

# International Conference on Space Optics—ICSO 1997

Toulouse, France

2–4 December 1997

*Edited by George Otrio*



## *Le programme VLT et ses retombées vers le spatial*

*Roland Geyl*



icso proceedings



International Conference on Space Optics — ICSO 1997, edited by Georges Otrio, Proc. of SPIE Vol. 10570, 1057029 · © 1997 ESA and CNES · CCC code: 0277-786X/18/\$18 · doi: 10.1117/12.2326635

## LE PROGRAMME VLT ET SES RETOMBÉES VERS LE SPATIAL

Roland GEYL

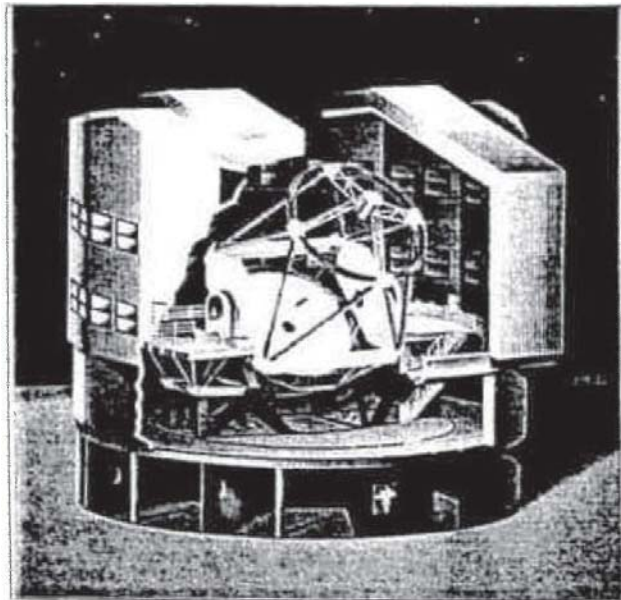
*REOSC*  
Avenue de la Tour Maury  
91280 Saint Pierre du Perray - France

**ABSTRACT** - *REOSC and Sfim have presently major contributions to the ESO VLT project with the primary mirrors polishing, the secondary and the active support system actuators design and fabrication. These all have been opportunities for REOSC and Sfim to develop new skills and expertise that benefit or will benefit for space optics.*

**RESUME** - REOSC et Sfim ont actuellement une contribution majeure au projet VLT de l'ESO avec le polissage des miroirs primaires, la conception et réalisation des miroirs secondaires et des vérins support du miroir primaire. Toutes ces réalisations ont été autant d'opportunités pour REOSC et Sfim de développer de nouveaux savoir-faire et expertises qui ont ou auront des retombées dans le domaine de l'optique spatiale.

### 1- INTRODUCTION

Le projet du Very Large Telescope (VLT) de l'European Southern Observatory (ESO) est un ensemble de 4 télescopes, de 8.2 m de diamètre chacun, installés au sommet du mont Cerro Paranal au Chili. Ces télescopes de nouvelle génération utilisent un grand miroir primaire monolithique en forme de ménisque de 17.5 cm d'épaisseur seulement qui est maintenu en forme grâce à un dispositif d'optique active. REOSC a gagné le contrat de transport des ébauches et polissage de ces 4 miroirs en 1989 et livré le premier à l'ESO en Novembre 1995. Il a quitté la France pour le Chili fin Octobre 1997. Un atelier géant a été mis en place et toute la technologie de manipulation, transport, fixation et polissage de miroirs de cette taille développée en moins de 4 ans.



Le télescope VLT

Sfim, en association avec GIAT Industries a remporté le contrat d'étude et de réalisation des 4 barillets actifs intelligents supportant les miroirs primaires. Plus précisément Sfim est en charge de la réalisation des 150 vérins actifs pour chacun des 4 barillets et de toute l'intelligence de ces support. Des précisions exceptionnelles de contrôle de force exercées par les vérins et d'asservissement de l'ensemble du système sont obtenues.

Le miroir secondaire de ces télescope est universel. Cela signifie qu'il doit présenter une excellente qualité pour l'observation visible et, en même temps, être léger et raide pour autoriser les oscillations, ou « chopping », à une fréquence de 5 Hz et d'une amplitude de 2 mn d'arc nécessaires aux observations I.R. REOSC a remporté le marché d'étude et de réalisation du premier de ces miroirs sous maîtrise d'œuvre NASA qui fournit le mécanisme de pointage, focalisation, centrage et oscillation du miroir. Les 3 miroirs suivants sont fournis directement à l'ESO par REOSC. La maîtrise des nouveaux matériaux a été au cœur de la conception et réalisation de ces pièces pour converger finalement sur le béryllium.

Autant d'efforts qui ont été déployés par REOSC et Sfm et qui ont permis d'accroître nos connaissances et savoir-faire sur ce projet particulièrement passionnant. Nous sommes convaincus que l'astronomie aura des retombées dans le domaine du spatial alors que généralement les retombées s'effectuent du spatial vers les autres domaines.

## 2 TECHNOLOGIES DE POLISSAGE DE PRECISION

Le programme VLT a été l'occasion de faire encore progresser nos technologies de polissage optique de précision dans plusieurs directions

### 2.1 Polissage de miroirs géants

Une installation complète de polissage assisté par ordinateur a été spécialement conçue, réalisée et validée avant d'être utilisée pour le VLT. Il s'agit d'une **grande table tournante** de 5 m de diamètre, capable de recevoir une charge de 100 t, installée 1 m sous le niveau du sol afin que la surface optique arrive confortablement à 75 cm au dessus du sol.

Un **portique d'usinage** peut être mis en place au dessus de la table tournante pour régler la position des vérins support, effectuer un usinage à la meule diamantée de la surface et, surtout, déplacer un sphéromètre de mesure mécanique de la forme de la pièce

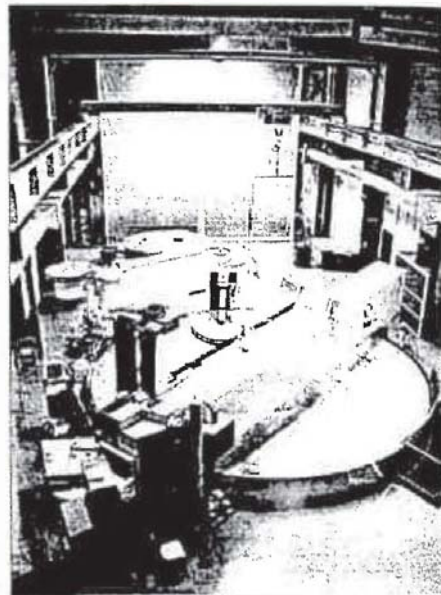
Enfin, un **bras articulé**, actionné hydrauliquement, entraîne les outils de polissage sur la surface de la pièce. L'ensemble table et bras est entièrement équipé de codeurs et piloté par ordinateur afin de connaître à chaque instant la position, la vitesse et la pression exercée par l'outil de polissage sur la pièce et mener les cycles de polissage assisté par ordinateur.

#### Validation de la machine de polissage

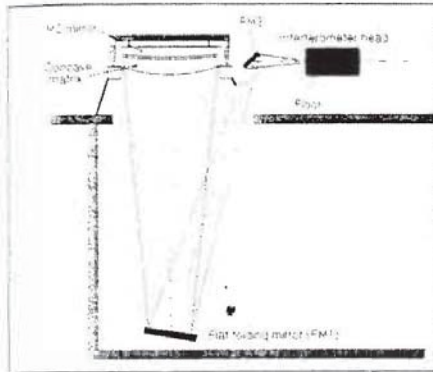
Une qualité finale de 43 nm RMS a été obtenue sur chacun des trois premiers miroirs déjà polis à ce jour. L'ensemble des activités s'étale sur 24 mois environ mais, grâce à la présence de deux machines, l'une dédiée au doucissage et l'autre au polissage, la cadence de réalisation est de 1 miroir géant par année. En fait, nous avons mis en place des équipes afin d'accélérer encore nos cadences pour pouvoir insérer le polissage des deux miroirs de 8 m du programme américain Gemini. Aujourd'hui c'est une capacité de production de 1 miroir géant tous les neuf mois que nous obtenons.

### 2.2 Polissage asphérique de précision

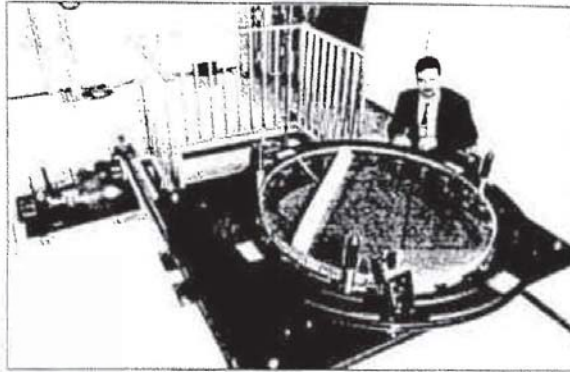
Dans le cadre du projet, nous avons également effectué le polissage de la matrice de test du miroir secondaire. Cette pièce de 1,25 m de diamètre comprend une face concave qui est la réplique exacte



de la face convexe du miroir. Cette surface polie à une précision de 8 nm RMS a été certifiée par un contrôle au centre de courbure et sert de surface de référence lors des contrôles optiques du miroir. Le montage de Fizeau employé est décrit par le schéma ci-dessous. Cette pièce est également très fortement asphérisée sur sa face convexe afin de faire converger les faisceaux optiques vers la tête interférométrique de mesure située à 14 mètres. Le trajet optique est replié par un miroir plan intermédiaire pour permettre d'installer l'ensemble dans nos ateliers.



Banc de test du M2 VLT



La matrice de test du M2

### 2.3 Polissage du Kanigen

Le kanigen recouvrant le Beryllium du miroir secondaire pose des difficultés particulières liées à sa dureté plus faible que celle des verres. Nous avons transféré nos savoir-faire au cas particulier de ce miroir afin d'obtenir une surface de faible rugosité, mieux que 20 angström RMS, présentant peu de défauts cosmétiques et des défauts de forme résiduels de faible pente.

Le M2 VLT poli



### 3 GRANDS MIROIRS ALLEGES

Le miroir secondaire du VLT est un miroir qui présente toutes les caractéristiques d'une grande optique spatiale de précision. En effet, ses spécifications sont les suivantes :

Diamètre	: 1120 mm	Rayon de courbure	: 4553,57 mm (convexe)
Masse	: 42 kg	Constante de conicité	: -1,66926
1 <sup>er</sup> mode sur fixations	: $f_1 > 380$ Hz	Qualité image	: $\approx 2,45$ RMS à 633 nm
Stabilité	: 25 ans		en mode actif

La qualité image n'est indiquée que de manière approximative car la spécification réelle, exprimée en baisse du maximum central de la tache image, prend en compte une atmosphère théorique de référence. Le premier miroir qui vient d'être livré a cependant dû être poli à une qualité de 13 nm RMS pour satisfaire la spécification.

On se rend compte que ce miroir doit être très léger, poli avec une grande précision, être très raide et stable sur le long terme. Les exigences de l'ESO sont très sévères et se situaient à l'époque, vers 1992, à la limite de la technologie et des moyens disponibles de par le monde.

Nous avons d'abord travaillé sur la conception analytique de miroirs allégés et développé diverses équations de détermination rapide de la première fréquence propre d'une structure allégée en fonction des caractéristiques du matériau la constituant et des divers paramètres de construction.

Les paramètres principaux sont :

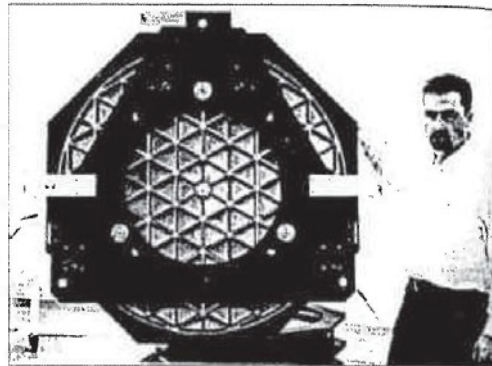
Épaisseur de la toile avant	Épaisseur des nervures
Dimension des cellules d'allègement	Hauteur des nervures
Type de cellule (carrée, triangulaire, hexagonale)	Épaisseur de la toile arrière
Type de structure (ouverte, fermée, semi-fermée)	

Ces outils nous ont été extrêmement précieux pour comparer les divers matériaux (Zerodur, SiC, Be, ...) et les diverses technologies de fabrication avec leurs limitations. Plusieurs types de structures et de matériaux ont été envisagés et mis en compétition.

Nous n'effectuerons pas une analyse comparative des divers matériaux car ceci sont maintenant relativement bien connus et ont déjà fait l'objet de nombreuses publications. Au départ, le Carbone de Silicium UTOS était le candidat préféré mais UTOS a disparu entre temps. Nous avons alors continué nos investigations avec Carborundum. Malheureusement, des problèmes de disponibilité de moyens de réalisation ont fait avorter cette filière. Finalement, c'est le Béryllium qui a été retenu car c'était le seul matériau capable, à l'époque, d'assurer la certitude que la structure allégée calculée pour répondre aux besoins serait effectivement réalisable, dans un délai donné, pour un coût donné avec une certitude de tenue des performances. Aujourd'hui, certaines filières ont disparu, d'autres ont mûri, et ce choix serait sans doute différent.

Le Béryllium est un métal et la qualité structurelle de la pièce ainsi que sa stabilité dépendent très fortement de la métallurgie mise en oeuvre ainsi que des divers recuits et cyclages thermiques de stabilisation appliqués. Nous avons porté des efforts importants sur cet aspect en relation avec notre fournisseur Brush Wellman et avons pu évaluer la stabilité du miroir secondaire du VLT à mieux qu'une frange d'astigmatisme sur 25 ans.

#### Miroir M2 en béryllium



De plus, le Béryllium demande à être recouvert de Nickel pour pouvoir être poli avec la bonne rugosité. Ici aussi des efforts importants de maîtrise de cette opération complexe faisant intervenir de nombreux paramètres ont été déployés avec succès. Une optimisation entre les divers cyclages thermiques de stabilisation du béryllium, de recuit du Nickel après dépôt et des paramètres des bains chimiques a été menée pour aboutir à la meilleure stabilité possible.

Nous avons également développé pour ce projet un nouveau mode de fixation des miroirs qui garantit une bonne tenue sans perturber la qualité de la face optique.

#### 4 OPTIQUE ACTIVE

Les télescopes du VLT travaillent en mode actif, c'est à dire que la forme du miroir primaire est contrôlée et corrigée en permanence par un ensemble de vérins support. L'option choisie par l'ESO est celle du contrôle d'effort, bien plus adapté à des pièces de grande dimension que le contrôle de position.

Ce concept d'optique active devait alors être intégré dans nos moyens de polissage et contrôle du miroir primaire car il faisait partie intégrante de la spécification. En effet

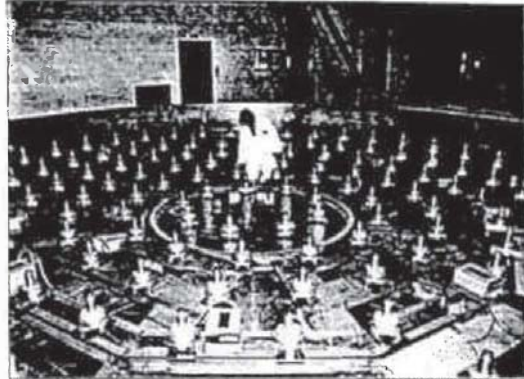
- la spécification autorise une compensation partielle des défauts par correction active,
- cette correction ne s'applique que sur les 16 premiers modes de déformation du miroir,

- elle est limitée par la force maximale exercée par les vérins support qui ne doit pas dépasser 10% de la course totale des vérins.

REOSC avait déjà eu l'occasion de mener divers développements en ce sens de par le passé :

- miroir expérimental pour l'ESO de  $\varnothing$  1 m et d'épaisseur 18 mm
- miroir expérimental pour l'ESA de  $\varnothing$  800 mm et d'épaisseur 5 mm.

Nous avons donc équipé nos machines de douçissage et de polissage d'un support actif complet destiné à supporter le miroir de manière uniforme pour en préserver l'intégrité mais aussi à appliquer des corrections actives durant les derniers contrôles. La figure ci-contre montre l'ensemble des 150 vérins répartis sur la table tournante. Ces vérins pneumatiques, d'une précision de 1 N sont entièrement pilotés par ordinateur pour pouvoir appliquer le champ de force spécifié. Ils sont asservis à une cadence de quelques minutes, largement suffisante lors des contrôles en atelier.



Vérins actifs de la machine de polissage

Le banc de contrôle optique des miroirs, installé au sommet de la tour de 28 mètre de hauteur comprend un correcteur d'aberration type Offner et un interféromètre spécialement modifié par REOSC dont nous reparlerons plus loin. Un ensemble de logiciels de traitement des données interférométriques a été développé pour décomposer la surface d'onde sur les 16 modes propres du miroir et déterminer la correction active à faire appliquer par le support actif, dans la limite autorisée par l'ESO. Un capteur de front d'onde type Shack Hartmann a également été spécialement développé sur demande de l'ESO afin de procéder à des mesures dans des conditions similaires à celles du télescope en opération.

*L'atelier VLT de REOSC est donc aujourd'hui le plus grand système d'optique active au monde, comprenant 150 vérins directement asservis sur les mesures optiques, opérationnel depuis 1993 et utilisé quotidiennement pour contrôler les miroirs en cours de production.*

Les vérins actifs du vrai barillet du télescope, conçus, étudiés et réalisés par Sfim sont du type électromécaniques. Ils atteignent une précision de l'ordre de 0.04 N et sont asservis à une cadence de 4 Hz. Ils ont fait l'objet d'une qualification scrupuleuse en environnement sévère ainsi que d'une étude particulièrement poussée en terme de fiabilité sur les 25 ans prévus de durée de vie du télescope.

## 5 CONTROLES OPTIQUES DE GRANDS MIROIRS ET EN AMBIANCE PERTURBEE

### 5.1 Les vibrations

Le VLT a nécessité le développement d'une technique de mesure optique de précision en présence de vibrations. Notre tour de contrôle de 28 m de hauteur a été étudiée pour être la plus stable possible mais des vibrations résiduelles sont malheureusement inévitables.

Vers 1990, au début du projet, ~~était~~ ~~seul~~ disponibles les interféromètre à décalage de phase (Phase Shift) dont la source d'incertitude première sont les vibrations résiduelles. Des essais sur un miroir de 1.8 m avaient déjà montré leur totale incapacité à mesurer de grandes optiques.

Nous avons donc développé une technique d'analyse de champ de franges d'interférométrie à base l'hétérodynage spatial que nous avons baptisée FLOW Interferogram Processing (FLIP). Les

champs de franges sont figés en enregistrant l'image en  $1/1000^{ème}$  de seconde environ puis exploites avec notre algorithme pour en extraire une carte de phase avec une résolution de  $100 \times 100$  ou  $250 \times 250$  points permettant l'évaluation précise des défauts de haute fréquence spatiale.

FLIP a également été implanté sur notre interféromètre à  $10,6 \mu\text{m}$  (Laser CO<sub>2</sub>) qui permet de mesurer la surface optique lorsque celle-ci est encore à l'état doux.

Depuis, nous avons largement généralisé l'usage de FLIP à travers tout REOSC et équipé une douzaine d'interféromètres utilisés notamment sur les projets spatiaux SPOT 5 et HELIOS II.

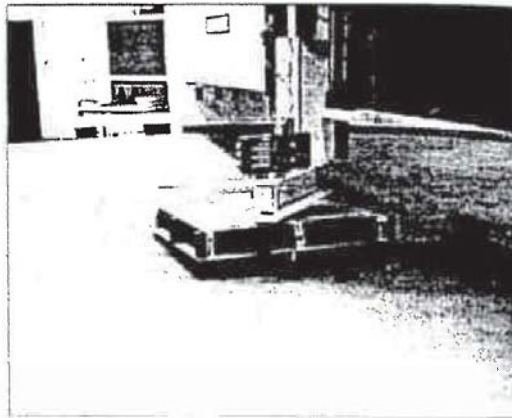
### 5.2 Les turbulences

L'autre source de perturbation spécifique aux miroirs VLT sont les turbulences de la grande veine d'air séparant le miroir de l'interféromètre placé au sommet de la tour. Ici, c'est en moyennant un grand nombre de mesures FLIP sur une durée de plusieurs dizaines de minutes que les inhomogénéités d'indice dues aux stratifications thermiques peuvent être éliminées.

### 5.3 Sphérométrie

Une difficulté majeure du VLT a été aussi le contrôle de la pièce en tout début de processus. SCHOTT livrant l'ébauche avec une précision d'usinage de la face concave de  $0,5 \text{ mm}$ , il fallait être capable de mesurer cette surface avec précision dès le début du processus afin de pouvoir converger dès les premières retouches.

La solution a consisté à utiliser un sphéromètre carré de  $1 \text{ m}$  de côté muni de 3 points fixes et 5 capteurs de position. Un zéro est pris sur une pièce étalon puis le sphéromètre est déplacé le long de plusieurs diamètres de la pièce. L'ensemble des données collectées est traité par un logiciel spécifique qui permet de reconstituer une cartographie bidimensionnelle de la surface avec une précision qui atteint  $0,5 \mu\text{m RMS}$  sur  $8 \text{ m}$  de diamètre. Cette méthode de mesure, qui a fait l'objet d'un dépôt de brevet par REOSC, nous permet de pousser la phase de doucissage aussi loin que possible afin de réduire le nombre des retouches de polissage.



Le sphéromètre carré

## 6 MANIPULATION DE GRANDS MIROIRS FRAGILES

Les grands miroirs du VLT sont des objets fragiles qu'il convient de manipuler et transporter avec les plus grandes précautions au vu de leur grande valeur et criticité. Le critère de sécurité est en fait donné par le verrier Schott qui ne garantit une survie long terme de son matériau Zérodur que si, au cours de la vie du miroir, les contraintes internes demeurent inférieures à  $5 \text{ Mpa}$ .

Il faut alors savoir que, simplement posé sur trois points répartis sur sa périphérie, le miroir voit se développer, dans cette configuration bien conventionnelle, des contraintes internes qui dépassent  $20 \text{ Mpa}$ . La flexibilité du miroir est donc son premier ennemi et il devra à tout moment être supporté de façon uniforme par un grand nombre de points d'appui.

Outil de manipulation

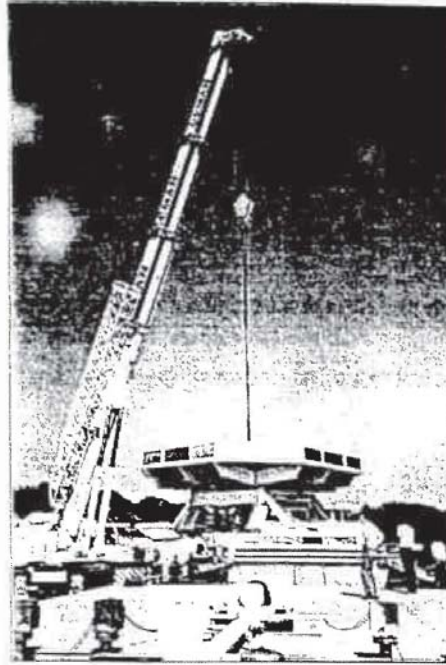


Nous avons retenu le nombre de 15 points support pour la griffe de manipulation qui permet d'extraire et déposer la pièce des conteneurs ou des machines de polissage. Un jeu de balances équilibre automatiquement les efforts entre les 12 points en périphérie et les 3 points situés autour du trou central pour que les contraintes internes ne dépassent pas 1 Mpa.

Dans sa caisse de transport, c'est sur 24 plots de caoutchouc que repose le miroir. Il est immobilisé latéralement par un piton central ajusté dans le trou central une fois le miroir posé. De cette façon, le conteneur de transport garantit la sécurité de la pièce lors des trajets maritimes jusqu'à un gîte de 45° sur le bateau.

REOSC a pris la responsabilité de tous les outils de manipulation et transport qui sont utilisés aussi bien dans notre atelier de Saint Pierre du Perray que sur le site au Chili.

Comme pour le spatial, les conteneurs de transport ont fait l'objet d'une ingénierie et de validations spécifiques afin d'en vérifier les performances avant de les utiliser pour transporter un matériel précieux. Un transport de qualification a été effectué avec un faux miroir en béton muni de différents enregistreurs accélérométriques afin de valider toutes les hypothèses de calcul avant de transporter la première ébauche. De plus une étude détaillée et une optimisation de la route à faire suivre au colis a été menée afin de sécuriser au maximum ce transport et de réduire son coût.



Le conteneur de transport mis en bateau

## 7 CONCLUSION

Le projet VLT a permis à REOSC de développer des savoir-faire nouveaux qui intéressent l'optique spatiale.

Les techniques de polissage ont été optimisées pour le cas de très grands miroirs tout en maintenant des précisions du type spatial.

Des formulations analytiques de dimensionnement de structures de miroirs allégés ont été développées et sont aujourd'hui systématiquement utilisées en phase d'avant projet.

Une connaissance détaillée des avantages et inconvénients des divers matériaux envisageables pour la réalisation de structures allégées de grandes tailles a été acquise. Elle nous permet aujourd'hui de pouvoir effectuer une analyse rationnelle et exhaustive pour tout type d'application.

L'optique active fait partie de notre travail quotidien car nous utilisons depuis plus de 3 ans le plus grand système d'optique active au monde comprenant un support asservi de 150 vérins, des senseurs de front d'onde interférométrique et Hartmann Schack et les logiciels de traitement associés.

Une méthode de traitement des données interférométriques robuste aux environnements vibratoires ou aux turbulences atmosphériques a été développée et est maintenant utilisée quotidiennement dans toute la société et notamment sur les projets SPOT 5 et HELIOS II. Une innovation a été réalisée avec le développement de la sphérométrie.



La manipulation et le transport de grands objets très fragiles et précieux est un autre acquis du VLT ont fait l'objet d'une ingénierie et de validations poussées

Cet ensemble de nouvelles compétences permettent aujourd'hui à l'Europe d'envisager une participation active au projet du Next Generation Space Telescope (NGST). Ce serait le vœu le plus cher de l'ESO qui nous a accordé sa confiance et soutenu nos efforts tout au long du passionnant projet qu'est le VLT.

## 8 REFERENCES

- 1 Geyl & P. Dierickx "The VLT primary mirrors - mirror production and measured performance", SPIE Vol 2536, p413-420, 1995
- 2 Geyl, J. Paseri "Optical polishing of the VLT 8.2 m primary mirrors - A report", OSA conference on optical fabrication & testing, May 1996
- 3 Cayrel, R.A. Paquin, T. Parsonnage, S. Stanghellini, K.H. Dost : "The use of Beryllium for the VLT secondary mirror", SPIE Vol 2587, 1996
- 4 Geyl, M. Cayrel "The Very Large Telescope Secondary Mirror - A report", SPIE Vol CR67