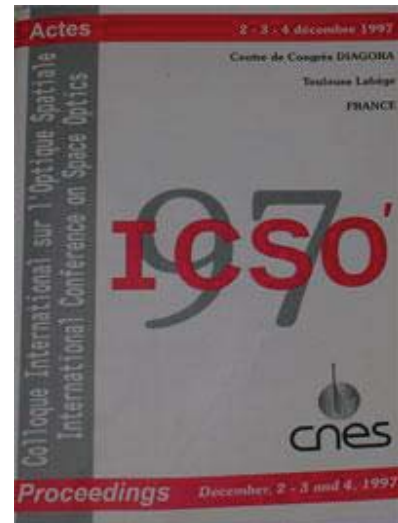


# International Conference on Space Optics—ICSO 1997

Toulouse, France

2–4 December 1997

*Edited by George Otrio*



## *Faisabilité d'un séparateur spectral intégré: étude de filtres optiques localisés et d'un diaphragme absorbant*

*J.-Y. Robic, F. Baume, M. Berger, T. Boudet, C. Calvat, et al.*



**FAISABILITÉ D'UN SÉPARATEUR SPECTRAL INTÉGRÉ :  
ÉTUDE DE FILTRES OPTIQUES LOCALISÉS ET D'UN DIAPHRAGME ABSORBANT**

**J.-Y. ROBIC, F. BAUME, M. BERGER, T. BOUDET, C. CALVAT,  
P. CHATON, O. LARTIGUE, E. QUESNEL, G. RAVEL <sup>(1)</sup>**

**J. MARGAIL, A. FOURNIER <sup>(2)</sup>**

**P. BODIN, D. LAUBIER <sup>(3)</sup>**

<sup>(1)</sup> LETI-CEA.G-DOPT-SCMDO  
17 rue des Martyrs, 38054 Grenoble Cedex 9, France

<sup>(2)</sup> LETI-CEA.G-DMITEC-SIA  
17, rue des Martyrs, 38054 Grenoble Cedex 9, France

<sup>(3)</sup> Centre National d'Etudes Spatiales  
18. avenue Edouard Belin, 31041 Toulouse Cedex 4

**RESUME**

Dans le cadre du développement des futurs détecteurs multispectraux pour satellites d'observation de la Terre, l'étude de faisabilité d'un sous-ensemble optique intégré a été engagée. Les difficultés résident dans la synthèse des filtres interférentiels répondant aux spécifications, la réalisation d'empilements zéro défaut de plus de cinquante couches et la localisation de trois filtres sur un diaphragme absorbant large bande.

Les choix technologiques effectués pour réaliser le dépôt et la gravure des filtres sont décrits, ainsi que les outils de synthèse mis en oeuvre pour définir la structure des empilements répondant aux gabarits optiques demandés.

Des exemples de réalisation sont communiqués et commentés en termes de faisabilité technologique et de performances.

**ABSTRACT**

*Future multi-wavelength range detectors for earth observation from satellites are now in the design phase. For this purpose, the feasibility of integrated spectral separator is investigated.*

*Several challenges must be concurrently overcome: the optical design of interferential filters with outstanding features, the zero-fault stacking of more than fifty layers per filter, and the localization of a 3 filter array through a broad band antireflecting absorber.*

*Technical options to realize the deposit and the patterning of filters and absorbing coatings will be presented.*

*Results achieved so far will be presented and compared to the specifications.*

## 1. INTRODUCTION

L'étude de faisabilité d'un séparateur spectral intégré a été engagée dans le cadre du développement des futurs détecteurs multispectraux pour mini-satellites d'observation de la Terre. Les objectifs sont la réalisation sur un même support de trois filtres optiques de géométrie bien définie séparés par un diaphragme absorbant non réfléchissant. Ce séparateur spectral intégré est hybridé à des barrettes de photodétecteur constituant ainsi un microsysteme optique comme celui schématisé en figure 1.

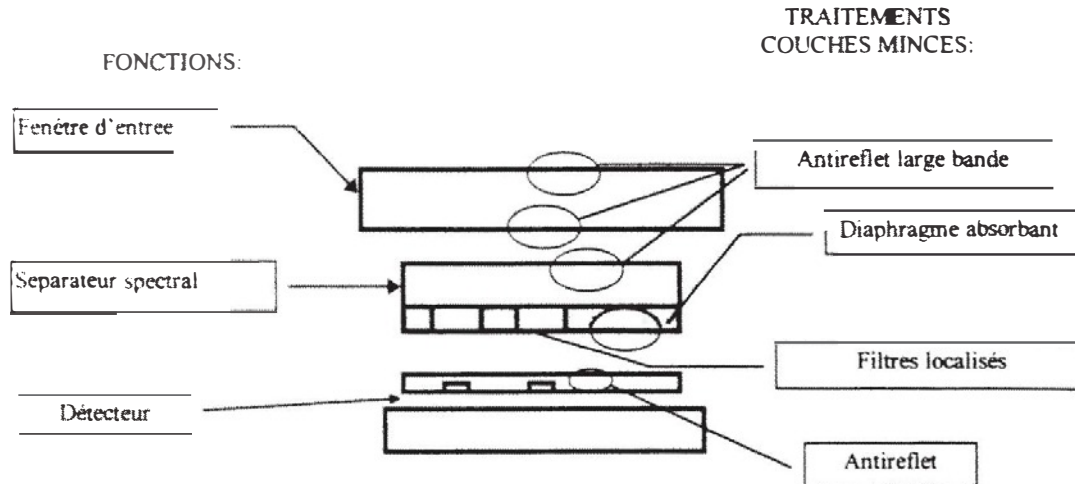


Figure 1 : exemple de microsysteme incluant filtrage, localisation et détection.

Ce type de microsysteme optique trouve tout son intérêt pour le domaine spatial en permettant une simplification de l'architecture du plan focal et en autorisant un gain appréciable de place et de poids.

Des techniques de dépôts, de photolithogravure et de gravure, issues des domaines de la microélectronique, des microsystemes ou de l'optique, doivent être choisies et adaptées pour permettre la miniaturisation et la localisation des traitements optiques sur des supports spécifiques pour l'optique. Nous présentons les solutions technologiques retenues pour réaliser le dépôt et la gravure des filtres optiques et de l'absorbant, ainsi que les outils de synthèse mis en oeuvre pour définir la structure des empilements répondant aux gabarits optiques spécifiés.

## 2. ARCHITECTURE DU SEPARATEUR SPECTRAL

L'architecture du séparateur spectral a été définie en fonction des barrettes de photodétecteurs. La solution retenue pour l'étude de faisabilité est une puce de détection comprenant trois lignes multispectrales de 7500 pixels au pas de  $13 \mu\text{m}$  « hybridé » au séparateur spectral dont les dimensions sont de l'ordre de 100 mm de long par 5 mm de large.

Le séparateur multispectral est constitué d'un support optique en alumine dont une face est recouverte d'un traitement antireflet large bande et dont l'autre face comprend un diaphragme absorbant ouvert de trois bandes sur lesquelles sont localisés trois filtres optiques (B1, B2, B3). La figure 2 schématise l'architecture du séparateur spectral. L'ouverture des bandes est de  $13 \mu\text{m}$  par 100 mm. Le pas entre bandes varie suivant les spécifications de 60 à  $600 \mu\text{m}$ .

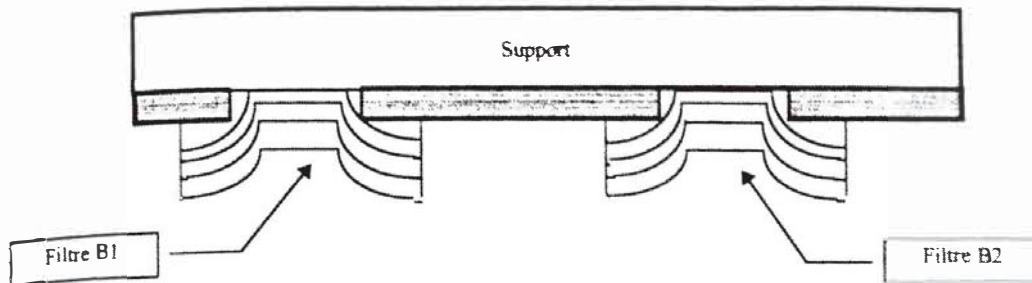


Figure 2 : localisation des filtres.

### 3. FILTRE : SYNTHÈSE, RÉALISATION, LOCALISATION

La synthèse des filtres optiques séparateurs nécessite une optimisation multicritères, car il faut obtenir à la fois la largeur de bande passante spécifiée avec des performances de transmission de 85% par dioptre et des taux de réjection importants sans imperfection locale sur tout le reste du spectre de 450 à 1100 nm.

Ces synthèses ont été réalisées grâce à une méthode reposant sur un algorithme mathématique de recuit simulé [1] [2].

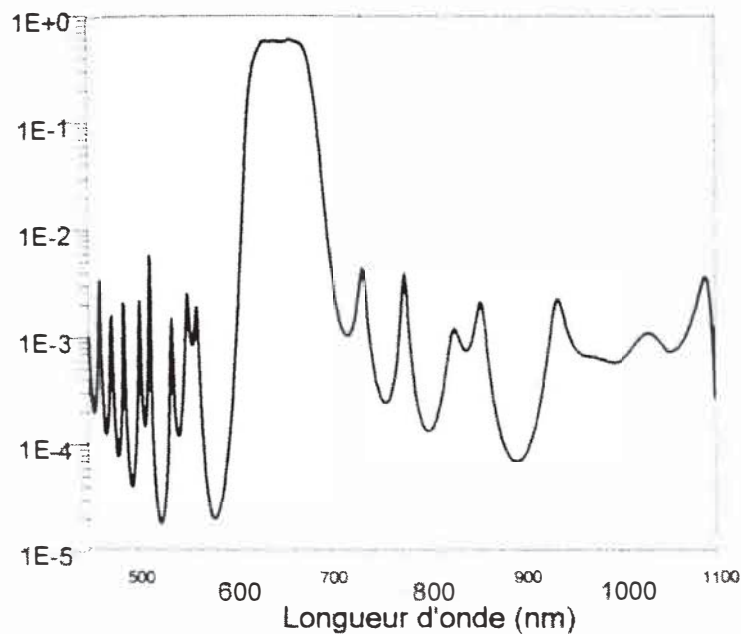


Figure 3a: réponse spectrale de l'ensemble détecteur et filtre B2.

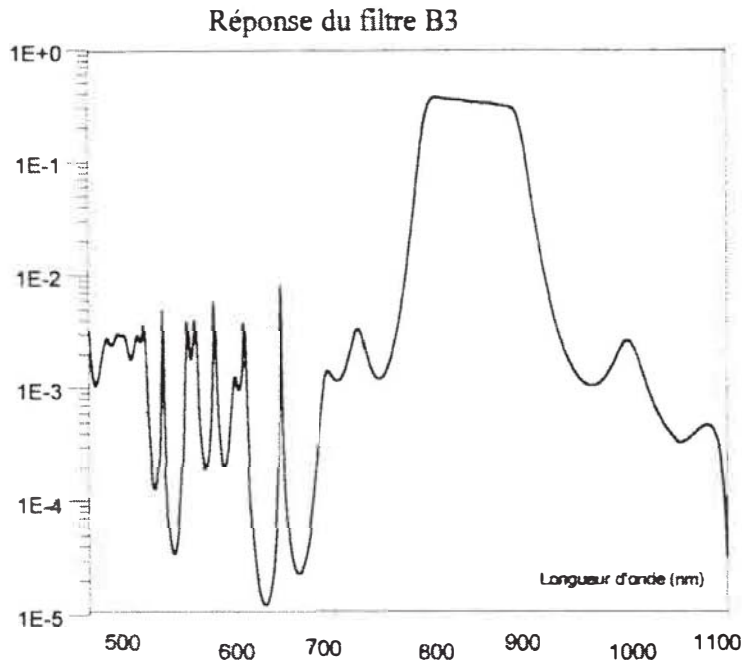


figure 3b: réponse spectrale de l'ensemble détecteur et filtre B3.

On trouve en figures 3a et 3b les réponses spectrales pour deux des trois filtres optiques, correspondants à la transmission du filtre multipliée par le rendement quantique du détecteur. Ces filtres interférentiels sont constitués d'un empilement de 50 à 60 couches alternées d'un matériau de bas indice  $\text{SiO}_2$  et d'un matériau de haut indice  $\text{TiO}_2$ , pour une épaisseur totale d'environ  $5 \mu\text{m}$ . Ces solutions permettent d'atteindre les performances suivantes, résumées dans le tableau 1.

| Filtres | tr 1/2 ?       | tr 3/2 ?       | Tbp<br>et centrage?    | $e < 6 \mu\text{m}$ ? | $R_r(\lambda)/R_{\text{max}} < 1\%$ ? |
|---------|----------------|----------------|------------------------|-----------------------|---------------------------------------|
| B1      | 0.12% (<0.25%) | 0.37% (<0.25%) | 94% & $\pm 1\text{nm}$ | oui                   | oui                                   |
| B2      | 0.22% (<0.25%) | 0.89% (<0.4%)  | 90% & $\pm 1\text{nm}$ | oui                   | oui                                   |
| B3      | 0.3% (<0.25%)  | 0.83% (<1.0%)  | 85% & $\pm 1\text{nm}$ | oui                   | oui                                   |

tr: taux de réjection (spécifications entre parenthèses)

1 : domaine spectrale située avant la bande passante

2 : domaine spectrale de la bande passante

3 : domaine spectrale située après la bande passante

$R_r$ : Réponse du filtre dans la bande de réjection

centrage: écart spectral par rapport aux spécifications

Tbp: Transmission moyenne dans la bande passante

Tableau 1: performances des filtres calculés.

La réalisation des filtres nécessite un contrôle des épaisseurs des couches à  $\pm 1$  nm et une bonne répétabilité des indices des matériaux dans tout l'empilement. La spécification liée au glissement de la réponse spectrale dans le champ impose une uniformité spatiale de dépôt sur 100 mm inférieure à 1%.

La spécification liée à la variation du profil spectral entre les conditions de mesure au sol et en environnement spatial justifie de réaliser des couches minces à compacité maximale.

Compte tenu de l'ensemble de ces contraintes, la technique choisie est la pulvérisation par faisceau d'ions (Ion beam sputtering IBS). Des exemples de réalisation du filtre B2 sont présentés sur la figure 4. Nous constatons un bon accord entre théorie et expérience, tant au niveau du profil que du centrage du filtre. La répétabilité du filtre B2 sur un deuxième essai est montrée, le décalage spectral entre deux essais est inférieur à 2 nm.

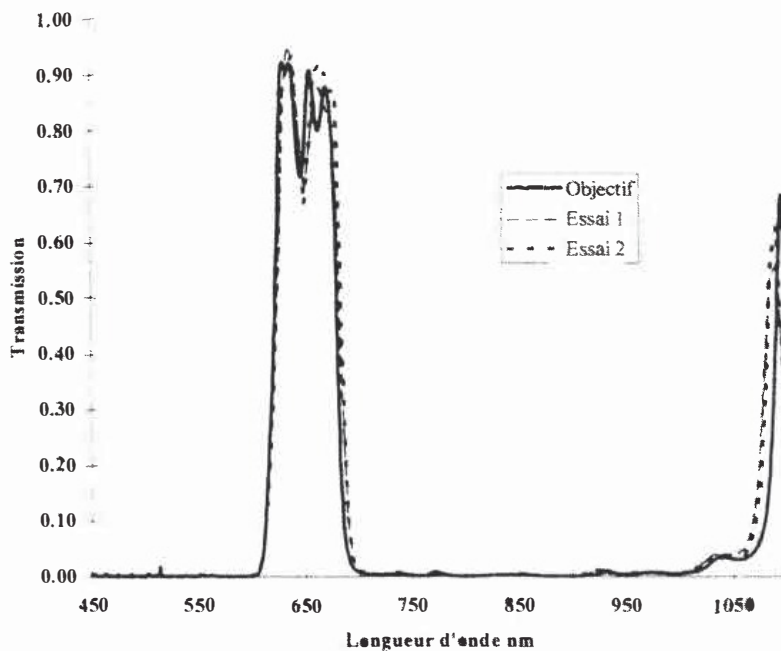


Figure 4 : réalisation de filtres type B2 - comparaison avec objectif et répétabilité

Le mode retenu de localisation des filtres est un dépôt au travers un masque. La précision de localisation par rapport à la fenêtre du diaphragme n'est pas critique : la largeur du motif filtre peut excéder largement la dimension de l'ouverture dans l'absorbant puisque la localisation précise est assurée par le contrôle de la cote de l'ouverture du diaphragme (cf. figure 2). L'étape masquage-dépôt doit être répétée trois fois avec localisation des trois filtres dans trois fenêtres ouvertes dans le diaphragme, ce qui nécessite un repositionnement précis du masque entre chaque étape. La difficulté majeure, outre la réalisation et le positionnement du masque, est le contrôle de l'épaisseur nominale du filtre dans la zone active et ceci sur toute la longueur du filtre.

Un exemple de profil du filtre après dépôt sur substrat sans-absorbant est représenté sur la figure 5. Nous constatons une localisation « propre » sans décollement et lambeaux. L'épaisseur nominale du filtre est obtenue avec toutefois un effet d'ombrage qu'il faudra minimiser en fonction des spécifications requises.

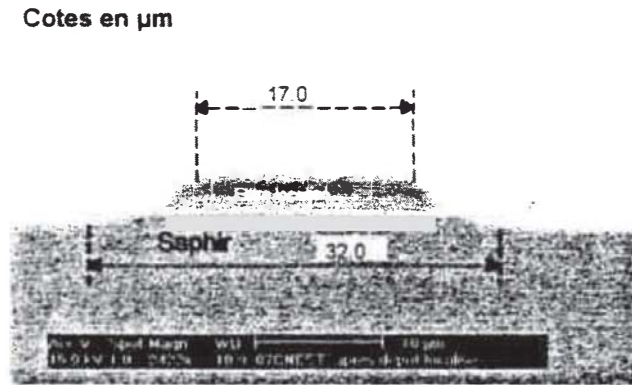


Figure 5 : dépôt localisé d'un filtre.

#### 4. DIAPHRAGME ABSORBANT : REALISATION, GRAVURE

L'absorbant a deux fonctions optiques, une fonction de limitation de la lumière incidente (fonction de diaphragme), mais aussi de limitation de la lumière parasite (multiréflexion entre absorbeur et détecteur et entre absorbeur et le reste du système optique).

Ces deux contraintes imposent des spécifications sur la transmission de l'absorbant ( $T \leq 10^{-3}$ ) et sur la réflexion côté substrat et côté détecteur ( $R \leq 2\%$ ), ceci sur toute la gamme spectrale (450-950nm).

Il faut rechercher d'autre part, pour minimiser les problèmes liés au passage de marche du filtre sur l'absorbant, une épaisseur la plus petite possible pour le traitement absorbant. Enfin, la technologie retenue pour réaliser l'absorbant doit être compatible avec la technologie de gravure. L'absorbant dont la faisabilité a été démontrée (cf. figure 6) est un système interférentiel en multicouches dont l'épaisseur est inférieure à  $0.4 \mu\text{m}$  et réalisé par pulvérisation cathodique à température ambiante. Les couches sont denses et donc compatibles pour une application spatiale.

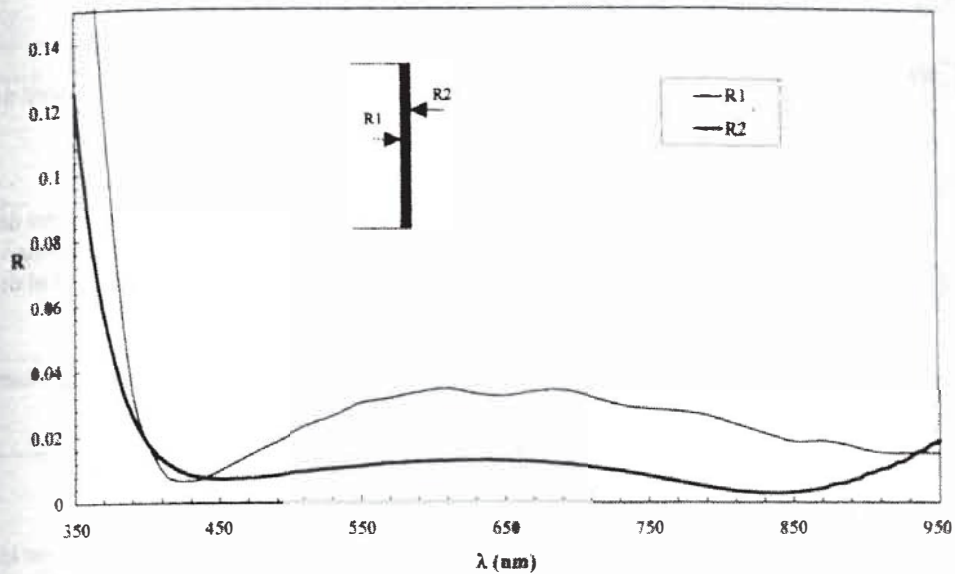


Figure 6 : réflexion du diaphragme absorbant réciproque.

La réalisation des ouvertures de diaphragme peut s'effectuer par au moins deux méthodes: gravure (humide ou sèche) ou lift-off. L'analyse des avantages respectifs de deux techniques, dont on trouve un résumé dans les tableaux 2 et 3, nous a conduit à privilégier la technique de lift-off.

| CARACTERISTIQUES  | RISQUES   | CONSEQUENCES  |
|---|---|---|
| nécessite d'optimiser le procédé d'attaque chimique pour tous les matériaux de l'empilement | impossibilité d'une solution unique, i.e. recours à différentes étapes d'attaque pour chaque matériau | grande complexité de l'étape globale  |
| nécessite une détection de fin d'attaque  | attaque de la proche surface du substrat  | modification probable des indices de surface, quasi-impossible à introduire dans le calcul de synthèse des filtres. |
| nécessite une très haute sélectivité vis-à-vis du substrat                                  | attaque de la proche surface du substrat ou résidus après gravure                                     | idem supra  |
| différents profils de gravure suivant les matériaux   | succession de profils anisotrope/isotrope dans l'empilement   | réponse optique probablement très perturbée, création de cavités, difficulté de maîtrise de la cote à 0.2µm         |

Tableau 2: Gravure chimique (humide ou sèche).



| CARACTERISTIQUES  | RISQUES   | CONSEQUENCES   |
|---|---|--|
| le dépôt ne doit pas recouvrir les flancs de la structure résine utilisée (solution: structure tricouche optimisée) | impossibilité d'attaque chimique de la résine après dépôt       | résidus de dépôt en bord de motifs   |
| nécessite une attaque chimique de la résine, donc un substrat inerte vis-à-vis de la solution d'attaque             | attaque de la proche surface du substrat                        | modification des indices de surface, quasi-impossible à introduire dans le calcul de synthèse des filtres. |
| le dépôt doit adhérer sur la surface de la résine   | perte d'adhérence due à un mauvais choix du couple de matériaux | <u>formation</u> de débris pendant le dépôt  |

Tableau 3: Gravure par lift-off.

Le procédé de lift-off s'appuie sur une technologie tricouche Résine/Spin On Glass/Résine. Les figures 7 et 8 montrent les profils obtenus en microscopie électronique à balayage dans les conditions du procédé lift-off optimisé, avant et après dépôt. On observe notamment sur la figure 8 que le flanc de la résine de lift-off reste parfaitement dégagé, autorisant un lift-off optimum.

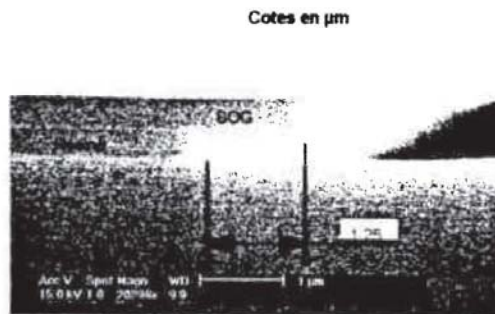


Figure 7: détail du masque lift-off avant dépôt de l'absorbéur

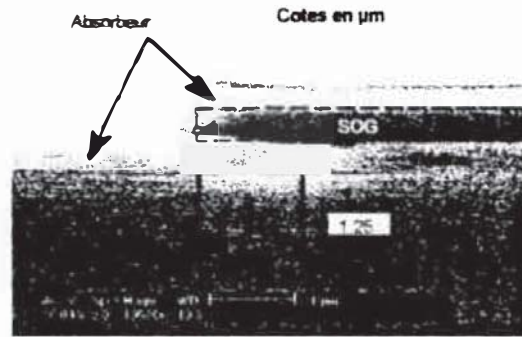


Figure 8: détail du masque lift-off après dépôt de l'absorbant

## 9. CONCLUSION

Les résultats acquis portent sur la synthèse des filtres, leur réalisation et leur localisation sur un absorbant gravé. L'intégration de l'ensemble de ces « briques » technologiques constitue une filière innovante pour la réalisation de microsystèmes optiques comme les futurs séparateurs spectraux intégrés.

**REMERCIEMENTS:** Cette étude, initiée par le CNES, a bénéficié du soutien financier du CNES, de la DGA et du CEA.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] P. CHATON, P. PINSTON, J.P. GAILLIARD, « Synthesis of optical coatings using a simulated annealing algorithm », SPIE vol. 2253 « Optical Interference Coatings (1994) » part one, p. 73.
- [2] T. BOUDET, P. CHATON, L. HERAULT, G. GONON, L. JOUANET, P. KELLER, « Thin film designs by simulated annealing », Applied Optics, Vol. 35, n° 31, (1996)