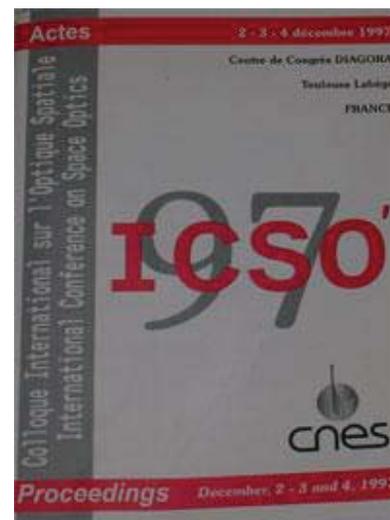


International Conference on Space Optics—ICSO 1997

Toulouse, France

2–4 December 1997

Edited by George Otrio



Synthesé et faisabilité des traitetments optiques pour l'instrument IASI

*Frédéric Lemarquis, Gérard Marchand, Claude Amra,
Christian Buil, et al.*



icso proceedings



International Conference on Space Optics — ICSO 1997, edited by Georges Otrio, Proc. of SPIE Vol. 10570,
1057027 · © 1997 ESA and CNES · CCC code: 0277-786X/18/\$18 · doi: 10.1117/12.2326633

SYNTHESE ET FAISABILITE DES TRAITEMENTS OPTIQUES POUR L'INSTRUMENT IASI

Frédéric LEMARQUIS, Gérard MARCHAND, Claude AMRA
*Laboratoire d'Optique des Surfaces et des Couches Minces, UPRES.A CNRS 6080
Ecole Nationale Supérieure de Physique de Marseille, Dom. Univ. de S. Jérôme, 13397 MARSEILLE
tel: 04 91 28 83 28 fax: 04 91 28 80 67*

Christian BUIL, Bernard COUSIN, Georges OTRIO
*Centre National d'Etudes Spatiales, Division Instrumentation, Département Instrument Optique
18 avenue Edouard Belin, 31401 TOULOUSE Cedex 4
tel: 05 61 27 64 62 fax: 05 61 28 26 92*

RESUME - Compte tenu du domaine spectral utile de l'instrument IASI (3,5-15,5 μm), ainsi que des matériaux disponibles et des technologies de dépôt utilisées, il est nécessaire d'étudier en détail les problèmes de synthèse large bande, les phénomènes d'absorption, et la tenue mécanique des traitements optiques. Des moyens spécifiques de contrôle de dépôt dans le moyen infrarouge sont développés pour la réalisation de certains composants multicouches. Les résultats obtenus à ce jour confirment la faisabilité du projet.

ABSTRACT - Due to the spectral range of the IASI instrument (3.5-15.5 μm), available materials and deposition technologies, it is necessary to carefully study broad band synthesis problems, absorption phenomena, and mechanical properties of the optical coatings. Specific means of deposition monitoring in this infrared range are developed for the realisation of some filters. All results confirms the project feasibility.

1 - INTRODUCTION

Dans sa partie optique, l'instrument IASI (Fig. 1) est essentiellement constitué d'un interféromètre de Michelson, utilisé comme spectromètre de Fourier (boîte chaude), suivi d'un éclateur spectral permettant de séparer le domaine spectral utile 3.5 - 15.5 μm en trois domaines plus restreints, 3.5 - 5 μm , 5 - 8,2 μm et 8,2 - 15,5 μm (boîte froide).

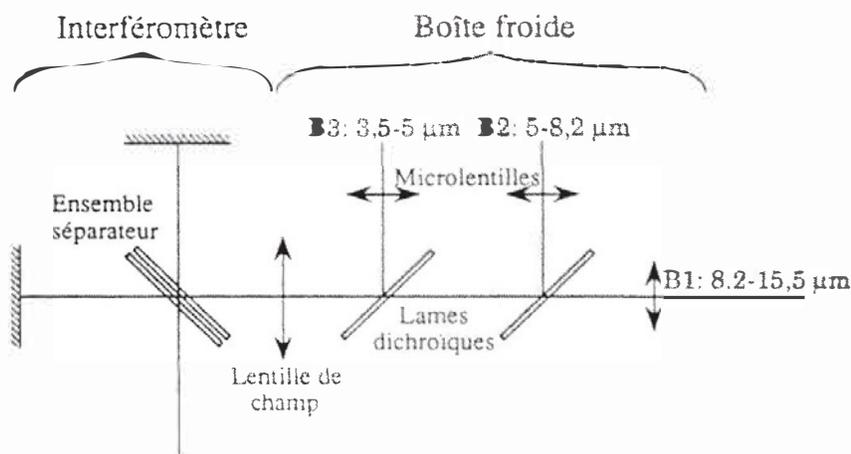


Fig. 1: Représentation schématique de la partie optique de IASI.

Depuis plusieurs années, le Laboratoire d'Optique des Surfaces et des Couches Minces, en collaboration avec le CNES, travaille sur l'ensemble des traitements optiques nécessaires à cet instrument, tout d'abord ceux de la boîte chaude, puis plus récemment ceux de la boîte froide.

Ces traitements assurent des fonctions classiques de filtrage optique (antireflets, séparatrice, miroirs dichroïques) sur lesquelles on dispose d'une abondante littérature. Toutefois, le domaine spectral considéré ici, couvrant plus de deux octaves, est bien plus étendu qu'à l'ordinaire où l'on ne dépasse guère une octave. Ceci complique le travail de synthèse (recherche d'empilements), réduit le nombre de solutions, et certaines contraintes se répercutent sur le choix des matériaux qui, dans le moyen infrarouge, ne sont pas tous exempts d'absorption. A l'exercice traditionnel de synthèse s'ajoute alors le souci de minimiser les pertes.

La réalisation des traitements présente, elle aussi, certaines difficultés spécifiques au domaine spectral considéré. Pour une même formule, un empilement travaillant à $5\mu\text{m}$ est dix fois plus épais qu'un autre travaillant à $0,5\mu\text{m}$. Ceci sous-entend des quantités de matériau et des temps de manipulation dix fois plus importants. D'autre part, les systèmes de contrôle optique de formation des dépôts, utilisés avec succès au laboratoire dans les domaines visible et proche infrarouge, doivent être, au préalable, adaptés et qualifiés pour le moyen infrarouge.

2 - CHOIX DES MATERIAUX

Contrairement au domaine visible, le choix des matériaux, dans le domaine spectral de fonctionnement de l'instrument IASI (moyen infrarouge $3,5-15,5\mu\text{m}$), est particulièrement problématique, tant pour les substrats que pour les traitements optiques.

Concernant les substrats, seuls sont envisageables des matériaux de haut indice du type ZnSe ($n=2,43$) ou Ge ($n=4$), ou des matériaux de bas indice tel que KBr ($n=1,5$).

Les substrats de haut indice nécessitent évidemment des traitements antireflets appropriés afin de limiter les pertes par réflexion (17% pour ZnSe et 36% pour Ge). On notera que le Ge massif n'est pas transparent en dessous de $1,8\mu\text{m}$. Le ZnSe est pour sa part transparent dans le domaine visible mais par contre, se montre de plus en plus absorbant au delà de $14\mu\text{m}$. Ces deux matériaux présentent de bonnes caractéristiques mécaniques.

Les substrats de bas indice présentent de bien meilleures caractéristiques optiques. Leur transparence s'étend de l'ultraviolet à l'infrarouge lointain et leur facteur de réflexion est de l'ordre de 4% seulement. En revanche, ces matériaux sont particulièrement tendres, fragiles, et surtout hygroscopiques. Il n'est pas envisageable de les utiliser sans protection ou précaution. Les substrats de bas indice de type fluorure ($\text{MgF}_2, \text{CaF}_2, \dots$), bien que présentant de meilleures caractéristiques mécaniques ne sont pas utilisables, leur bande de transparence ne s'étendant pas jusqu'à $15,5\mu\text{m}$.

Concernant les matériaux utilisables en couches minces optiques, le choix est également très limité. Il est en grande partie dicté par des résultats préliminaires de synthèse. De manière générale, on choisit pour constituer des traitements optiques des matériaux présentant des rapports d'indice conséquents. A cette contrainte d'ordre théorique s'ajoute des contraintes sur la compatibilité des matériaux entre eux, sur la résistance et l'adhérence de ceux-ci en couches minces.

Le ZnS ($n=2,25$) et le Ge ($n=4$) répondent à ces critères et sont transparents dans le domaine spectral d'utilisation. Toutefois, ce couple ne permet pas de constituer la totalité des traitements optiques de l'instrument IASI, notamment certains antireflets pour lesquels un matériau de bas indice est nécessaire. Compte tenu du domaine spectral considéré, le choix de ce dernier se limite aux fluorures et, le meilleur candidat semble être YF_3 ($n=1,40$). Toutefois, ce matériau n'est pas parfaitement transparent jusqu'à $15,5\mu\text{m}$. De plus, les couches de fluorures réalisées classiquement par évaporation-condensation sous vide sont poreuses et, après remise à l'atmosphère, sujettes à des phénomènes d'adsorption d'eau liquide; ces couches présentent par conséquent les bandes d'absorption de l'eau dans l'infrarouge ($3,6$ et au delà de $11\mu\text{m}$).

Afin d'affiner les résultats de synthèse, il est impératif de bien connaître, pour nos conditions d'évaporation, les constantes optiques de ces matériaux en couches minces: indice de réfraction et coefficient d'extinction. Ces constantes ont été déterminées sur des couches uniques de chacun des matériaux lors d'études préliminaires. Elles sont données aux figures 2a, 2b et 2c. Il apparaît clairement que l'utilisation d' YF_3 entraînera d'importantes pertes par absorption, particulièrement vers $15.5 \mu m$.

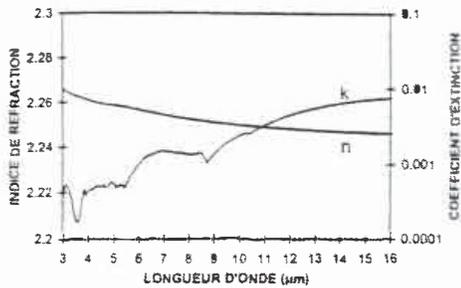


Fig. 2a

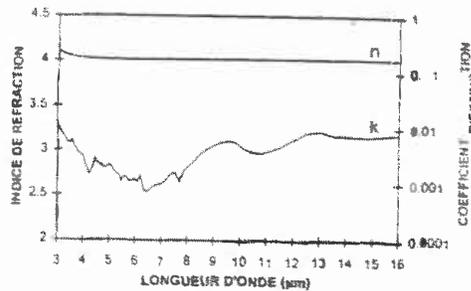


Fig. 2b

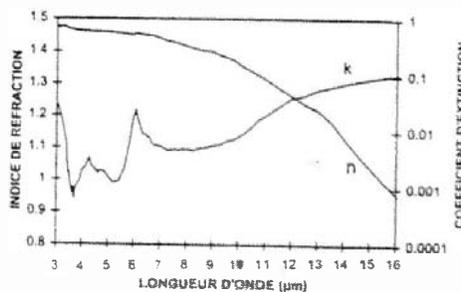


Fig. 2c

Fig. 2a,2b,2c: Indices de réfraction et coefficients d'extinction respectifs de ZnS, Ge et YF_3 en couches minces. On remarquera qu' YF_3 est, de loin, le plus absorbant des trois.

Il est à noter que les résultats obtenus pour le germanium dépendent fortement des conditions de dépôt.

3 - SYNTHÈSE DES TRAITEMENTS OPTIQUES

3.1 - Boîte chaude (interféromètre)

Pour ce qui nous concerne, la boîte chaude de l'instrument se résume aux deux lames de l'ensemble séparateur. Cet ensemble doit être opérationnel dans le domaine utile 3,5-15,5 μm mais également à la longueur d'onde de 1,54 μm utilisée pour étalonner l'interférogramme, ceci excluant donc le recours à des lames en Ge.

L'utilisation de lames en ZnSe est elle aussi exclue en raison de l'absorption intrinsèque trop importante de ce matériau au delà de 14 μm . Des mesures ont montré, pour une épaisseur traversée de 5 mm, une absorption de l'ordre de 15 % à 15,5 μm . Sachant que les lames ont une épaisseur de 15 mm et qu'elles sont traversées deux fois chacune, les pertes pour l'interféromètre seraient de l'ordre de 86 %, autant dire inacceptables, et ce sans même envisager d'éventuelles pertes dans les traitements optiques.

Malgré toutes les réticences liées à son utilisation, le KBr est donc la solution qui pour l'heure a été retenue. En oubliant les difficultés expérimentales, on peut trouver, pour ce type de substrat, un traitement séparateur efficace sur l'ensemble du domaine spectral d'utilisation (Fig.3).

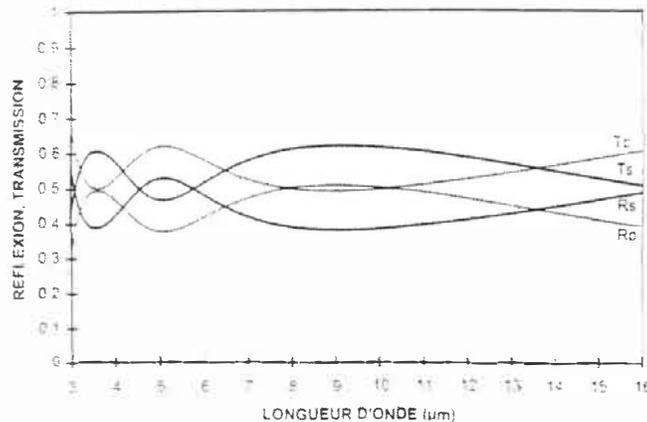


Fig. 3 : Propriétés optiques calculées d'un empilement séparateur sur substrat KBr. Incidence de 30° dans l'air.

En revanche, il n'existe aucune méthode permettant de formuler un traitement antireflet, sur un substrat de bas indice, couvrant un domaine spectral aussi vaste. Cette absence de traitement implique des pertes par réflexion de l'ordre de 4% par face, pour la face arrière de la lame séparatrice et les deux faces de la lame compensatrice. Toutefois, ces surfaces ne peuvent rester sans aucun traitement et demandent à être protégées de l'humidité ambiante. Du point de vue de la synthèse, cette protection ne doit pas dégrader les performances optiques et se limite à une couche unique. Le choix du matériau et l'épaisseur de la couche permettant d'obtenir une protection efficace relèvent de l'expérimentation.

3.2 - Boîte froide (éclateur spectral)

Les substrats choisis sont le ZnSe pour la lentille de champ et les deux lames dichroïques, le Ge pour les microlentilles placées devant les récepteurs.

Lentille de champ ZnSe:

La lentille de champ doit être traitée antireflet sur tout le domaine spectral utile 3,5-15,5 μm . La synthèse d'un tel traitement sur un domaine aussi étendu n'est pas une grande difficulté théorique dans le cas d'un substrat de haut indice tel que le ZnSe. Il est cependant impératif d'utiliser dans ces empilements des matériaux présentant des indices proches de ceux des milieux extérieurs, soit ZnS et YF₃ dans notre cas. L'utilisation de ce dernier conduit inévitablement à des pertes par absorption vers 15,5 μm . Compte tenu de l'importance des performances à cette longueur d'onde, une attention

particulière à été portée pour limiter ces pertes. La figure 4 montre les performances que l'on peut ainsi obtenir.

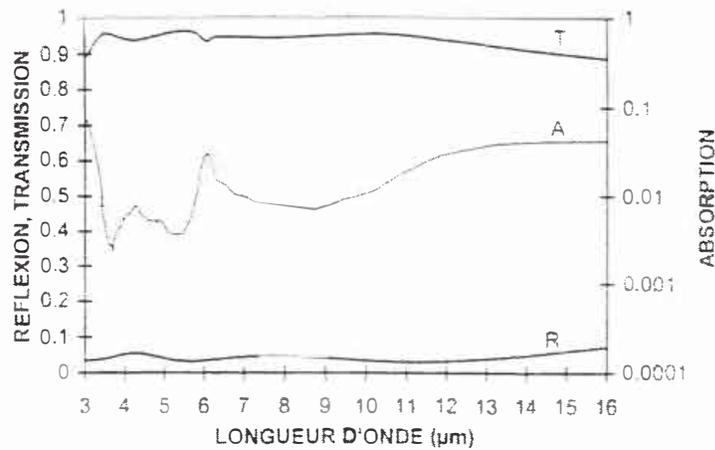


Fig.4 : Propriétés optiques calculées d'un traitement antireflet sur substrat ZnSe

Microlentilles Ge

Les microlentilles placées devant chacun des récepteurs nécessitent des traitements antireflets adaptés à chacun des domaines spectraux B1, B2, B3. Compte tenu de l'étendue limitée de chacun de ces domaines, la synthèse de ces traitements ne pose pas de difficulté particulière. On veillera seulement, pour la bande B1 à limiter les pertes par absorption.

Lames dichroïques ZnSe

Dans la configuration initiale (Fig. 1), la bande B1 (8,2-15,5 μm) est filtrée par transmission au travers des deux lames dichroïques.

De manière générale, les traitements dichroïques sont constitués d'un ensemble de couches assurant un fort facteur de réflexion dans une zone spectrale et une transmission maximale dans une zone contiguë. Pour assurer cette transmission maximale, dans le cas de substrats de haut indice, il est nécessaire d'introduire dans l'empilement une structure de type antireflet pour laquelle il est difficile d'éviter tout recours au fluorure d'yttrium.

De plus, les faces arrière des lames dichroïques doivent être traitées antireflet pour les bandes spectrales destinées à être transmises, ces traitements ayant eux aussi recours au fluorure d'yttrium. Le filtrage de la bande B1 par transmission induit par conséquent d'importantes pertes par absorption, tant dans les substrats que dans les couches. Ce constat nous a conduit à reconsidérer la configuration de la boîte froide, de façon à minimiser ces pertes.

On peut dans un premier temps penser placer la seconde lame dichroïque sur le faisceau réfléchi par la première, de manière à filtrer la voie B1 par deux réflexions successives, ceci évitant toutes les pertes par transmission. Toutefois, une telle solution modifie complètement l'architecture de l'ensemble et n'a pas été retenue. En conservant l'architecture initiale, la solution idéale consisterait à obtenir la bande B1 par réflexion sur la première lame. Sans entrer dans le détail, cette solution demande des empilements d'une telle complexité qu'on la laissera confinée dans son cadre théorique.

Une alternative plus réaliste consiste à obtenir la bande B1 par réflexion sur la seconde lame. La figure 5 montre le gain que l'on peut ainsi espérer pour le seul traitement dichroïque.

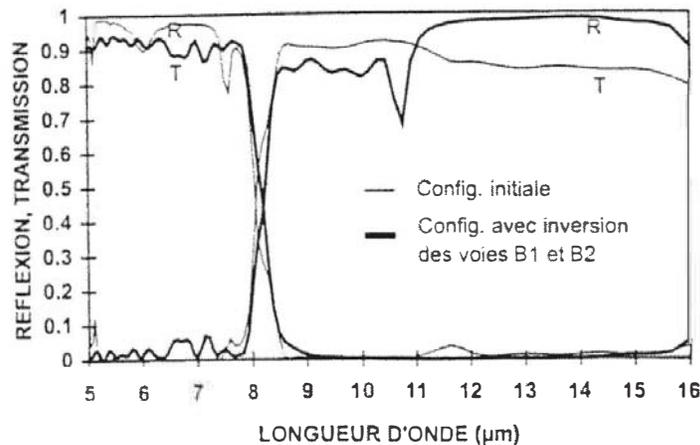


Fig. 5 : Comparaison des performances calculées pour les voies B1 et B2 du traitement dichroïque de la lame n°2. L'inversion des voies B1 et B2, par rapport à la configuration initiale, améliore sensiblement l'efficacité du système pour la voie B1. Incidence de 30° dans l'air, état de polarisation P

Le fait de ne plus traverser la lame et le traitement antireflet de la face arrière améliore encore ce résultat. A 15,5 μm, on peut attendre une amélioration des performances de l'ordre de 30 %.

Bien qu'avantageuse du point de vue optique, cette nouvelle configuration complique cependant la réalisation du traitement de la seconde lame, son épaisseur mécanique étant quasiment doublée.

Concernant le traitement de la première lame dichroïque, identique pour les deux configurations, les performances théoriques sont données par la figure 6.

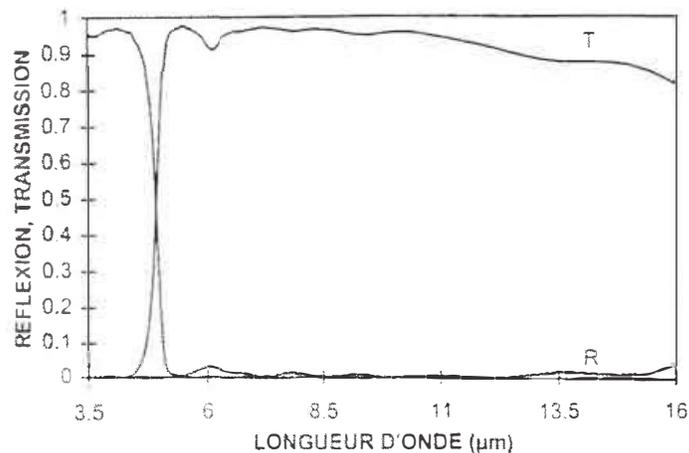


Fig. 6 : Propriétés optiques calculées du traitement dichroïque de la première lame. Incidence de 30° dans l'air, état de polarisation P

4 - ETUDE DE FAISABILITE

4.1 - Généralités; conséquences

Une fois déterminée la formule d'un empilement, et choisie la technologie de réalisation, l'un des facteurs clé pour l'obtention de bonnes performances est la précision avec laquelle on est capable de maîtriser les épaisseurs des couches déposées.

La méthode de contrôle la plus répandue est la micro balance à quartz dont le principe vise à mesurer la masse de matériau déposé. Connaissant sa densité, on déduit l'épaisseur mécanique de la couche. L'efficacité de cette méthode repose sur un important travail d'étalonnage et sur une grande répétabilité des évaporations. D'autre part, certains empilements sont particulièrement intolérants vis à vis des erreurs de réalisations et sont pratiquement irréalisables de cette façon.

Le contrôle optique des épaisseurs déposées est une méthode mieux adaptée pour ces cas difficiles. Son principe consiste à suivre en temps réel, durant le dépôt, l'évolution des propriétés optiques de l'empilement en cours de réalisation, par exemple son facteur de transmission à une longueur d'onde judicieusement choisie. Le premier avantage de cette méthode est d'être sensible à l'épaisseur optique déposée qui est la grandeur physique sur laquelle repose tout phénomène interférentiel. De plus, cette méthode permet de contrôler le dépôt sur le substrat à traiter. Enfin, cette méthode permet à chaque nouvelle couche déposée de compenser automatiquement les erreurs commises sur les couches précédentes.

De tels systèmes de contrôle optique ont été largement développés au LOSCM, dans une gamme de longueurs d'onde allant du visible au proche infrarouge. La mise en œuvre de ces systèmes sous-entend évidemment que les matériaux évaporés soient transparents dans ce domaine spectral.

Or, certains des empilements présentés au chapitre précédent, notamment les traitements dichroïques de la boîte froide, sont massivement constitués de couches de germanium. Ce matériau étant absorbant au dessous de 1,8 μm , nous avons choisi de développer un système de contrôle optique adapté au moyen infrarouge.

4.2 - Moyens mis en œuvre

Toutes les évaporations nécessaires à la caractérisation des matériaux et tous les essais de faisabilité des traitements sont réalisés dans un bâti d'évaporation dit de développement. Celui-ci est modifiable dans sa configuration et permet ainsi de mettre au point les méthodes de dépôt et de contrôle optique. L'évaporation est assurée par un canon à électrons. Les dépôts sont réalisés sans assistance ionique. Deux hublots permettent à un faisceau optique de traverser l'échantillon en cours de traitement. Le suivi de l'évolution des propriétés optiques est assuré par un spectrophotomètre à réseau fonctionnant de 0,6 à 16 μm . Ce spectrophotomètre sert également à mesurer les facteurs de transmission et de réflexion des traitements, pour l'incidence normale.

Selon le traitement à réaliser, le contrôle optique peut se faire dans les domaines visible/proche infrarouge (0,6-1,7 μm) ou moyen infrarouge (2-10 μm). Dans le premier cas, des hublots en silice et une source quartz-iodée sont utilisés. Pour le moyen infrarouge, nous utilisons des hublots ZnSe traités antireflets, la source étant un corps noir. L'ensemble du dispositif est présenté figure 7.

La mise en œuvre de cet évaporateur est postérieure aux premières études de matériaux et si des résultats similaires ont été obtenus pour le ZnS et le YF₃, les conditions de dépôt demandent encore à être optimisées pour le germanium.

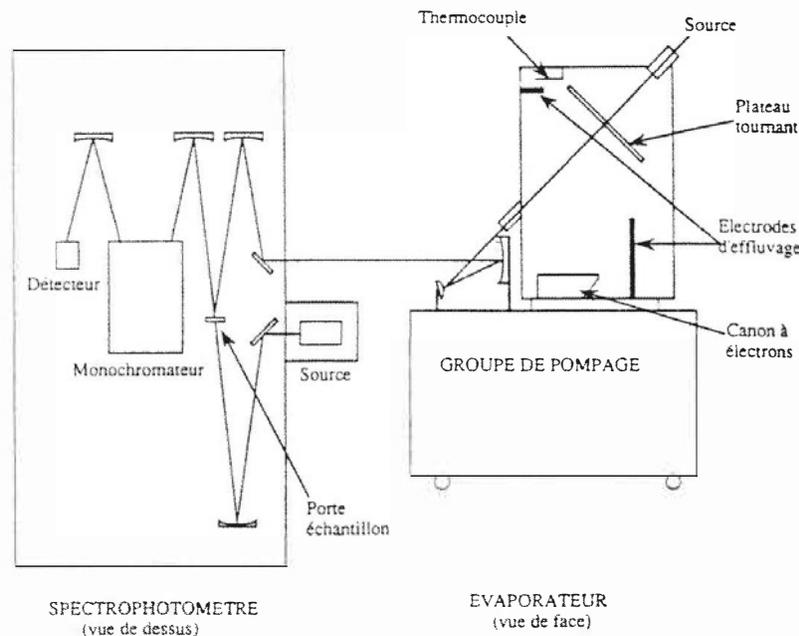


Fig. 7 : Dispositif mis en œuvre pour la réalisation de traitements pour le moyen infrarouge.

4.3 - Faisabilité

Boîte chaude

Le polissage de lames en KBr semble particulièrement délicat. La qualité des états de surface, variable selon les fournisseurs, est dans tous les cas bien moindre que celle obtenue pour des verres optiques. Le nettoyage de ces substrats avant traitement est tout aussi délicat et les divers essais effectués au laboratoire ont systématiquement conduit à une dégradation des surfaces. Les échantillons ont donc été traités sans aucune préparation.

L'adhérence des traitements sur ce type de substrat est très limitée et toute manipulation intempestive peut s'avérer dommageable. Des progrès significatifs ont été obtenus en protégeant la tranche des échantillons, et la périphérie des traitements, à l'aide d'un vernis hydrofuge. De plus les échantillons sont systématiquement montés dans des bûchettes métalliques, de façon à les protéger de toute déformation.

D'autre part, des essais ont été menés afin de mettre au point un revêtement protecteur pour les deux faces de la lame compensatrice et pour la face arrière de la lame séparatrice. Cette couche de protection a également été utilisée comme pré-traitement avant dépôt de l'empilement séparateur améliorant ainsi son adhérence. Afin de valider cette procédure, des tests de tenue climatique sont actuellement en cours au CNES à Toulouse.

La figure 8 donne les performances optiques mesurées de l'un des échantillons réalisés (traitement: séparateur + protection face arrière). Les pertes par absorption aux environs de 12 μm sont imputables aux conditions d'évaporation du germanium qui ne sont pas encore optimales.

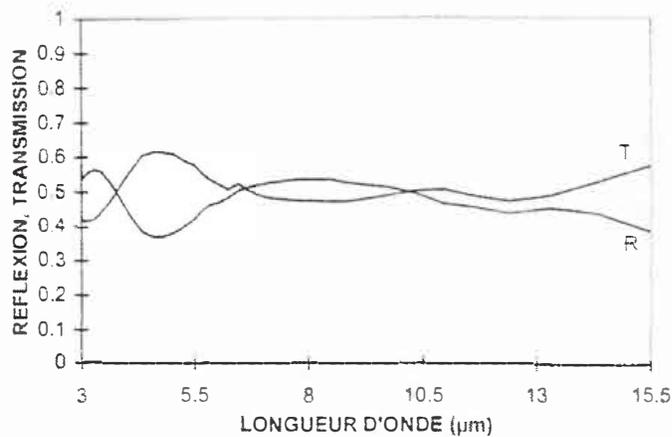


Fig. 8 : Propriétés optiques mesurées d'une lame séparatrice en KBr

Boîte froide.

Les premiers traitements réalisés sont ceux dont le dépôt pouvait être contrôlé optiquement dans les domaines visible et proche infrarouge, notamment l'antireflet de la lentille de champ (ZnSe). Les résultats expérimentaux sont en bon accord avec les prévisions théoriques (Fig. 9).

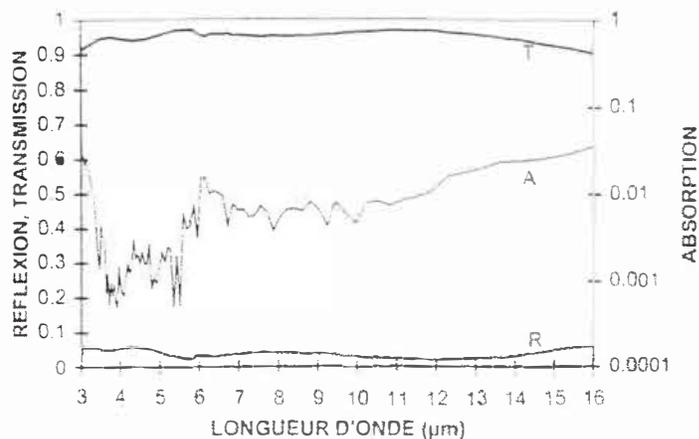


Fig. 9 : Propriétés optiques mesurées d'un antireflet large bande déposé sur substrat ZnSe

Concernant les traitements dichroïques, les essais de faisabilité viendront après la phase de qualification du système de contrôle optique dans le moyen infrarouge. Cette qualification est actuellement en cours.

5 - CONCLUSION.

Du point de vue théorique, la majorité des problèmes liés à la synthèse des traitements optiques de l'instrument IASI semble être résolue. Une caractérisation précise des matériaux en couches minces a permis de quantifier puis de réduire les pertes optiques du système. Une attention particulière a été portée à la bande B1 pour laquelle ce problème est le plus critique.

Du point de vue expérimental, des antireflets large bande ont été réalisés et donnent des résultats en bon accord avec la théorie.

Des résultats encourageants ont été obtenus pour les traitements optiques de l'ensemble séparateur, grâce aux efforts consentis sur la protection des substrats KBr.

La réalisation des filtres dichroïques est plus délicate et nécessite l'utilisation d'un contrôle de dépôt performant, le contrôle optique direct dans le moyen infrarouge semblant être le mieux adapté. La mise au point d'un tel système est en cours de qualification au laboratoire.

Enfin, de nombreux tests restent à réaliser pour étudier le comportement climatique et mécanique des composants. On dispose en effet de peu d'information à la fois sur la tenue de traitements sur substrat KBr, et sur la tenue d'empilement très épais comme ceux des lames dichroïques.