressante pour réaliser des multicouches antireflets sur un substrat transparent car elle n'abaisse pas la transmission et l'empilement reste incolore pour ce substrat de quartz. Ces caractéristiques sont très recherchées pour les multicouches antireflets.

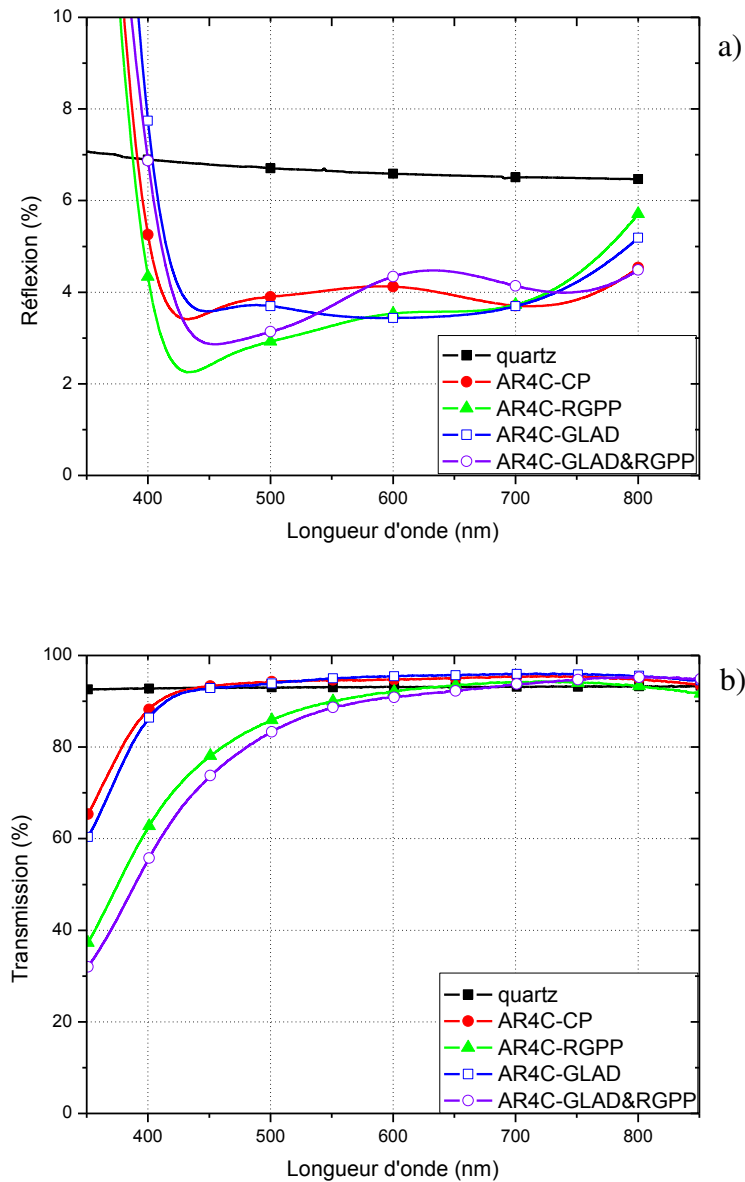


Figure 4.28: Comparaison des spectres de réflexion (a) et de transmission (b) expérimentaux du substrat de quartz et des multicouches AR4C élaborées suivant les différents procédés d'élaboration en fonction de la longueur d'onde.

Pour vérifier la structure des multicouches élaborées, ces dernières sont déposées sur silicium et observées par microscopie électronique à balayage (MEB). La multicouche est relativement fine (environ 270 nm) et isolante. Par conséquent, pour avoir un contraste assez important, une couche de chrome d'environ 300 nm est déposée sur cette multicouche. Les images sont réalisées par MEB et son module de rétrodiffusion (cf. chap. I, § 3.2.2). Le tableau 4.3 représente les images MEB, vues en coupe, des quatre empilements AR4C (CP, RGPP, GLAD et GLAD&RGPP) par rétrodiffusion. Ces images permettent d'avoir un aperçu de la structure de la multicouche. La première couche bien visible, colonnaire et poreuse correspond au chrome. Puis, la

multicouche peut être identifiée. Les deux couches les plus foncées correspondent aux couches de SiO_x et les deux couches plus claires correspondent aux couches de SiN_y .

<p>AR4C-CP</p>	
<p>AR4C-RGPP</p>	
<p>AR4C-GLAD</p>	
<p>AR4C-GLAD&RGPP</p>	

Tableau 4.3 : Images MEB des quatre empilements multicouches antireflets AR4C élaborés suivant différents procédés déposés sur silicium et recouverts d'une couche de chrome

4. Etude de multicouches à propriétés antireflets sur différents substrats

Après quelques tests et simulations, il apparaît que les performances antireflets dépendent du substrat utilisé. L'étude portera donc sur la conception d'empilements antireflets dans les longueurs d'onde du visible pour différents substrats. La conception de ces empilements est réalisée grâce au logiciel de simulation Macleod. Il permet de déterminer les configurations d'empilements (matériaux et épaisseurs) adaptées à l'obtention des propriétés antireflets souhaitées. Deux catégories de substrats ont été choisies suivant leurs utilités dans différentes applications. Dans la première catégorie, on retrouve les différents substrats transparents :

- le quartz ($n = 1,46$ et $k = 0$ à $\lambda = 633$ nm), le verre et le BK7 (verre borosilicate crown) ($n = 1,52$ et $k = 0$ à $\lambda = 633$ nm) sont les principaux verres utilisés en optique,
- le saphir ($n = 1,77$ et $k = 0$ à $\lambda = 633$ nm) est utilisé dans l'horlogerie,
- le polycarbonate ($n = 1,57$ et $k = 0$ à $\lambda = 633$ nm) est utilisé dans la lunetterie.

Dans la deuxième catégorie, on retrouve différents substrats non transparents :

- le silicium ($n = 3,88$ et $k = 0,019$ à $\lambda = 633$ nm) et l'aluminium ($n = 1,45$ et $k = 7,54$ à $\lambda = 633$ nm) [120] rentrent dans la confection de panneaux solaires.

4.1. Sur un substrat transparent

Au vu des résultats obtenus sur le substrat de quartz, les matériaux utilisés pour réaliser une multicouche antireflet sur un substrat transparent sont le SiN_y élaboré en procédé conventionnel et le SiO_x élaboré en procédé GLAD. Ils permettent d'élaborer un antireflet performant incolore et restant transparent. Les différentes simulations pour la conception d'empilements antireflets sur les différents substrats transparents seront donc réalisées avec ces deux matériaux. Le protocole de simulation utilisé pour la conception d'empilements antireflets sur les différents substrats transparents impose les conditions suivant :

- utilisation des matériaux SiO -GLAD et SiN -CP sur le substrat souhaité,
- un spectre de réflexion égal à zéro entre 390 à 760 nm,
- un nombre de couches maximal égal à 6.

De plus, pour chaque substrat transparent, leurs propriétés optiques (indice de réfraction) ont été déterminées grâce à leurs spectres de transmission et la méthode de Swanepoel [40]. Puis, l'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde de chaque substrat est enregistré dans le logiciel Macleod.

4.1.1. Multicouches antireflets sur quartz (Q)

L'empilement antireflet élaboré sur quartz est l'empilement AR4C-GLAD vu précédemment (cf. partie 3.3). Cet empilement est constitué de Quartz / SiN-CP (18 nm) / SiO-GLAD (36 nm) / SiN-CP (136 nm) / SiO-GLAD (95 nm). Le spectre de réflexion de cette multicouche est quasiment constant sur toutes les longueurs d'onde du visible. Cela lui permet d'être incolore et sa réflexion moyenne est égale à 3,8% (cf. figure 4.24).

4.1.2. Multicouches antireflets sur verre (V) et BK7 (B)

Les indices de réfraction des substrats de verre et de BK7 étant similaires ($n = 1,52$ et $k = 0$ à $\lambda = 633$ nm), la réflexion expérimentale de ces substrats est équivalente. La simulation pour concevoir une multicouche antireflet sera donc la même. L'empilement conçu pour ces deux substrats est constitué de quatre couches SiN-CP (20 nm) / SiO-GLAD (27 nm) / SiN-CP (136 nm) / SiO-GLAD (95 nm). L'empilement élaboré sur verre est noté AR4C-V et celui sur BK7 est noté AR4C-B

La figure 4.29 présente les spectres de réflexion obtenus en simulation et en expérimentation des substrats et des empilements antireflets réalisés sur ces substrats. Les spectres de réflexion simulés et expérimentaux des substrats concordent et leur réflexion moyenne est de 8,1 %. L'allure générale des spectres de réflexion simulés et expérimentaux des empilements antireflets est semblable avec une réflexion variant entre 4 et 5 % dans les longueurs d'onde du visible. La différence entre ces différents spectres se retrouve au niveau de leur seuil de réflexion. Le seuil de L'AR4C-B suit celui simulé à environ 400 nm, alors que le seuil de l'AR4C-V arrive sur une longueur d'onde plus élevée (environ 450 nm). Cette différence sur le spectre de réflexion de l'AR4C-V peut venir soit du substrat en lui-même, soit d'une légère différence d'épaisseur dans les couches élaborées. En effet, la réflexion est très sensible aux épaisseurs des différentes couches et les deux empilements sur verre et BK7 n'ont pas été élaborés en même temps. Au final, et dans les deux cas, que ce soit à cause du décalage de seuil de réflexion (pour l'AR4C-V) ou de la légère augmentation de la réflexion entre 400 et 500 nm (pour L'AR4C-B), ces empilements ne permettent pas d'avoir un antireflet incolore (léger reflet violet). De plus, la réflexion moyenne de l'AR4C sur BK7 et verre est respectivement de $R_{m \text{ BK7}} = 4,6\%$ et $R_{m \text{ verre}} = 4,7\%$.

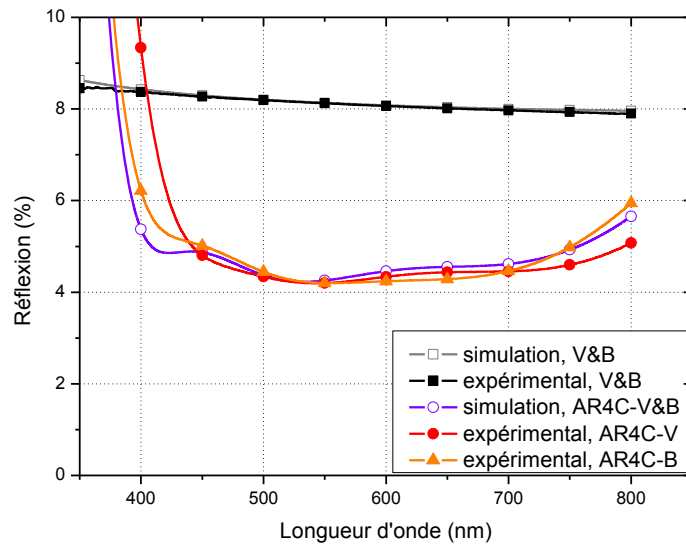


Figure 4.29 : Comparaison des spectres de réflexion simulés et expérimentaux en fonction de la longueur d'onde des substrats de verre & BK7 et des multicouches antireflets déposées sur ces substrats (AR4C-V et AR4C-B).

4.1.3. Multicouches antireflets sur Saphir (Sa)

Le saphir possède un indice de réfraction de 1,77 à $\lambda = 633$ nm. Il est plus élevé que celui du verre (1,5 à $\lambda = 633$ nm). La réflexion du saphir est donc plus importante que celle du verre et la configuration de la multicouche antireflet diffère légèrement. L'empilement est toujours conçu par quatre couches mais les trois premières couches sont assez fines (SiN-CP (32 nm) / SiO-GLAD (29 nm) / SiN-CP (32 nm)) tandis que la dernière couche est épaisse (SiO-GLAD (111 nm)). L'empilement élaboré sur saphir sera noté AR4C-Sa

Les différents spectres de réflexion du substrat et de l'empilement antireflets sont représentés sur la figure 4.30. Les spectres de réflexion simulés et expérimentaux du substrat de saphir sont identiques et constants dans les longueurs d'onde du visible. Sa réflexion moyenne est de 14,1 %. Les spectres de réflexion simulé et expérimental de l'empilement AR4C-Sa sont semblables avec une réflexion constante entre 400 et 800 nm et une réflexion moyenne de 8 %. En revanche, il apparaît toujours un léger décalage du seuil de réflexion vers les plus hautes longueurs d'onde pour l'empilement expérimental (440 nm au lieu de 420 en simulation). Au final, cet empilement sur saphir permet de réaliser un antireflet incolore grâce à sa réflexion constante dans le domaine du visible et une réflexion moyenne $R_m = 8$ %.

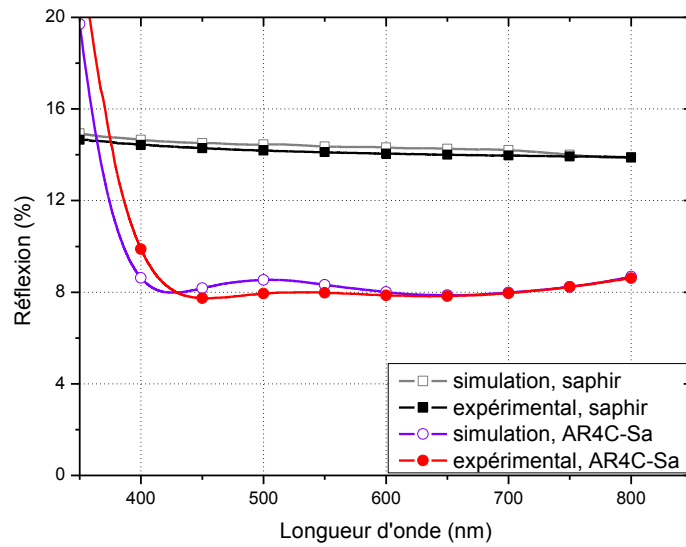


Figure 4.30 : Comparaison des spectres de réflexion simulés et expérimentaux en fonction de la longueur d'onde du substrat de saphir et de la multicouche antireflet AR4C-Sa.

4.1.4. Multicouches antireflets sur Polycarbonate (PC)

Le polycarbonate possédant des propriétés optiques proche à celles du verre ($n = 1,57$ et $k = 0$ à $\lambda = 633$ nm), la configuration de la multicouche antireflet ressemble à celle réalisée sur verre. Cet empilement antireflet est conçu ainsi : PC / SiN-CP (18 nm) / SiO-GLAD (30 nm) / SiN-CP (135 nm) / SiO-GLAD (95 nm) et nommé AR4C-PC.

La figure 4.31 présente les spectres de réflexion simulés et expérimentaux du substrat de polycarbonate et de l'empilement AR4C-PC. Pour ce substrat, le spectre de réflexion expérimental est très proche de celui simulé dans les longueurs d'onde du visible. En revanche, la réflexion du polycarbonate expérimental chute brusquement de 10 à 5,5 % à 400 nm. Cette chute est due à l'insertion d'un filtre anti ultra-violet injecté directement dans le polycarbonate. En effet, celui-ci est utilisé dans l'entreprise de lunetterie Christian Dalloz Sunoptics pour s'affranchir de la transmission des rayons ultra-violets. Au final, la réflexion moyenne de ce polycarbonate est de 9,3 %. Pour ce substrat, l'écart entre la réflexion de l'empilement expérimental et celle de l'empilement simulé est nettement plus faible. De plus, le seuil de réflexion de l'empilement expérimental est décalé vers les hautes longueurs d'onde. Cette différence de réflexion peut provenir du substrat de polycarbonate qui possède un filtre anti ultra-violet avec des effets non connus et non pris en compte dans la simulation. Dans l'ensemble, l'allure générale des deux spectres de réflexion (simulé et expérimental) reste semblable. Pour cet empilement, la valeur de la réflexion moyenne est $R_m = 4,6$ %.

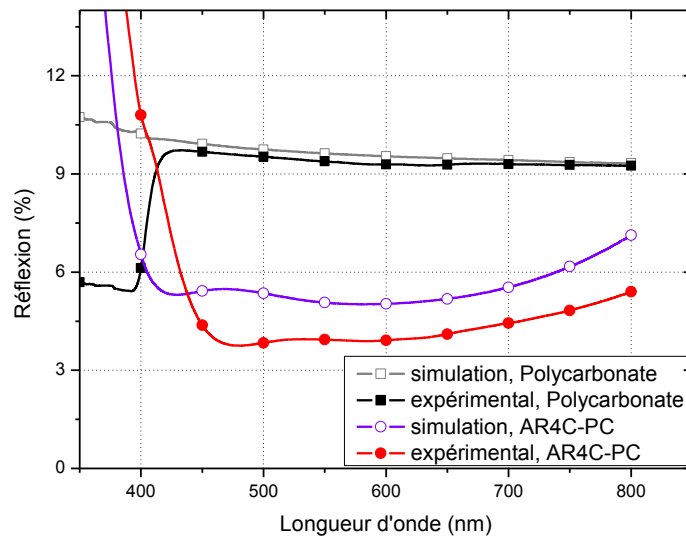


Figure 4.31 : Comparaison des spectres de réflexion simulés et expérimentaux en fonction de la longueur d'onde du substrat de PC et de la multicouche antireflets AR4C-Sa.

4.2. Sur des substrats non transparents

D'après les résultats précédents (cf. chapitre IV, § 3) et quelques simulations sur des substrats non transparents dans le domaine du visible tels que le silicium ou l'aluminium, les matériaux pour réaliser les multicouches antireflets seront les films minces de SiN_y élaborés en procédé RGPP et de SiO_x élaborés en procédé GLAD. Le protocole de simulation utilisé pour la conception d'empilements antireflets sur les différents substrats opaques impose les exigences suivant :

- utilisation des matériaux SiO -GLAD et SiN -RGPP sur le substrat souhaité,
- un spectre de réflexion égal à zéro entre 390 à 760 nm,
- un nombre de couches maximal égal à 6.

Ces substrats étant non transparents, leurs propriétés optiques (indice de réfraction et coefficient d'extinction) ne peuvent pas être déterminées par la méthode de Swanepoel. Ces indices sont donc recherchés dans la littérature et enregistrés dans le logiciel Macleod.

4.2.1. Multicouches antireflets sur silicium (Si)

Les propriétés optiques du substrat de silicium proviennent de *SOPRA N&K Database* [121]. L'indice de réfraction est de 3,88 à $\lambda = 633$ nm et le coefficient d'extinction est de 0,019 à $\lambda = 633$ nm. Après plusieurs simulations et élaborations d'empilements, la meilleure multicouche antireflet élaborée sur silicium se trouve être encore un empilement 4 couches SiN -RGPP (57 nm) /

SiO-GLAD (196 nm) / SiN-RGPP (118 nm) / SiO-GLAD (93 nm). Cet empilement est appelé AR4C-Si.

Les spectres de réflexion simulés et expérimentaux du substrat de silicium et de l'empilement antireflets AR4C-Si sont représentés dans le figure 4.32. Le spectre de réflexion et la valeur de la réflexion en simulation et en expérimentation sont identiques. La réflexion du silicium varie de 50 à 32 % entre 400 et 800 nm. Sa réflexion moyenne est $R_m = 37$ %. Les propriétés optiques (n et k) du substrat de silicium issues de la littérature) permettent de simuler parfaitement la réflexion du substrat dans le domaine du visible. De même, les spectres de réflexion de l'empilement AR4C-Si (simulé et expérimental) sont semblables. Le seuil de réflexion est autour de 400 nm et la réflexion varie de 0 à 6,5 % dans le domaine du visible. Entre les deux spectres, une légère différence apparaît entre 400 à 450 nm. Le seuil de réflexion pour le spectre expérimental est légèrement décalé vers 420 nm (au lieu de 400 nm) et la réflexion expérimentale est légèrement plus faible entre 420 et 450 nm. Cette différence de réflexion est déjà observée pour les empilements antireflets sur substrat transparent. Au final, la réflexion moyenne de cet empilement expérimental AR4C-Si est $R_m = 3,3$ %.

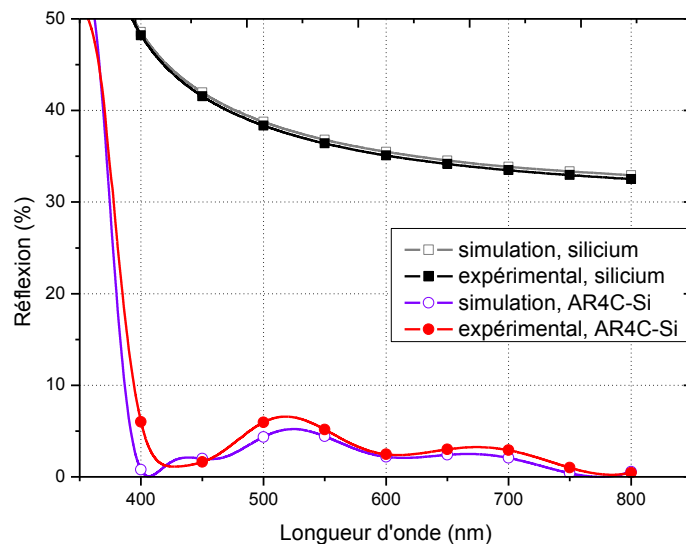


Figure 4.32 : Comparaison des spectres de réflexion simulés et expérimentaux en fonction de la longueur d'onde du substrat de silicium et de la multicouche antireflet AR4C-Si.

4.2.2. Multicouches antireflets sur aluminium (Al)

Les propriétés optiques du substrat d'aluminium provient de la littérature [120]. Son indice de réfraction est de 1,45 à $\lambda = 633$ nm et son coefficient d'extinction est de 7,54 à $\lambda = 633$ nm. La conception d'un empilement antireflet pour ce substrat est délicate car sa réflexion est très importante (environ 90 %). Après plusieurs simulations et afin de minimiser au maximum la réflexion dans le domaine du visible, la structure est un empilement de 4 couches : SiN-RGPP (63 nm) / SiO-GLAD (130 nm) / SiN-RGPP (106 nm) / SiO-GLAD (85 nm) nommée AR4C-Al.

La figure 4.33 présente les différents spectres de réflexion simulés et expérimentaux du substrat d'aluminium et de l'empilement antireflet dans les longueurs d'onde du visible. Le spectre de réflexion simulé et celle du spectre expérimental du substrat d'aluminium est très proche. Toutefois la valeur de la réflexion simulée devient de plus en plus importante dans les faibles longueurs d'onde comparée à celle expérimental. Les propriétés optiques (n et k) de l'aluminium issues de littérature ne sont pas exactement les mêmes que celles de la couche d'aluminium expérimentale mais s'en rapproche grandement. Pour les réflexions simulées et expérimentales de l'empilement AR4C-Al, l'allure générale des spectres est similaire. En revanche, la réflexion expérimentale de l'empilement est plus faible que celle simulée mais évolue de 50 % à 45% entre 400 et 800 nm avec un maximum de réflexion de 70 % à 500 nm. Cette différence provient sûrement des propriétés optiques du substrat (rugosité et surface). Au final, la réflexion moyenne de cet empilement reste toutefois importante $R_m = 63$ %. Réaliser des multicouches antireflets performantes sur des substrats extrêmement réfléchissants reste donc un challenge. Une solution possible est de déposer sur ce substrat une couche possédant une réflexion moindre (comme le silicium) et y déposer une multicouche antireflet performante connue.

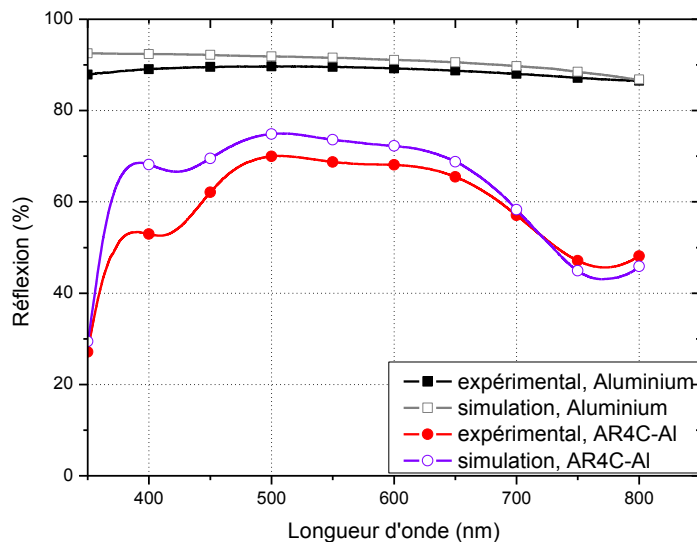


Figure 4.33 : Comparaison des spectres de réflexion simulés et expérimentaux en fonction de la longueur d'onde du substrat d'aluminium et de la multicouche antireflet AR4C-Al.

4.3. Comparaison des différents substrats

Les résultats obtenus dans cette partie ont permis de déterminer différents empilements aux propriétés antireflets élaborés sur différents substrats et de comparer les propriétés optiques antireflets simulées et expérimentales de divers échantillons. Les empilements réalisés sont résumés dans le tableau 4.4. Ce tableau reprend respectivement le nom des multicouches, le substrat sur

lequel elles sont déposées, les épaisseurs des différentes couches, leur réflexion moyenne et le rendement de l'antireflet.

Multicouches	Substrat	R _{mS} (%)	Epaisseur (nm)				R _{mE} (%)	η (%)
			SiN _y	SiO _x	SiN _y	SiO _x		
AR4C-Q	Quartz	6,9	20	27	136	95	3,76	43
AR4C-V	Verre	8,1	20	27	136	95	4,66	42
AR4C-B	BK7	8,1	20	27	136	95	4,55	44
AR4C-Sa	Saphir	14,1	32	29	32	111	7,98	44
AR4C-PC	PolyC	9,3	18	30	135	95	4,56	51
AR4C-Si	Silicium	37	57	196	118	93	3,28	91
AR4C-Al	Aluminium	89	63	130	106	85	63	29

Tableau 4.4 : Structure et propriétés optiques des différentes multicouches antireflets élaborées sur divers substrats.

Quels que soient les substrats utilisés et les multicouches antireflets réalisées, les simulations avec le logiciel Macleod concordent avec l'expérience. De plus, deux catégories de multicouches sont identifiables : les multicouches sur substrat transparent et celles sur substrat non-transparent.

La première catégorie a une structure et des épaisseurs de couches minces relativement identiques à l'exception de celle réalisée sur saphir qui possède une réflexion plus importante (la troisième couche SiN_y est plus fine). Si les rendements de ces empilements multicouches antireflets sont calculés, ils restent proches quel que soit le substrat (entre 42 et 51% suivant le substrat). Le rendement correspond au pourcentage de diminution de la réflexion du substrat grâce à l'empilement réalisé, il est calculé comme suit :

$$\eta = \frac{R_{mS} - R_{mE}}{R_{mS}} \quad (IV-3)$$

- R_{mS} : réflexion moyenne dans le domaine du visible du substrat,
- R_{mE} : réflexion moyenne dans le domaine du visible du substrat + empilement multicouches antireflets.

Pour les substrats transparents, il est difficile d'améliorer le rendement de l'empilement antireflet à plus de 50 % car le traitement est réalisé sur une seule face du substrat. Le revêtement ne permet donc pas de minimiser la réflexion provoquée par la face arrière du substrat.

En revanche, pour la deuxième catégorie (substrats non-transparentes), il n'y a pas de réflexion secondaire. L'empilement antireflet élaboré sur silicium permet d'atténuer la réflexion dans le visible de 91% avec une réflexion moyenne R_m = 3,28 %. Toutefois, pour les substrats non transparents à très forte réflexion, il est délicat d'élaborer un empilement multicouche antireflet performant. Une solution est cependant envisageable pour réaliser un empilement antireflet performant sur ces substrats. Il faut déposer une couche épaisse autour de 1 μm de silicium pour que le substrat prenne les propriétés optiques du silicium. Puis, il suffit de déposer l'empilement multicouche antireflet pour substrat de silicium pour obtenir les propriétés antireflets connues.

En perspective, des simulations ont été réalisées si l'indice de réfraction du SiO_x pouvait être égal à 1,05 à $\lambda = 633 \text{ nm}$ comme la valeur obtenue dans la littérature [103]. La figure 4.34 présente différentes simulations réalisées avec le logiciel Macleod d'empilements multicouches antireflets déposés sur quartz et silicium.

Simulation	Substrat	1 ^{ère} couche	2 ^{ème} couche	3 ^{ème} couche	4 ^{ème} couche
Simulation 1 : AR4C-Q	Quartz	SiN-CP 20 nm	SiO-GLAD 27 nm	SiN-CP 136 nm	SiO-GLAD 95 nm
Simulation 2 : AR3C-Q	Quartz	SiO-1,05 49 nm	SiN-CP 9 nm	SiO-1,05 146 nm	
Simulation 3 : AR4C-Si	Silicium	SiN-RGPP 57 nm	SiO-GLAD 196 nm	SiN-RGPP 118 nm	SiO-GLAD 93 nm
Simulation 4 : AR3C-Si	Silicium	SiN-RGPP 64 nm	SiO-1,05 63 nm	SiN-RGPP 10 nm	

Tableau 4.5 : Structure des différentes simulations des empilements multicouches antireflets élaborés sur quartz et silicium.

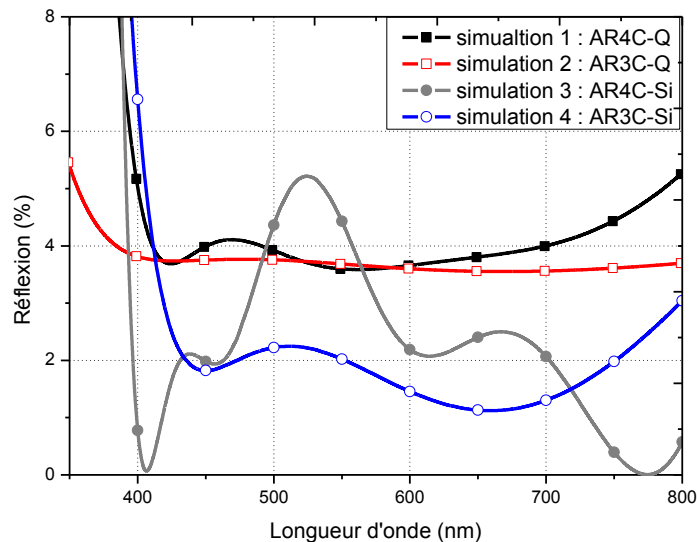


Figure 4.34 : Spectres de réflexion simulés en fonction de la longueur d'onde des empilements multicouches antireflets déposés sur quartz et silicium.

Les simulations 1 et 3 correspondent aux simulations des meilleurs multicouches antireflets déposés respectivement sur quartz et silicium avec l'indice de réfraction du film de SiO_x élaborés en pulvérisation cathodique par la technique GLAD. Les simulations 2 et 4 correspondent aux simulations des meilleurs multicouches antireflets déposées respectivement sur quartz et silicium si l'indice de réfraction du SiO_x pouvait être égal à 1,05 à $\lambda = 633 \text{ nm}$. Les structures des empilements de ces différentes simulations sont décrites dans le tableau 4.5. Il apparaît que diminuer l'indice de réfraction du SiO_x permettrait d'améliorer les propriétés antireflets des empilements multicouches tout en diminuant le nombre de couches de l'empilement.

CONCLUSION

Ce chapitre a ainsi permis d'élaborer et de caractériser différents empilements antireflets grâce aux propriétés optiques de films de SiN_y et SiO_x obtenus dans les chapitres II et III. Les différentes multicouches antireflets ont été élaborées, conçues et simulées grâce au logiciel de simulation Macleod. La première étude de multicouches antireflets a été effectuée suivant les différents procédés de pulvérisation permettant d'élaborer les couches minces de SiN_y et SiO_x . Dans la deuxième étude, les multicouches antireflets ont été réalisées sur différents substrats : quartz, verre, saphir, polycarbonate, silicium et aluminium.

Dans un premier temps, la vérification du fonctionnement du logiciel de simulation et des propriétés optiques des couches de SiN_y et SiO_x a été réalisée. Pour ce faire, la comparaison des spectres de transmission et de réflexion simulés et expérimentaux des substrats et des monocouches SiN_y et SiO_x qui ont été utilisées dans les empilements multicouches antireflets est effectuée. Les différentes monocouches étudiées ont donc été les deux films de SiN_y élaborés selon les procédés conventionnel et RGPP et les deux films de SiO_x élaborés selon les procédés conventionnel et GLAD. Ces différents spectres de transmission et de réflexion étant semblables, l'étude sur les multicouches antireflets a été réalisée.

L'étude des multicouches antireflets élaborées suivant différents procédés de pulvérisation a permis d'une part de vérifier le bon fonctionnement du logiciel Macleod pour concevoir des multicouches antireflets. D'une part, les différents résultats obtenus montrent systématiquement une bonne concordance entre la simulation et l'expérimentation. D'autre part, ils montrent quels matériaux permettaient de réaliser le meilleur antireflet pour un substrat transparent. Les deux matériaux retenus sont le film de SiN_y élaboré en pulvérisation cathodique en procédé conventionnel et le film de SiO_x élaboré en procédé GLAD. L'étude des multicouches antireflets élaborées sur différents substrats a permis de mettre en avant deux catégories de substrats : les substrats transparents et les substrats non transparents. La conception d'empilements antireflets avec le logiciel Macleod fonctionne parfaitement quels que soit les substrats utilisés. Au final, les propriétés antireflets des multicouches élaborées restent très correctes avec au minimum 40 % de réflexion en moins pour les différents substrats.

Pour améliorer les propriétés antireflets des multicouches, le meilleur moyen serait de pouvoir diminuer encore l'indice de réfraction de la couche de SiO_x élaborée en procédé GLAD. Quelques simulations ont été effectuées avec des couches de SiO_x de très faible indice de réfraction (de 1,05 à 633 nm). D'après ces résultats, un empilement de trois couches SiO_x (39 nm) / SiN_y (9 nm) / SiO_x (133 nm) suffirait pour avoir un revêtement sur quartz diminuant la réflexion de plus de 50 %. Pour les substrats transparents, il est aussi possible d'élaborer l'empilement multicouche antireflet sur les deux faces du substrat pour minimiser la réflexion totale. Les propriétés optiques des matériaux (SiO_x et SiN_y) et le logiciel de simulation pourraient permettre de réaliser d'autres traitements à propriétés optiques sélectives (exemple : filtre UV-visible-IR transmission et réflexion, propriétés décoratives ...).