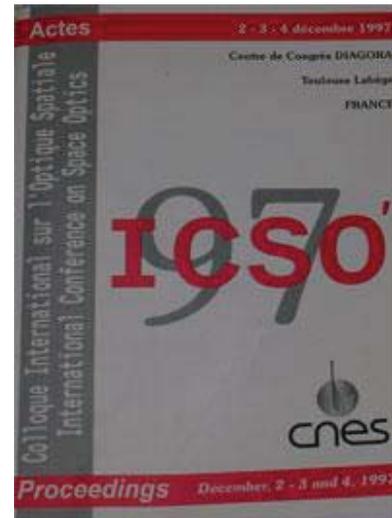


# International Conference on Space Optics—ICSO 1997

Toulouse, France

2–4 December 1997

*Edited by George Otrio*



## ***Broad-band absorbers for reduction of parasitic light: two alternative solutions***

*Hughes Giovannini, F. Lemarquis, H. Akhouayri,  
Michel Cathelinaud, et al.*



icso proceedings



International Conference on Space Optics — ICSO 1997, edited by Georges Otrio, Proc. of SPIE Vol. 10570, 1057022 · © 1997 ESA and CNES · CCC code: 0277-786X/18/\$18 · doi: 10.1117/12.2326628

**BROAD-BAND ABSORBERS FOR REDUCTION OF PARASITIC LIGHT :  
TWO ALTERNATIVE SOLUTIONS**

**\*H. GIOVANNINI, F. LEMARQUIS, H. AKHOUAYRI, M. CATHELINAUD, P. TORCHIO,  
C. AMRA,  
\*\*B. COUSIN, D. LAUBIER, and G. OTRIO**

*\*Ecole Nationale Supérieure de Physique de Marseille - Lab. d'Optique des Surfaces et des Couches Minces - UPRES A CNRS 6080 - Dom. Université de St Jérôme, 13397 Marseille Cedex 20, France*

*\*\*CNES - Départ. Instrumentation Optique, 10 rue Edourd-Belin, 31055 Toulouse Cedex. France*

**RÉSUMÉ** - Deux types de solutions, associant multicouches diélectriques, surfaces noires rugueuses et alternances métal/diélectrique, sont élaborées pour concevoir et réaliser des absorbeurs de lumière achromatiques. Des résultats théoriques et expérimentaux sont présentés, avec des absorptions allant jusqu'à 99.78%.

**ABSTRACT** - Two kinds of broad-band absorbers are designed and produced thanks to dielectric multilayers, rough and black surfaces, and metal-dielectric coatings. Theoretical and experimental results are given, with absorption values up to 99.78%

**A - INTRODUCTION**

La réduction de lumière parasite constitue un problème clé pour nombre de systèmes optiques modernes. Dans ce but nous avons cherché à concevoir et réaliser des composants dits "absorbeurs large-bande" présentant les propriétés suivantes:

- une transmission nulle ( $T=0$ )
- une forte absorption ( $A>0.99$ )
- des propriétés achromatiques

Deux solutions ont été envisagées au LOSCM pour atteindre ces objectifs:

- La première consiste à renvoyer l'énergie non absorbée sous la forme d'un flux diffus quasi-lambertien (Fig. A-1-a), dont l'intégrale dans tout l'espace n'excède pas le pour-cent ( $D<1\%$ ). Le bilan d'énergie s'écrit ainsi:  $1 = A + D$ , et l'on cherche à accroître l'absorption (ou réduire la diffusion) en recouvrant d'empilements multicouches spécifiques des surfaces "noires" fortement rugueuses. Le composant fonctionne alors sur le principe d'interférences en lumière diffuse, et permet d'atteindre à moindre coût des absorptions bien supérieures à celles du composant initial.

- La deuxième solution fait appel, à priori de façon plus classique, à des empilements multicouches sur substrat plan de qualité optique (Fig. A-1-b). La diffusion est alors négligeable

( $D < 10^{-4}$ ), et l'énergie non absorbée est simplement transportée par le faisceau réfléchi, qu'il faut minimiser ( $R < 1\%$ ). Le bilan d'énergie s'écrit cette fois:  $I = A + R$ , et l'absorption maximale (ou la réflexion minimale) est obtenue grâce à une succession d'alternances métal/diélectrique très spécifiques. Notons que l'absorption est cette fois confinée dans le volume du revêtement de surface, ce qui nous affranchit du choix du substrat.

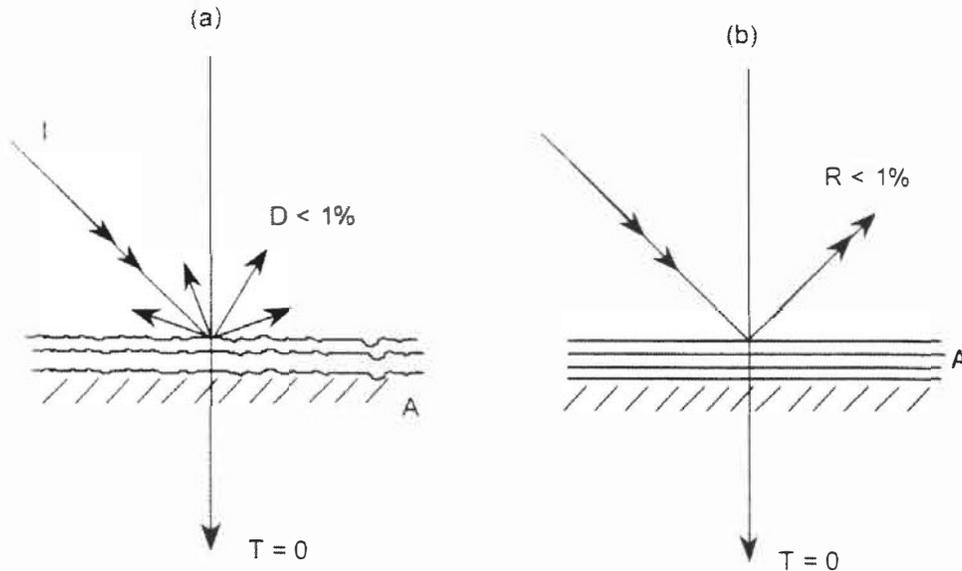


Fig. A - 1 : Description schématique de deux solutions alternatives pour obtenir une forte absorption large-bande (voir texte)

Pour chacune de ces solutions, les propriétés obtenues sont achromatiques, c'est-à-dire peu sensibles à la longueur d'onde, l'incidence ou la polarisation. Une question posée concerne, au delà des problèmes de coût, de contrôle de réalisation et de tenue "climatique" des composants, le seuil maximum d'absorption susceptible d'être obtenu en regard des propriétés achromatiques. Nous présentons ci-dessous quelques premiers résultats expérimentaux et théoriques obtenus au LOSCM en collaboration avec le CNES.

## B - SURFACES RUGUEUSES NOIRES MULTICOUCHES POUR UNE ABSORPTION MAXIMALE

Nous considérons tout d'abord ici le cas des surfaces noires fortement rugueuses. Ces surfaces peuvent être assimilées à des milieux diélectriques rugueux avec des pertes : ces pertes entraînent une absorption de la lumière incidente, alors que la rugosité donne lieu au phénomène de diffusion. Dans les cas que nous étudions, la rugosité des surfaces est telle qu'aucun faisceau spéculaire n'est obtenu: la réflexion est délocalisée. Nous décrivons ci-dessous une technique qui permet d'augmenter l'absorption de peintures noires rugueuses ayant au départ des performances standard (AA 96%) en termes de quantité totale de lumière diffusée. Nous montrons en particulier qu'il est possible d'augmenter l'absorption de telles peintures jusqu'à des valeurs supérieures à 99%

( $D < 10^{-4}$ ), et l'énergie non absorbée est simplement transportée par le faisceau réfléchi, qu'il faut minimiser ( $R < 1\%$ ). Le bilan d'énergie s'écrit cette fois:  $1 = A + R$ , et l'absorption maximale (ou la réflexion minimale) est obtenue grâce à une succession d'alternances métal/diélectrique très spécifiques. Notons que l'absorption est cette fois confinée dans le volume du revêtement de surface, ce qui nous affranchit du choix du substrat.

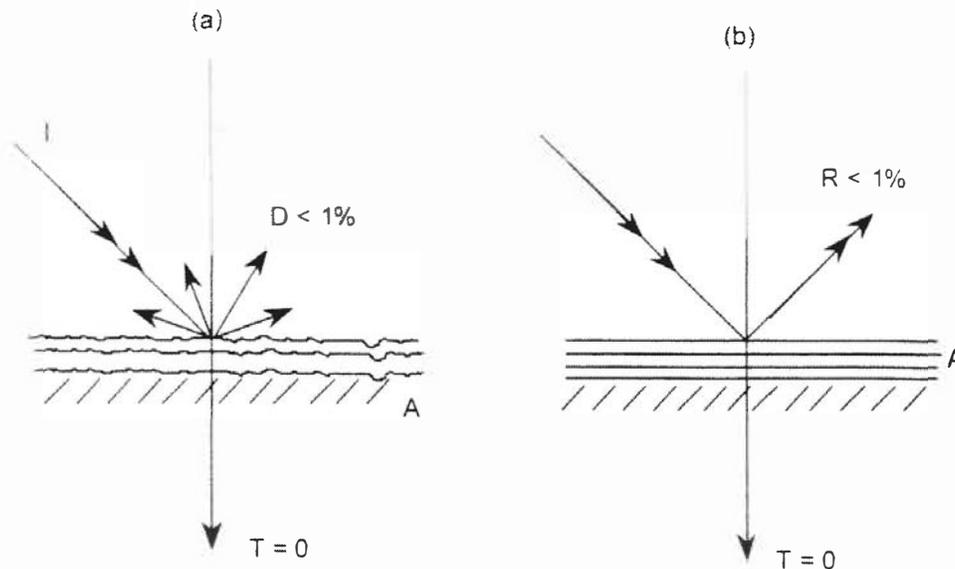


Fig. A - 1 Description schématique de deux solutions alternatives pour obtenir une forte absorption large-bande (voir texte)

Pour chacune de ces solutions, les propriétés obtenues sont achromatiques, c'est-à-dire peu sensibles à la longueur d'onde, l'incidence ou la polarisation. Une question posée concerne, au delà des problèmes de coût, de contrôle de réalisation et de tenue "climatique" des composants, le seuil maximum d'absorption susceptible d'être obtenu en regard des propriétés achromatiques. Nous présentons ci-dessous quelques premiers résultats expérimentaux et théoriques obtenus au LOSCM en collaboration avec le CNES.

## B - SURFACES RUGUEUSES NOIRES MULTICOUCHES POUR UNE ABSORPTION MAXIMALE

Nous considérons tout d'abord ici le cas des surfaces noires fortement rugueuses. Ces surfaces peuvent être assimilées à des milieux diélectriques rugueux avec des pertes : ces pertes entraînent une absorption de la lumière incidente, alors que la rugosité donne lieu au phénomène de diffusion. Dans les cas que nous étudions, la rugosité des surfaces est telle qu'aucun faisceau spéculaire n'est obtenu: la réflexion est délocalisée. Nous décrivons ci-dessous une technique qui permet d'augmenter l'absorption de peintures noires rugueuses ayant au départ des performances standard (AA 96%) en termes de quantité totale de lumière diffusée. Nous montrons en particulier qu'il est possible d'augmenter l'absorption de telles peintures jusqu'à des valeurs supérieures à 99%

Etant donné que l'absorption de la lumière est obtenue à partir d'une épaisseur de peinture de l'ordre de 200  $\mu\text{m}$ , nous avons fixé la partie imaginaire de l'indice du substrat à  $10^{-2}$ . Ce paramètre influant peu sur la quantité de lumière diffusée (tous les résultats numériques l'ont montré), aucune investigation supplémentaire n'a été menée pour en déterminer plus précisément la valeur. Pour déterminer la partie réelle de  $n_s$ , nous avons par contre procédé en plusieurs étapes au LOSCM :

- Le profil de la surface a été mesuré à l'aide d'un microscope à force atomique (AFM).
- La diffusion de la surface nue a été mesurée expérimentalement, en fonction de la longueur d'onde et de la direction de diffusion
- Des calculs de diffusion ont été effectués à l'aide des outils de simulation, à partir du profil mesure de la surface, pour différentes valeurs de  $n_s$ .
- La valeur de  $n_s$  a été déterminée par ajustement des résultats numériques avec les résultats expérimentaux.

Pour valider la solution obtenue ( $n_s=1.75+i.10^{-2}$ ), la même procédure a été utilisée dans le cas d'une peinture couverte d'une couche mince de bas indice connu (couche de  $\text{SiO}_2$ :  $n\hat{A}1,5$ ) et dans le cas d'une peinture couverte d'une couche mince de haut indice connu (couche de  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ :  $n\hat{A}2,1$ ). Dans ces deux cas une technique de dépôt assistée par faisceau d'ions (IAD) garantissait la parfaite réplification de la surface de la peinture par la couche. Cette propriété a été vérifiée à l'aide de mesures AFM. Le tableau suivant montre la comparaison entre les résultats numériques et les résultats expérimentaux pour ces différentes situations. On peut voir qu'un très bon accord théorie/expérience a été obtenu. Par cette méthode l'indice de la peinture peut être déterminé avec une précision de l'ordre de 1%.

|        | surface nue                                | surface couverte d'une couche de $\text{SiO}_2$ | surface couverte d'une couche de $\text{Ta}_2\text{O}_5$ | surface couverte d'une couche de Cryolithe |
|--------|--|---|--|--|
| MESURE | $4.63.10^{-2}$                             | $1.95.10^{-2}$                                  | $1.35.10^{-1}$   | $2.18.10^{-1}$                             |
| CALCUL | $4.82.10^{-2}$ (TE)<br>$4.35.10^{-2}$ (TM) | $2.02.10^{-2}$ (TE)<br>$1.91.10^{-2}$ (TM)      | $1.34.10^{-1}$ (TE)<br>$1.25.10^{-1}$ (TM)               | $8.41.10^{-1}$ (TE)<br>$7.45.10^{-1}$ (TM) |

**Tableau I** - Comparaison entre résultats numériques et résultats expérimentaux.

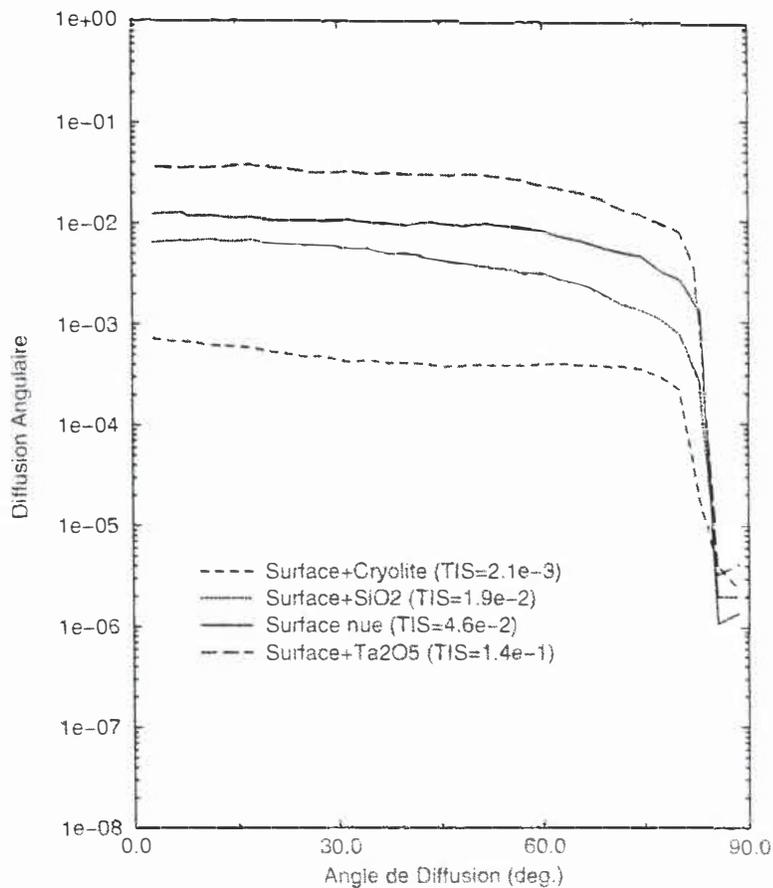
Longueur d'onde de mesure :  $\lambda_0=0.633 \mu\text{m}$ . Taille du spot sur l'échantillon : 5 mm<sup>2</sup>.

Incidence normale. Les valeurs numériques correspondent à la diffusion intégrée dans tout l'espace

Les couches d'oxyde sont réalisées par IAD, la couche de cryolithe par EBD.

La connaissance de la valeur de  $n_s$  a permis d'optimiser le choix de la couche à déposer pour avoir un effet anti-diffusant maximum. Compte tenu de cette valeur, la meilleure solution, parmi les matériaux en couches minces déposés dans notre laboratoire, est donnée par la cryolithe dont l'indice ( $n=1.3$ ) est proche de la valeur théorique qui donne un effet anti-diffusant optimum. Le tableau I montre qu'avec un tel revêtement, seuls 0.22% de la lumière incidente sont diffusés, ce qui correspond à une absorption de 99.78%. La figure B-1 donne les allures des diffusions angulaires obtenues dans les différents cas. Le léger désaccord obtenu dans le cas d'un revêtement en cryolithe est probablement dû à la technique de dépôt à faible énergie utilisée (évaporation par canon à

électrons : EBD) qui ne garantit pas une parfaite répliation du profil de la peinture. Précisons que les mesures confirment le caractère achromatique des performances obtenues.



**Fig. B - 1** : Diffusion angulaire. Incidence normale.  $\lambda_0=0.633 \mu\text{m}$ . Taille du spot :  $5 \text{ mm}^2$ . Ces indicatrices sont mesurées pour différents matériaux en couches minces réalisés par IAD (cas des oxydes) ou EBD (cas de la cryolithe) sur une surface noire rugueuse.

### C- SEQUENCES METAL/DIELECTRIQUE POUR UNE ABSORPTION MAXIMALE SUR UN SUBSTRAT OPTIQUE TRANSPARENT

Nous abordons maintenant le problème des alternances métal/diélectrique pour une efficacité maximale du composant absorbant. L'idée de base permettant de garantir le caractère achromatique consiste à utiliser des couche métalliques. Toutefois celles-ci doivent être de faible épaisseur, afin de ne pas rompre avec le caractère interférentiel du multicouche.

### C-1- Synthèse

En Figure C-1 nous présentons une solution constituée de 8 couches faisant appel à un diélectrique et deux métaux. Cette solution est obtenue à partir de méthodes utilisées au LOSCM depuis de nombreuses années, et basées sur des incréments déterministe (simplex...) ou aléatoire (recuit simulé). La synthèse ne constitue pas un problème en soi [C1] si l'on accepte de mettre en place un certain nombre d'algorithmes sophistiqués pour réduire le temps de calcul de l'une ou l'autre technique. Pour obtenir les performances calculées en Figure C-1, différents métaux (Argent, Aluminium, Nickel...) ou diélectriques (haut ou bas indice) peuvent être envisagés. Toutefois le choix des matériaux impose la précision et sensibilité requises quant au contrôle de la fabrication des empilements, qui constitue un problème crucial. En effet, on montre que l'absorption croît comme la plus faible des épaisseurs métalliques déposées. En Figure C-1 nous obtenons une absorption large-bande de l'ordre de 0.9999 ( $R < 10^{-4}$ ) dans une large partie du spectre visible. Nous avons vérifié que ces performances sont peu sensibles à l'incidence ou la polarisation de la lumière incidente.

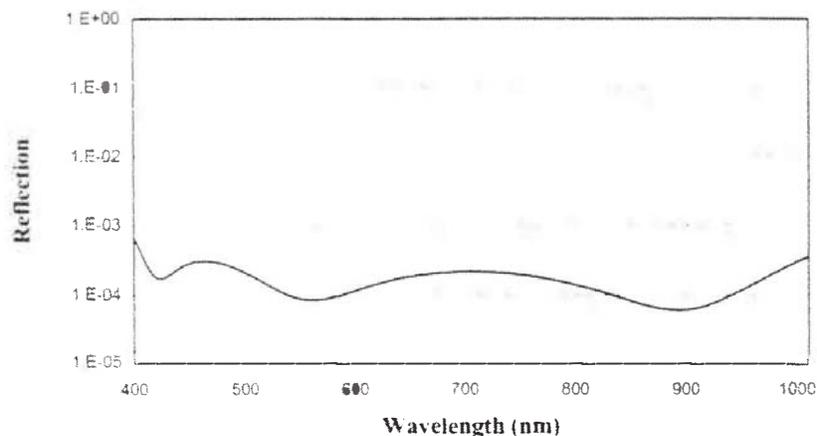


Fig. C-1 : Réflexion spectrale d'un absorbeur constitué de 8 couches et 3 matériaux.

### C-2- Caractérisation

Outre le problème du contrôle de la formation des empilements, la première difficulté concerne la détermination de la loi de dispersion des indices complexes des métaux en couches minces, dont nous avons besoin pour les calculs de synthèse. Lorsque la couche métallique est suffisamment épaisse et donc opaque, l'ellipsométrie permet en général de résoudre ce problème, aux phénomènes d'oxydation près qu'il est important de détailler. Par contre les difficultés croissent avec la transparence des couches métalliques, et il faut même envisager d'étudier l'évolution de l'indice complexe avec des épaisseurs de plus en plus faibles, jusqu'à quelques Å. Les phénomènes d'oxydation in-situ ou ex-situ, dont dépend le choix de la séquence métal/diélectrique, peuvent être cruciaux, ainsi que les problèmes de compacité des couches les plus fines. En conséquence la

maîtrise des composants doit passer par la mise en place de moyens de caractérisation originaux et complémentaires, en cours de finition au laboratoire.

### C-3- Réalisation

Pour réaliser les premiers composants, nous avons bénéficié de l'expérience acquise grâce au soutien du CNES pour élaborer différentes solutions quant à la conception et la réalisation de micro-filtres devant équiper un futur détecteur multispectral. Les performances requises portant sur une zone de transmission maximale associée à une réjection large-bande en l'absence de verres colorés, les formules de filtres sont relativement complexes et peu tolérantes aux erreurs de réalisation. Une solution classique de type "tout diélectrique" peut s'obtenir à l'aide d'un couple de matériaux dits "tendres" à fort choc d'indice (39 couches) fabriqués par Electron Beam Deposition, ou à partir de matériaux "durs" réalisés par Ion Assisted Deposition ou Ion Plating, avec un choc d'indice moindre (66 couches). Dans les deux cas un système de contrôle optique polychromatique sur des verres satellites est de rigueur, si l'on veut assurer la répétabilité du process et l'uniformité des composants. Compte tenu de l'ensemble de ces difficultés, qu'il faut associer aux problèmes de déformation de surface d'onde, de tenue "climatique" et de compatibilité avec les techniques de microgravure, il est souhaitable de disposer de solutions de remplacement mettant en jeu un nombre très réduit de couches minces. Ces solutions s'obtiennent à l'aide de séquences métal/diélectrique de type Fabry-Perot double-onde, présentant les spécifications requises. Ces mêmes structures sont encore utilisées au laboratoire pour un confinement efficace de l'émission spontanée dans les microcavités planaires lumineusescentes.

Pour l'application présente, ces structures ont été modifiées pour réaliser quelques premiers essais d'absorbeur. A ce titre nous avons réalisé la partie inférieure (les premières couches) d'un absorbeur, afin d'en évaluer les difficultés de réalisation. En **Figure C-2** on constate que l'absorption mesurée est du même ordre de grandeur que l'absorption calculée ( $A > 90\%$  sur le spectre visible), mais de nombreuses anomalies doivent être expliquées en détail avant de réaliser l'absorbeur complet. Toutefois ces premiers résultats laissent présager de la suite des opérations.

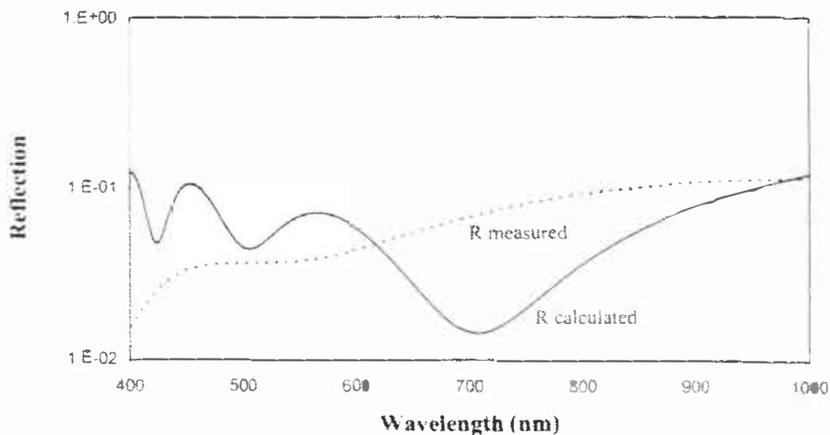


Fig. C-2 : Calcul et mesures des premières couches d'un absorbeur.

## D- CONCLUSION

Deux types d'absorbeurs large-bande ont été conçus et réalisés à partir de surfaces noires rugueuses multicouches, ou grâce à l'utilisation d'alternances métal/diélectrique sur substrat plan. Chaque type de composant présente des avantages et des inconvénients qu'il faut analyser en regard des problèmes mécaniques (dureté, vibrations, déformation...) ou climatiques (température, humidité...). Pour l'instant nos efforts ont été concentrés en priorité sur des composants "noirs" rugueux dont l'absorption a pu être optimisée jusqu'à 99,78% dans le visible, performance qui reste à étendre au domaine infra-rouge. Quant aux structures de type métal/diélectrique, les réalisations sont en cours..

## REFERENCES

- [B1] H. Kaplan. "Black coatings are critical in optical design". *Photonics Spectra* **31**. 48-50 (1997).
- [B2] C. Amra, G. Albrand, and P. Roche, "Theory and application of antiscattering single layers: antiscattering antireflection coatings", *Appl. Opt.* **16**, 2695-2702 (1986).
- [B3] P. Vincent, "Differential methods", *Progress in Optics*, E. Wolf ed., Springer-Verlag, Berlin, 1980, vol. **22**, pp. 101-121
- [B4] L. Li. "Formulation and comparison of two recursive matrix algorithms for modeling layered diffraction gratings", *J. Opt. Soc. Am. A* **13**, 1024-1030 (1996).
- [B5] H. Giovannini and C. Amra. "Scattering-reduction effect with overcoated rough surfaces: theory and experiment". *Appl. Opt.* **36**, 5574-5579 (1997).
- [C1] J. A. Dobrowolski, L. Li and R. A. Kemp. *Appl. Opt.*, **34**, 5673 (1995)