

# International Conference on Space Optics—ICSO 1997

Toulouse, France

2–4 December 1997

*Edited by George Otrio*



## *Les anastigmats à mlroirs de la conception à la réalité*

*Roland Geyl*



icso proceedings



International Conference on Space Optics — ICSO 1997, edited by Georges Otrio, Proc. of SPIE Vol. 10570, 105701Y · © 1997 ESA and CNES · CCC code: 0277-786X/18/\$18 · doi: 10.1117/12.2326624

## LES ANASTIGMATS à MIROIRS - DE LA CONCEPTION à LA REALITE

Roland GEYL

REOSC  
Avenue de la Tour Maury  
91280 Saint Pierre du Perray France

*ABSTRACT - Three Mirror Anastigmats optical systems open new possibilities to multispectral high resolution earth observation. Since more than 10 years REOSC pursued developments in this field, some of them with CNES support. The optical elements of the IRS 1C panchromatic camera, designed by the Indian Space Agency, have been supplied and operate well in space now. Presently, a development of such an optics is conducted for CNES. In less than half the volume of the SPOT HRV camera better performances are obtained. In parallel, theoretical investigations have been undertaken in the field of Four Mirror Anastigmats. A patent on a wide angle mirror system will be presented.*

**RESUME** - Les Anastigmats à Trois Miroirs ouvrent des possibilités nouvelles à l'observation spatiale à haute résolution. Depuis plus de 10 ans REOSC s'est intéressée à ces optiques et a conduit divers développements avec le CNES. Les miroirs de la caméra panchromatique IRS 1C ont été fournis à l'Agence Spatiale Indienne et fournissent des images. Actuellement un développement d'une optique de ce type est mené pour le compte du CNES. Dans un volume moins que moitié on obtient des performances supérieures à celles de la camera HRV SPOT. En parallèle des investigations théoriques ont été menées sur les formules à quatre miroirs. Un brevet de fish eye à miroir sera présenté.

### 1- INTRODUCTION

Aujourd'hui, l'observation de la terre en haute résolution est menée en mode push broom. Les anastigmats à miroirs constituent pour cela une intéressante famille d'optiques car ils fournissent une image de haute qualité sur un large champ linéaire plan. En configuration off axis, l'inconvénient de l'obturation centrale est évité tout en maintenant compacité et faible masse.

Une revue de l'optimisation de ce type d'optique et des problèmes posés par leur fabrication et alignement sera menée. Puis nous présenterons une réalisation récente de REOSC actuellement en orbite, un développement mené pour le compte du CNES et les investigations menées dans le domaine des très grands champs avec des optiques à 4 miroirs.

### 2 RAPPEL DES AVANTAGES DES SYSTEMES à MIROIRS

Rappelons brièvement les avantages des formules optiques purement catoptriques

- Achromatisme parfait qui assure de meilleures performances, une facilité de contrôle et une co-régistration spectrale inter-bandes parfaite.
- Pas de limite en dimension (en théorie) alors que les verres ne dépassent pas 50 cm à 1 m.
- Une athermalisation facilitée en utilisant le Zérodur et la fibre de carbone ou en réalisant tout l'ensemble opto-mécanique dans le même matériau (Aluminium, Beryllium, Carbone de Silicium, Carbone CVI).

- Des traitements réfléchissants simples, assurant une haute réflectivité sur un large spectre, variant peu avec l'incidence et peu sensibles aux polarisations.
- Une absence de tous les inconvénients des matériaux réfractifs : faible nombre et nombre en réduction, absorption et domaine de transmission limité, variation d'indice avec la longueur d'onde et la température, les problèmes d'homogénéité, de défauts internes et de solarisation sous rayonnement cosmique, les effets de biréfringence, les coûts, etc.

Les inconvénients majeurs des systèmes à miroirs, à savoir l'obturation centrale des faisceaux et la difficulté de réalisation des surfaces asphériques, sont aujourd'hui mieux maîtrisés grâce aux derniers progrès en techniques de fabrication et d'alignement. Il en résulte des instruments performants tels que ceux présentés plus loin dans notre exposé.

### 3 CONCEPTION ET OPTIMISATION DES ANASTIGMATS à 3 MIROIRS

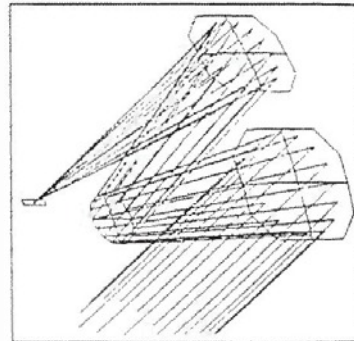
Lors d'exposés précédents (1), (2) il a été montré que, parmi toutes les combinaisons de trois miroirs, l'enchaînement Concave - Convexe - Concave était le plus adapté à la correction de la courbure de champ tout en assurant un encombrement minimum et un tirage image suffisant. En fait on retrouve la disposition des puissances du célèbre Triplet de Taylor.

La correction des autres aberrations principales pourrait, en théorie, être obtenue avec de simples miroirs sphériques mais une telle configuration n'existe malheureusement pas dans la pratique.

En fait, on se rend vite compte qu'au moins deux miroirs asphériques sont nécessaires pour obtenir une bonne correction sur un champ significatif. Asphériser les deux miroirs concaves M1 et M3 en facilite le contrôle au centre de courbure à l'aide de compensateurs d'aberration type Offner. De plus leurs asphérisations sont d'amplitudes voisines ce qui en équilibre la difficulté de réalisation.

L'absence d'occultation centrale est obtenue en introduisant une inclinaison de champ significative afin que les rayons utiles évitent le miroir M2 à l'entrée comme en sortie.

L'introduction de surfaces asphériques d'ordre supérieur améliore significativement la qualité image obtenue. Une autre piste explorée par REOSC consiste à mettre en oeuvre une généralisation du principe de Schmidt et à asphériser de façon complexe (termes du type Zernike en triangle et astigmatisme du 5<sup>ème</sup> ordre) le miroir M2, sur lequel on peut placer une pupille intermédiaire. Le gain en qualité image est alors uniforme sur tout le champ.



Enfin, des excentremets et inclinaisons des miroirs, en perdant toute symétrie de révolution de la formule optique, permettent encore de gagner en qualité image. **Anastigmats à 3 miroirs**

On peut également mener l'optimisation en laissant se former une image intermédiaire au voisinage du miroir secondaire. Dans ce cas il est presque toujours nécessaire d'asphériser les trois miroirs afin d'obtenir la qualité image souhaitée. En fonction de la présence ou non de cette image intermédiaire on obtient des propriétés différentes comme suit :

#### Sans image intermédiaire

- Qualité Image assez homogène dans le champ
- Télécentricité 'naturelle'
- Distorsion réduite

⇒ Application visible

#### Avec image intermédiaire

- Qualité Image évoluant avec le champ
- Plus fort tirage mais forte distorsion
- Possibilité de placer un diaphragme sur l'image intermédiaire
- les pupilles réelles d'entrée et de sortie

⇒ Application IR

#### 4 FABRICATION ET ALIGNEMENT DE SYSTEMES OFF-AXIS

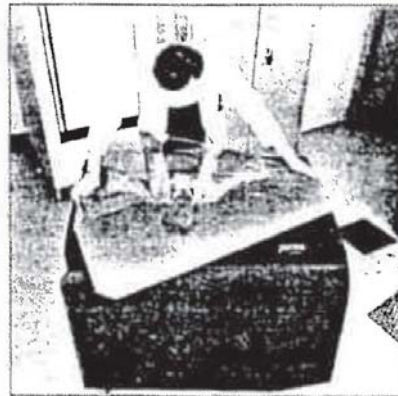
La réalisation de miroirs en dehors de l'axe, ou off-axis, est relativement délicate. L'approche conventionnelle consiste à polir le miroir mère du segment off-axis en utilisant les techniques traditionnelles, complétées par des retouches de **Polissage Assisté par Ordinateur** ou de finition par **Usinage par faisceaux d'ions**. Puis les segments sont découpés par sciage et fraisage à la meule diamantée. Cette approche est onéreuse pour la réalisation d'une seule pièce mais intéressante lorsqu'il s'agit de produire plusieurs optiques en petite série. Dans ce cas, l'optimisation de la formule doit être conduite en cherchant à maximiser le nombre de segments pouvant être extraits du miroir mère. REOSC a produit de nombreuses pièces selon cette méthode.

La réalisation d'une pièce directement off-axis pose des difficultés particulières mais s'avère indispensable lorsque la taille de l'élément rend prohibitif le coût du miroir mère. Il faut alors faire appel aux derniers raffinements des techniques de génération de surface à la meule diamantée, de doucissage et polissage assisté par ordinateur en s'assurant de bien maîtriser les défauts locaux le long du contour extérieur de la pièce.

Dans ce domaine, REOSC a démontré sa capacité, il y a 9 ans déjà, en réalisant pour le CNES le moule secteur du miroir PRONAOS, une pièce triangulaire de 1m de côté, secteur de 60° d'un miroir parabolique convexe de 2 m de diamètre ouvert à F/0.87. Un télescope off-axis de 45 cm de diamètre a également été réalisée de cette manière en 1987.

Nous considérons aujourd'hui à REOSC que la réalisation de miroirs directement off-axis est rentable dès que l'on dépasse des tailles de 40 à 50 cm. Nous portons nos efforts de R & D pour diminuer cette dimension sans sacrifier la qualité des pièces obtenues.

##### Moule secteur PRONAOS



L'alignement des divers éléments dans une structure porteuse dénuée de toute symétrie pose des difficultés nouvelles aussi. Cela passe par la définition minutieuse de référentiels mécaniques sur les miroir mères, qui seront conservés sur les segments après découpe. Après une phase d'alignement aussi précis que possible à la lunette et au théodolite, il est par contre nécessaire de passer en **alignement assisté par interférométrie**. Cette technique consiste à

- tester avec précision (interférométrie) le système en différents points dans le champ.
- quantifier les diverses aberrations présentes (utilisation des polynômes de Zernike)
- sélectionner les mouvements compensateurs qui seront utilisés.
- en déterminer la valeur optimale par optimisation inverse.
- appliquer au mieux les mouvements calculés
- itérer sur les diverses étapes ci-dessus.

Cette technique a été employée avec succès par REOSC depuis plus de 10 ans sur de nombreux instruments de précision produits et notamment les premières optiques SPOT 5 récemment livrées.

#### 5 ANASTIGMAT à 3 MIROIRS PRODUIT POUR L'ISRO

En 1995, REOSC a fourni à l'Agence Spatiale Indienne (ISRO) un ensemble de 3 miroirs formant l'optique de la Caméra Panchromatique du Satellite IRS 1C. Il s'agit d'un anastigmat à 3 miroirs répondant aux spécifications suivantes :

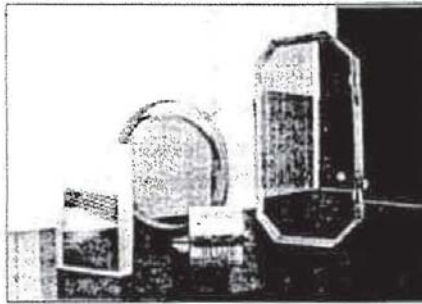
Focale	= 980 mm	Ouverture	= 225 mm
Champ	= 4.25° x 0.85°	Qualité image	= $\lambda / 10$ RMS à 633 nm

L'ensemble de l'optique a été produite en 15 mois dans les spécifications souhaitées.



Un alignement complet selon la technique d'alignement assisté par interférométrie et une vérification des performances de l'ensemble du télescope ont été effectués avant expédition pour démontrer l'appairage parfait des trois miroirs et leur capacité à fournir la qualité image spécifiée pour l'ensemble.

Les miroirs ont été livrés nus et non allégés. L'optique a été montée dans sa structure par les spécialistes de l'ISRO et le lancement a eu lieu environ un an après la livraison des miroirs par REOSC. Le satellite IRS 1C a été mis sur orbite le 28 Décembre 1995 et fournit depuis des images de haute qualité avec une résolution de 5.8 mètres.



Ensemble des 3 miroirs IRS 1C



Image IRS 1C : Washington - The Mall

## 6 DEVELOPPEMENT MENE POUR LE COMPTE DU CNES

Comme indiqué précédemment, le CNES a manifesté depuis longtemps un intérêt pour ce type d'optiques et confié à REOSC divers travaux R & D relatifs à la fabrication de miroirs off axis.

Pour ce qui concerne le calcul des combinaisons, REOSC avait défriché le terrain dès 1987 et montré l'intérêt de ces formules. Une étude générale d'exploration des diverses familles d'optiques de ce type a été menée pour le compte du CNES en 1988. (1)

Plus récemment, une étude très détaillée a été conduite pour déterminer la configuration optimale, optimiser le synoptique de fabrication, établir le bilan d'erreur détaillé correspondant et déterminer les procédures d'alignement. Les spécifications optiques correspondantes sont :

Focale	: 1080 mm	Ouverture	: 180 mm
Champ	: $8.4^\circ \times 0.7^\circ$	Domaine spectral	: 480 - 900 nm
FTM	: $> 0.60$ à 71 pl/mm		

Partant du souhait de placer les deux miroirs M1 et M3 sur une même structure porteuse, l'étude a été conduite en maintenant ces deux miroirs dans un même plan. La formule est alors paramétrable en fonction de la distance E séparant M2 de M1 et M3.

Si on laisse croître E la qualité image s'améliore. C'est la tendance naturelle de toute optique.

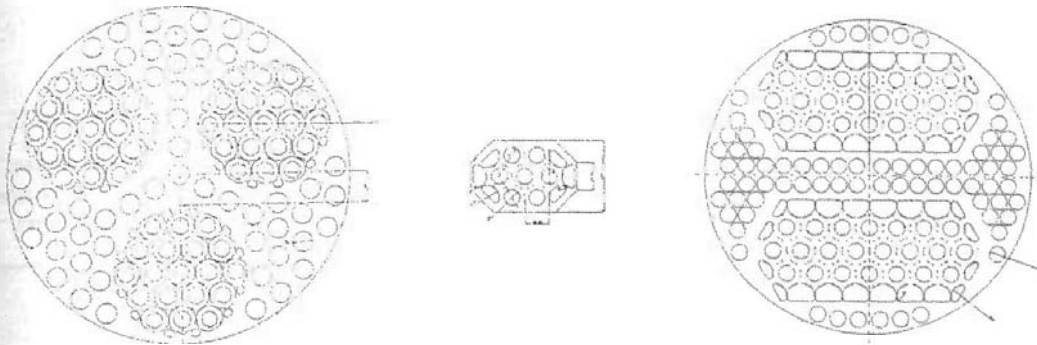
Mais si E croît, le tirage (distance séparant le foyer image du miroir M2) diminue et il devient plus délicat de placer le bloc de détection derrière la structure porteuse du miroir secondaire.

Un intervalle E optimal a donc été choisi en relation avec le CNES.

On peut alors établir un comparatif de cette optique avec la formule optique SPOT comme suit :

- performances identiques (limitées par la diffraction)
- champ linéaire double
- volume de l'optique divisé par plus que 2
- domaine spectral plus étendu
- coût récurrent réduit

Enfin, une réalisation de la formule optique est en voie d'achèvement. Les différents miroirs et leurs dispositifs de fixation ont été dimensionnés par calcul aux éléments finis pour satisfaire une tenue aux environnements de lancement. Les miroirs mères ont été allégés par usinage diamant sous contrôle numérique. La figure ci-dessous présente leurs géométries d'allègement :



Miroir M1

Miroir M2

Miroir M3

Les surfaces optiques ont été polies à la précision requise. Nous avons notamment appliqué sur ces miroirs notre nouvelle technologie de finition par usinage ionique.

Les segments off-axis ont été extraits par usinage diamant sous contrôle numérique.

Les dispositifs de fixations ont été réalisés et collés aux miroirs.

Les miroirs ont été intégrés sur des barillets support fournis par le CNES.

Une phase d'alignement et de vérification des performances est actuellement en cours avant de livrer la maquette au CNES pour évaluation détaillée dans ses laboratoires.

#### Ensemble des miroirs allégés



#### 5 SYSTEMES à 4 MIROIRS

Nous nous sommes également intéressé au domaine des systèmes optiques à 4 miroirs. Au vu des excellentes performances apportées par les systèmes à 3 miroirs on peut s'interroger sur ce que peut apporter de plus un quatrième miroir. En fait, il y a deux voies de progrès possible :

L'ultra haute résolution et la très faible distorsion pour la micro-lithographie par rayons X. Des travaux sont en cours aux US sur des formules de ce type permettant d'obtenir des résolutions de l'ordre de quelques nanomètres avec des distorsions également du même ordre.

Les grands champs avec une distorsion modérée.

C'est cette dernière voie que nous avons explorée. Il apparaît en effet que l'observation spatiale à résolution moyenne et grand champ présente un intérêt significatif et que des solutions catoptriques avec leurs avantages rappelés au paragraphe 2 peuvent présenter des avantages intéressants.

Nous avons menés nos calculs sur la base des spécifications suivantes :

Focale	: 30 mm	Ouverture	: 8 mm ( F / 3.75 )
Champ	: 72° linéaire	Télécentricité	: souhaitée
Tirage	: > 5 mm	Distorsion	: < 1 %
Encombrement	: < 200 mm	Qualité front d'onde	: 40 nm RMS

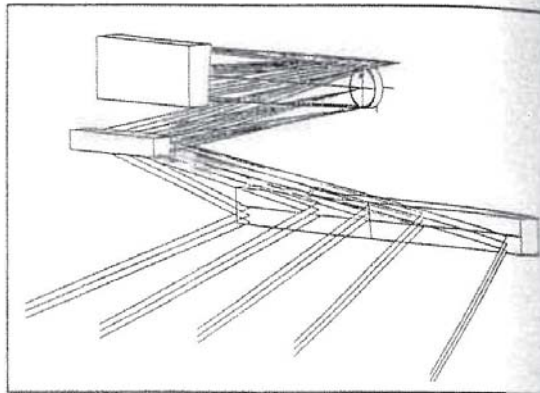
Le très grand champ est obtenu en laissant M1 et M2 convexes tous les deux. En asphérisant les 4 miroirs on obtient la qualité image dans tout le champ avec une faible distorsion. Le nombre de paramètres optiques restant étant important on peut rechercher à satisfaire d'autres contraintes.

Pour le maintien d'un tirage positif il vaut mieux placer M1 et M3 dans un même plan.

Pour réduire l'encombrement et faciliter le passage des faisceaux il vaut mieux maintenir M1 et M4 voisins.

On obtient la télécentricité dans l'espace image en utilisant M3 comme pupille et en le plaçant au voisinage du foyer de M4.

La formule optique obtenue présentée sur la figure jointe satisfait les spécifications que nous nous étions données et, de par son innovation, a fait l'objet d'un brevet.



## 6 CONCLUSION

Le domaine des formules optiques catoptriques a été largement exploré et ses avantages sont maintenant bien connus. Les formules à 3 miroirs remplissent la majorité des besoins de l'observation spatiale. Le passage à 4 miroirs, permet d'élargir le champ utile jusqu'au domaine des fish eye. Un brevet a été déposé par REOSC sur ce type de combinaisons.

Les technologies de fabrications, de contrôle et d'alignement d'optiques de ce type existent et sont parfaitement maîtrisées. Preuve en sont les produits concrets qui ont été réalisés ou qui sont en cours d'achèvement.

REOSC dispose de la technologie pour réaliser des instruments de ce type en des dimensions bien plus importantes, dans tous les matériaux envisageables (Zerodur, Beryllium, SiC, ...) et dispose de tout le savoir-faire pour concevoir et réaliser l'ensemble opto-mécanique dans sa totalité tout en s'engageant sur une performance finale, au sol, en vol ou en orbite.

## 7 REFERENCES :

1. Roland GEYL : "Les combinaisons optiques à miroirs asphériques off-axis", *International Conference on Space Optics*, ICSO 91, Toulouse.
2. Roland GEYL : "Design and fabrication of a Three Mirror Flat Field Anastigmat for high resolution earth observation", *SPIE conf. 2210*, Garmisch Partenkirchen, 1993.