

Laboratoire d'Astrophysique de Marseille / Aix Marseille Université - LAM / AMU / OSU Pytheas - UMR 7326 - CNU 34

**DIPLOMES**

- Ancien élève de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts & Métiers, Paris 1967
- DEA Optique-Astrophysique, Université de Provence Aix-Marseille I  
Prof.: P. Rouard, Ch. Fehrenbach, C. Jausserand, P. Bousquet, H. Chanterel 1968
- Thèse de Doctorat d'Etat es Sciences Physiques et Habilitation à Diriger  
des Recherches (HDR), Université de Provence Aix-Marseille I 1974  
Titre: « Optique Astronomique et Elasticité »  
Jury: Ch. Fehrenbach, A. Baranne, A. Arnulf, P. Casal, G. Courtès

**POSTES**

- Boursier de 3<sup>ème</sup> cycle à l'Observatoire de Marseille 1967-69
- Vacataire, 'European Southern Observatory', Genève et Marseille 1970
- Assistant d'observatoire à l'Observatoire de Marseille 1971
- Aide astronome à l'Observatoire de Marseille 1978
- Astronome adjoint à l'Observatoire de Marseille 1979
- Astronome 2<sup>ème</sup> classe selon le nouveau décret de 1986 1987
- Astronome 1<sup>ère</sup> classe à l'Observatoire de Marseille 1994
- Astronome classe exceptionnelle, Observatoire de Marseille 2007
- Professeur émérite des universités, Aix Marseille Université (AMU) 2011-2013-2016-2019-2022-2027

**CONSEILS DE GRANDS ETABLISSEMENTS**

- Membre du Conseil d'Ecole, Observatoire de Marseille 1970-76, 76-82, 88-90
- Membre du Conseil Scientifique, Observatoire de Marseille 1972-76, 80-84, 84-88, 90-94, 94-98
- Membre du Conseil du Groupe Spécialisé 01, INSU-CNRS 1974-76
- Membre du Conseil de Laboratoire, Observatoire Haute Provence 1977-81, 81-86, 86-90, 90-94
- Membre du Conseil Scientifique de l'Université Aix-Marseille I 1980-84
- Membre de la Commission de Spécialistes Section 34 - Univ. Provence 1994-99, 99-04, 04-09
- Membre du Conseil Scientifique de l'Institut Gassendi IGRAP 1995-99
- Membre du Conseil d'Administration de l'Obs.Sciences Univers OAMP 2004-08, 2008-2012

**MANDATS DE COMMISSIONS INTERNATIONALES**

- Membre du Comité de Revue Intl. du Télescope LAMOST-Beijing 2003, 2005
- Membre Intl. du WG-4 Telescope Design de l' *European - Extremely Large Telescope* (E-ELT) de 42m de *European Southern Observatory* (ESO), Garching, Germany 2005-2010
- Membre Comité Intl. d'Evaluation du Télescope Réflecteur de Schmidt Géant LAMOST de Xinglong station, Beijing, P.R. China 2008
- Membre des Comités WG4 et ESE Européen *ELT Science and Engineering*, de *European Extremely Large Telescope* (E-ELT) de 39m – ESO 2005-2009, 2009-2012
- Membre du Comité d'édition de la revue internationale *Applied Mathematics & Mathematical Physics* 2014–
- Membre du Comité International de Revue et d'Evaluation de la Stratégie « One-Three-Five » des *National Astronomical Observatories* (NAO), *Chinese Academy of Sciences* (CAS), Beijing, P.R.China 2014-2015
- Expert du Projet Chinois de Télescope de 12m de *National Astronomical Observatories of China* (NAOC) auprès de l'Institut Kavli, Peking Univ. 2016
- Membre du Comité d'Edition du journal *MDPI-Photonics* – section *Optics* 2022–
- Membre du editorial board of the new English Journal by Chinese Astronomical Society in astronomical techniques and instruments. 2023–

**EXPERTISES EN INSTRUMENTATION ASTRONOMIQUE**

- Expert du Groupe de Définition du Télescope Spatial FAUST, au Laboratoire d'Astronomie Spatiale LAS / CNES / Univ. Berkeley 1970-71
- Expert Invité auprès du Groupe de Définition des Spectrographes du Télescope Canada-France-Hawaii 1975-78
- Expert Invité par le Groupe Conception du Télescope KECK 1980
- Expert Invité par l'Irak pour la Réception des Optiques du Télescope Irakien RC de 3,5m construit par Karl Zeiss 1983-84
- Co-Investigateur du projet EVRIS vers Mars, France-URSS – CNES/IKI 1988-89
- Co-Investigateur des Spectrographes solaires CDS et UVCS à réseaux

- toriques de la Mission SOHO, phases C et D, ETH Zurich/ESA/NASA 1989-94
- Principal Investigateur du développement de Miroirs à Courbure Variable (VCMs) de l'Interféromètre VLT – ESO 1991-99, 2001-08, 2011-14, 2015-18, 2019-24
- Expert du Comité international de définition du Projet Spatial MESSIER 2014
- Co-investigateur SIG2 du projet UV-V *Cosmic Origins* COPAG – NASA 2015-2017

#### INVITATIONS D'UNIVERSITES ETRANGERES

- Détaché à Kamuela, Hawaii, Télescope Canada-France-Hawaii CFHT 1984-85
- Invité par l'Université Laval, Québec, Canada pour l'Optique Active 1993
- Expert invité par la Chine – Télescope de Schmidt Géant LAMOST 1995, 1999, 2003, 2005, 2008, 2010, 2014
- Membre du Comité d'honneur de la conférence internationale "New Vision 400" organisée par la Chine à l'Université de Pékin 2008
- *Visiting Fellowship under CAS President's Intern. F. Initiative (PIFI)* au *National Institute for Astronomy and Technology (NIAOT)*, Nanjing 2016
- Invité par le *Shanghai Institute of Technology and Physics*, Shanghai 2016

#### RESPONSABILITES DE DIRECTION – LABORATOIRE D'OPTIQUE - R&D (LOOM)

- Direction du Laboratoire d'Optique de l'Observatoire de Marseille (LOOM), actuellement au sein du Lab. Astrophysique Marseille - LAM, comprenant 17 personnes en 2005 - professeurs, chercheurs, post-docs, étudiants, ingénieurs et techniciens 1975-2005

#### RELATIONS AVEC LE MONDE INDUSTRIEL

- Auteur de 12 brevets d'invention dont 10 comme seul auteur.
- Responsable des contrats R&D Univ. Provence / ETH Zurich de matrices actives pour l'obtention des premiers réseaux de diffraction toriques, 5 réseaux embarqués sur CDS et UVCS - Mission SOHO (indust.: Cybernetix SA, Contraves Space AG, Bach Research Corp., USA) 1979-1982 et 1989-1991
- Responsable du contrat INAG (INSU) / Obs. de Victoria (Canada) pour la taille de lames asphériques du CFHT (industriel : Secia SA). 1983-84
- Responsable du contrat Université de Provence / IAS de Frascati pour les miroirs actifs du Télescope MiniTrust II (indust: Cybernetix SA). 2001-03
- Responsable de 6 contrats R&D Univ. Prov. / ESO pour l'exécution des 24 miroirs à courbure variables du VLTI (indust.: Gauthier SA) . 1991-2008 et 2011-2017

#### ACTIVITES ET RESPONSABILITES D'ENSEIGNEMENT

- Enseignement magistral – Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Physique de Marseille (devenue Ecole Centrale de Marseille) 1990-2005
- Co-responsable de la création du Master "Instrumentation Optique Lasers" (IOL) des Universités Aix-Marseille I, II et III 2003-2005
- Enseignement magistral - Master IOL des Universités Aix-Marseille 2006-2011

#### ENCADREMENT DOCTORAL

- Direction de thèses de doctorat de 1989 à 2010 - dont certaines en co-encadrement : Huit docteurs ayant obtenu le diplôme de PhD.

#### AFFILIATIONS

- Membre de *The Optical Society of America* 1970 – 1976, 2014 ID# 1129345
- Membre de l'Union Astronomique Internationale – IAU, Division B 1976 –
- Membre de la Société Française d'Astronomie & d'Astrophysique 1986 – 2017
- Membre Co-Fondateur de la Société Européenne d'Astronomie 1991 –
- Membre de l'Association du Planétarium d'Aix en Provence 1995 – 2005
- Membre de *The International Society for Optics and Photonics* - SPIE 2011 – ID# 200399

#### DISTINCTIONS

- Prix de Physique Pierre Cotton - Application des Sci. Phys.- APASP 1972
- Prix Frédéric Forthuny - Académie des Sciences Paris - Institut de France 1978
- Grand Prix André Lallemand d'Astronomie - Académie des Sciences 2000
- Invité par l'Académie des Sciences de Chine à la Cérémonie inaugurale du Télescope Reflecteur de Schmidt Géant LAMOST, Xinglong, Chine 2008
- Astéroïde (59045) Gérardlemaitre = 1998 TR<sub>2</sub> – WGSBN Bull. 2, #2 2022

## ■ ACTIVITES DE RECHERCHE

## ■ RESEARCH ACTIVITIES

### • Introduction – Calcul de Combinaisons Optiques – Elasticité et Développement des Méthodes d'Optique Active

#### Introduction – Optical Design – Elasticity and Development of Active Optics Methods

J'ai été accueilli à l'Observatoire de Marseille, comme étudiant de DEA, par MM. Ch. Fehrenbach et A. Baranne qui m'ont demandé de me consacrer à l'Instrumentation Astronomique. Je leur suis reconnaissant de m'avoir fait choisir cette orientation qui me convient parfaitement.

Mon activité scientifique s'est portée essentiellement sur les Télescopes et les Instruments d'Optique Astronomique. Je me suis particulièrement attaché à l'amélioration de leurs performances – *luminosité, résolution spatiale et spectrale* -- en élaborant les méthodes d'*Optique Active*. Ce principe est applicable tant pour la *taille* de surfaces optiques par relaxation élastique que pour corriger *in situ* des aberrations.

L'opticien et astronome estonien B. Schmidt avait déjà exécuté de nombreux miroirs de télescope de qualité reconnue par les observatoires allemands lorsqu'il découvrit son fameux télescope à grand champ en 1927. A l'Observatoire de Hambourg, *afin d'éviter les défauts inhérents aux retouches locales*, il imagina qu'une flexion élastique pourrait permettre la taille asphérique de la lame de 36cm de son télescope à grand champ. *Schmidt proposa une méthode par dépression d'air utilisant un outil pleine taille* : le contour d'une lame à faces parallèles est appliqué sur une enceinte reliée à une pompe créant une charge uniforme. Après surfaçage avec un outil sphérique convexe, puis relaxation élastique, la lame prend la forme recherchée. Ainsi, la lame corrige par réfraction l'aberration sphérique du miroir sphérique concave de focalisation. Pour obtenir un grand champ bien corrigé, la lame doit être placée au centre de courbure du miroir sphérique.

Contrairement à ce qu'écrivit H. Chrétien dans *Les Combinaisons Optiques*, et d'après A. Wachmann (Hambourg), il est vraisemblable que Schmidt n'utilisa que partiellement cette méthode. *Néanmoins son idée reste remarquable*. A. Couder en donna la solution théorique en 1940. Elle fut complètement appliquée par E. Everhart en 1966 mais présente plusieurs difficultés.

Par rapport à *la méthode conventionnelle* de taille par retouches locales au moyen de petits outils pilotés par ordinateur, *la méthode par optique active présente l'avantage fondamental de la continuité de surface* -- absence de défauts de haute fréquence spatiale -- puisqu'elle utilise uniquement un outil pleine-taille et un surfaçage sphérique ou plan. **Il devient également possible de générer des asphériques non axisymétriques**. Ainsi, les *systèmes non-centrés*, ou ``hors de l'axe'', peuvent maintenant bénéficier de surfaces optiques de même qualité que celles des *systèmes centrés*.

Le choix de mes thèmes de recherche a été conditionné par la nécessité de développer les Méthodes d'Optique Active :

- Liens de synthèse entre la théorie des *aberrations géométriques* et la théorie de *l'élasticité*. Surfaces *synclastiques, anticlastiques, modes d'aberration*. Détermination d'une famille de modes communs à l'optique et l'élasticité appelés modes de *Seidel-Clebsch*.
- Extensions analytiques de la théorie des faibles déformations des plaques et coques minces. Recherches de configurations géométriques pour des miroirs actifs pouvant corriger des aberrations *simples* et *composées*. Distributions d'épaisseur constante et variable.
- Développement et validation au *laboratoire* de méthodes actives appliquées à la taille *sous contrainte* de miroirs, lentilles et lames correctrices.
- Génération de *réseaux de diffraction correcteurs d'aberrations* par répliques sur *matrices déformables*.
- Développement de méthodes actives *in situ* sur des *miroirs déformables*. Cas des miroirs primaires et Cassegrain des télescopes. Grandes déformations des miroirs secondaires à *asphéricité variable* et sphérique au repos. *Miroirs à courbure variable. Réseaux de diffraction actifs* permettant une correction variable de l'astigmatisme. *Miroirs déformables multimodes*.
- Elaboration de codes analytiques d'élasticité et de calculs optiques par passage de rayons dans le cas de systèmes incluant une surface *non-axisymétrique*. Elaboration de nouveaux types de télescopes, spectrographes et interféromètres permettant *d'optimiser* les applications de l'optique active.

**J'ai montré que le principe d'asphérisation par élasticité des dioptries, i.e. par optique active, peut s'appliquer d'une manière très générale au changement de la courbure et à la correction des aberrations optiques. J'ai trouvé des distributions d'épaisseur axisymétriques associées à certaines répartitions de forces extérieures permettant de générer les modes optiques de courbure, aberration sphérique, coma, astigmatisme ainsi que deux familles de modes non-axisymétriques de n'importe quel ordre élevé.** Pour générer ces modes optiques, j'ai considéré des configurations déformables de miroirs appartenant à trois classes différentes : i) distributions d'épaisseur constante, ii) distributions d'épaisseur variable [Ap3][Ac2] et, iii) distributions d'épaisseur hybrides, i.e. combinant les deux premières [AA 1].

J'ai trouvé des solutions analytiques exactes, i.e. **fournissant la limite de diffraction**, applicables à des miroirs :

- **les premiers miroirs à courbure variable.** Les applications les plus aisées sont obtenues avec des géométries à épaisseur variable et une combinaison de deux des trois forces suivantes : charge uniforme, force centrale, réaction périphérique.

- **les premiers miroirs à épaisseur variable corrigeant les aberrations primaires,** ou 3<sup>ème</sup>-ordre : Les trois premiers modes de surface d'onde de Seidel ont été obtenus par élasticité sur et testés par interférométrie. Les résultats ont confirmé la validité de la théorie des plaques minces dans le **critère de diffraction de Rayleigh.**

- **des miroirs de forme asphérique plus compliquée,** telles qu'un paraboloïde hors-axe ou un sphéroïde hors-axe, nécessite la superposition des modes opto-élastiques – que j'ai nommé **modes de Seidel-Clebsch** – peuvent être obtenus par épaisseur constante et superposition de forces extérieures. Dans d'autres cas particuliers, tel que la courbure et l'astigmatisme du 3<sup>ème</sup>-ordre, j'ai montré qu'il était possible de superposer ces deux modes simples en utilisant une même distribution d'épaisseur variable nommée **forme 'quasi-cycloïde'** [Ap3]. Cette solution procure d'importantes simplifications quant à la mise en œuvre des forces déformantes.

**Mes R&D en optique active sont résumés dans mon livre [AA 1]: 'Astronomical Optics and Elasticity Theory – Active Optics Methods', Springer-Verlag (2009).**

• **Télescopes de Schmidt – Invention : Asphérisation lames correctrices par taille plane et deux zones de depression**  
**Schmidt Telescopes – Patents : Apherization of refractive plates by flat-figuring and double-zone loading method**

Les télescopes à grand champ de type Schmidt utilisent une lame correctrice asphérique *par transmission* placée au centre courbure d'un miroir concave sphérique. Pour obtenir des lames dépourvues de défauts zonaux inhérents à la méthode des retouches locales, **j'ai inventé la méthode de taille plane par deux zones de depression** [Ap1][Ap2][Ap4][Ab 1-4]. Le contrôle de l'asphéricité est obtenu par réglages de l'intensité et du rapport des charges (dépressions d'air). Cette méthode est beaucoup plus précise que la méthode active préconisée par Schmidt qui utilise un outil sphérique.

G. Courtès qui m'a confié en 1969-72 la responsabilité de mettre en œuvre cette méthode au Laboratoire d'Astronomie Spatiale (LAS). Entre 1970 et 1990, **plus de 70 lames correctrices ont été asphérisées selon ma méthode** pour l'astronomie au sol (télescopes, cameras, spectrographes) et l'astronomie embarqué (mission Janus/CNES, caméras Maurer de la mission Skylab/NASA, etc)

C. Fehrenbach m'a encouragé en me donnant les moyens de développer la méthode active pour la taille d'une nouvelle lame de Schmidt de 65cm de diamètre pour le télescope franco-belge de l'Observatoire de Haute Provence (OHP). Après remplacement de l'ancienne lame, nous avons pu constater un gain en détection de plus de *deux magnitudes*. La comparaison des plages extrafocales entre l'ancienne et la nouvelle lame est sans équivoque. Ceci a complètement renouvelé la précision de mesure des vitesses radiales, la détection des raies d'absorption d'objets faibles pour la classification spectrale (C. Fehrenbach et al.) et le pouvoir de détection pour l'identification optique des quasars (P. Véron). D'autres lames asphériques ont été exécutées au laboratoire, notamment celle de 50cm pour l'observatoire de Lyon et celles des spectrographes Hertzberg et Casshawec pour le télescope d'Hawaï.

La méthode active a été présentée en 1974 à la société Angénieux, près de Saint-Etienne, bien connue de la NASA pour la qualité excellente de ses objectifs. Bien que la méthode active permette la *production simultanée de 12 à 18 lames de 2 à 5cm d'ouverture* et des déformations aussi forte que f/1, il n'a pas été donné suite à cette possibilité. Je regrette de ne pas avoir insisté pour rencontrer P. Angénieux à cette époque.

• **Premiers miroirs et réseaux corrigeant les aberrations extra-axiales – Développement méthodes d'optique active**  
**First mirrors and gratings corrected from off-axis aberrations – Developments of active optics methods – Patents**

Comme suite aux résultats précédents sur des optiques refractives, je me suis intéressé au cas des *miroirs*. Les miroirs permettent de concevoir des instruments nécessitant moins de surfaces optiques que les lentilles. Cela augmente la *transparence* et procure intrinsèquement une correction *achromatique* des aberrations. Bien que ces idées soient anciennes, de nombreuses solutions instrumentales restaient bloquées par la *difficulté de réalisation*. **Mon analyse d'élasticité a permis de trouver des solutions très simples corrigeant - en mode séparé - l'aberration sphérique, la coma et l'astigmatisme** [Ai 1]. Il était nécessaire de réaliser de tels miroirs pour les tester. J'ai obtenu les moyens de **réaliser les premiers miroirs corrigeant ces trois aberrations optiques séparément par déformation élastique**. Les profils d'épaisseur ont été obtenus par machines à commandes numériques. P. Connes a été intéressé pour son projet de grand télescope infra-rouge. Mes résultats ont été remarqués par G. Nelson et al. qui en font référence dans leur article (Applied Optics, 19, 2340 (1980)) et ont continué ces développements pour la construction du grand télescope Keck. André Lallemand de l'Académie des sciences, m'a encouragé à développer ces méthodes par déformation élastique. A l'aide d'une matrice active et d'une collaboration avec Diffraction Products Co (USA) pour la réplique, j'ai pu obtenir en 1983, pour G. Wlérick, R. Cayrel et le Télescope Canada France Hawaii (CFHT), le *premier réseau de diffraction corrigeant la coma*. Ce développement sur les réseaux n'a été publié qu'en 1992 [Ai7][Ai11].

• **Télescopes de Schmidt par réflexion – Découverte de la géométrie fournissant la résolution angulaire optimal**  
**Applications : Télescopes de ce type et Spectrographes utilisant des réseaux asphériques par réflexion**

**All-Reflective Schmidt telescopes – Discovery of the geometry providing the optimal angular resolution Applications : This telescope type and Spectrographs using aspherized reflective gratings.**

Les télescopes de Schmidt par réflexion sont exempts de chromatisme et leur transparence permet des études en infrarouge et en ultraviolet. Dans le cadre du programme spatial Faust, j'ai conçu le premier *miroir déformable d'un télescope de Schmidt par réflexion* [Ap6]. Ce miroir intégré dans un télescope ouvert à f/1.5 et testé par le LAS donne des images de 4 sec d'arc pour une qualité demandée de 1 min d'arc. Le miroir correcteur, qui n'a pas la symétrie de révolution, corrige simultanément l'aberration sphérique et l'astigmatisme du 5<sup>ème</sup> ordre. Il a été obtenu par superposition de déformations actives. Cette méthode a été ensuite retenue par G. Courtès et al. (LAS) pour la construction de la "Very wide field camera" de Spacelab embarquée sur la navette spatiale de la NASA.

**Ce thème m'a donné l'occasion de découvrir que**, contrairement aux télescopes de Schmidt par transmission dont la lame correctrice possède une zone de puissance nulle à  $(\sqrt{3})/2=0.866$  de l'ouverture utile (constante de Kerber), **la zone de puissance nulle du miroir correcteur d'un Schmidt par réflexion doit être placée à  $\sqrt{(3/2)}=1.224$ , soit à l'extérieur de son ouverture utile** [Aa4].

En conclusion, **j'ai formulé la relation donnant la meilleure résolution angulaire** qu'il est possible d'atteindre avec des Schmidt par réflexion en fonction des paramètres géométriques : rapport d'ouverture, inclinaison du correcteur et diamètre du champ [Ai4].

**• Télescope de Schmidt géant LAMOST (Chine) – Adoption de la géométrie découverte ci-dessus  
Giant Schmidt Telescope LAMOST (China) – Adopting the geometry discovered above**

**Ma géométrie optimale pour un télescope de Schmidt par réflexion - évoquée ci-dessus - a été remarquée par Ding-qiang Su, Xiangqun Cui qui l'ont adoptée pour la conception du télescope géant LAMOST.** Dans leur présentation de ce télescope (Applied Optics, 35, 5155 (1996)), ces astronomes font référence à mon article du colloque UAI d'Asiago (1984) [Ai4] et adoptent un miroir primaire dont le contour elliptique est défini par la *constante*  $\sqrt{(3/2)}=1.224$  que j'ai aussi proposée en 1979 [Aa4].

LAMOST a obtenu les premières images en 2008. Il complètement opérationnel depuis 2011. Il est entièrement dédié à un programme de *sky survey* spectroscopique par fibres optiques. **C'est le plus grand télescope de Schmidt jamais construit.** Le miroir primaire correcteur segmenté, de 4.5x6m d'ouverture, est monté en sidéostat ; le miroir secondaire concave est segmenté avec 8m d'ouverture. Les 24 segments actifs du miroir primaire ont une asphéricité variable, fonction de la position observée, i.e. de champs de 5° dans une bande de ciel dont la déclinaison varie de -10° à +90°. **Les 4000 fibres optiques motorisées se positionnent sur une surface focale de 1,8m de diamètre pour alimenter 32 spectrographes.** La capacité de stockage sera de 8000 spectres pour chaque intégration, soit la capacité jamais atteinte d'environ **50 000 spectres par nuit.**

Les segments du miroir primaire plan-asphérique sont de forme plane au repos. La forme asphérique de chacun d'eux est générée in-situ par de nombreux actionneurs. L'optique active contrôle constamment leur forme en fonction de la déclinaison et de l'ascension droite. Une autre contribution de ma part a été de redéfinir avec eux une distribution optimale des actionneurs.

**• Les premiers spectrographes à réseaux plan-asphériques – Asphérisation par réplique sur matrice active – Brevets**

**The first spectrographs with plane-aspherized gratings – Aspherization by replication on active master – Patents**

Suite aux demandes de P. Charvin –directeur de l'INSU– pour le Telescope Canada-France-Hawaii (CFHT), de Ch. Fehrenbach pour l'Observatoire de Haute Provence (OHP), de E.H. Richardson pour l'ESA, de C-c. Huang pour l'Observatoire de Purple Mountain (Nanjing) et de M. Blanc pour l'Observatoire du Pic du Midi (OMP), **j'ai élaboré, calculé et réalisé des spectrographes d'un type nouveau pour chacun des ces instituts.** Ces instruments -- uniquement par réflexion -- principalement destinés à l'étude d'objets faibles (galaxies, quasars, etc), n'utilisent qu'un minimum de dioptries et sont ainsi très lumineux dans l'UV, le visible et l'IR.

Basés sur un concept optique de Schmidt fournissant de très grands champs angulaires, seule l'aberration sphérique doit être corrigée. Afin d'éviter l'introduction de dioptries supplémentaires effectuant cette correction mais réduisant considérablement la luminosité (chromatisme résiduel et perte de lumière pour chaque dioptrie), **j'ai d'effectué cette correction d'aberration sphérique sur le réseau lui-même** [Ap 7]. **Pour la première fois, les réseaux de diffraction asphériques de ces instruments ont été générés par réplique active sur matrice déformable.**

Il est bien connu des fabricants de réseaux que l'efficacité d'une réplique plane est quelque peu supérieure à celle du réseau plan original. Une réplique plane peut donc être déposée sur une matrice déformable sans dégrader l'efficacité. Dans une deuxième phase, lors de la mise sous contrainte de la matrice, une nouvelle réplique est obtenue sur un substrat rigide. Pour cela, **j'ai conçu des matrices actives en vase** qui peuvent générer, à partir de réseaux plans, la forme asphérique optimale. En collaboration avec Instrument Jobin-Yvon SA en France, **j'ai développé ce procédé pour la réalisation de réseaux plans-asphériques** [Ap 7] [Ap 9] [Ab 8] [Ab 9].

L'emploi de réseaux plans asphériques par réflexion, permet ainsi de concevoir des instruments plus lumineux, mais aussi plus performants du point de vue des aberrations résiduelles. **J'ai consacré une grande partie de mon activité à l'élaboration d'un code de calcul optique spécial** pour déterminer de la meilleure forme de ces réseaux et à optimiser l'obtention de ceux-ci par élasticité. Je ne citerai ici que quelques spectrographes construits selon ce concept, et dont j'ai eu

la charge : PEDISCOU-OHP, **UV-PRIME-FOCUS - CFHT** [Ap 9] [Ac 4] [B 6], MARLY1-OHPet MARLY2-Nanjing [Aa 8], CARELEC-OHP [Ap 14], ISARD-Pic-du-Midi et OSIRIS-ESA [Ap 12].

Pour ces spectrographes à objets faibles, le calcul montre que les réseaux plans asphériques (ou pseudo-plans) fournissent la meilleure résolution si leur surface optique est à l'extérieur de la pupille (rapport  $\sqrt{3/2}=1.224$ ). **Ce résultat m'a amené à concevoir des matrices déformables une forme vase ayant une zone active encastrée à sa périphérie.**

Environ quinze réseaux plan-asphériques ont été ainsi exécutés sous ma responsabilité en collaboration avec Mrs J. Flamand et A. Moreau chez Instrument Jobin-Yvon SA (devenu Horiba-Jobin-Yvon SA).

• **Spectrographes ayant une seule surface optique – Asphérisation par réplique active des premiers réseaux toriques**  
**Single-surface spectrographs – Aspherization by active optics of the first torical gratings**

Pour la spectroscopie embarquée à haute résolution, nous avons développé en collaboration internationale avec M.C.E. Huber (Polytechnikum ETH Zurich et ESA) des spectrographes en ultraviolet-extrême fonctionnant *en diffraction normale*. Chaque spectrographe est composé uniquement d'une seule surface optique : un **réseau torique concave** [Ac 8] [Ai 5] [CI 10].

**J'ai développé et construit les premières matrices actives** – en collaboration avec B. Bach d'Hyperfine Corp. à Boulder (USA) – **permettant de générer par réplique la forme torique en partant de réseaux concaves**. Leurs performances de ces réseaux ont été évaluées par l'ETH de Zurich et sous vide à l'Université de Boulder. En 1990, cette méthode a été sélectionnée par l'ESA avec 5 réseaux-spectrographes embarqués à bord de la **Mission spatiale SOHO**. Depuis la mise en orbite héliocentrique de la Mission SOHO au point de Lagrange L1 en 1995, **ces spectrographes – CDS et UVCS – ont donné d'excellents résultats**. La mission a été prolongée au delà de 2005.

• **Miroirs secondaires de télescope d'asphéricité variable – Formes en vase – Grands télescopes et concept TEMOS**  
**Telescope secondary mirror with variable asphericity – Vase shape – Large telescope and TEMOS concept**

L'expérience acquise par la remise en forme active du miroir Cassegrain du TCFH (voir plus loin), m'a permis de développer l'idée d'un *miroir secondaire actif* applicable à de très grands télescopes. En 1979, avec A. Baranne, nous avons considéré (avant le début du projet Keck) que plusieurs miroirs identiques peuvent composer, par asservissement, un primaire sphérique d'excellente qualité. En associant un secondaire monolithique de *forme vase* également sphérique lors du polissage, nous pouvons aisément obtenir un *très grand télescope* [Aa 6] [Ap 10].

**Dans notre concept de télescope segmenté TEMOS (Télescope Mosaique, ouverture 1,5m) le miroir secondaire d'asphéricité variable est contrôlé par dépression interne et permet ainsi d'optimiser plusieurs foyers Cassegrain et Nasmyth à l'aide de systèmes optiques variés** [Aa 5] [Aa 7].

La famille d'ellipsoïdes disponibles constitue un paramètre libre permettant d'optimiser séparément un correcteur dioptrique au foyer nodal et des instruments tels que réducteur focal, allongeur focal, transport IR, etc, aux foyers Nasmyth. Avec mon élève Min Wang, nous avons testé au laboratoire, puis sur le ciel de l'OHP, le prototype Mini-TEMOS de 1.4m ayant 4 segments afin de vérifier le concept. Les résultats des tests sur le ciel étaient très bons [Ac 10].

Le concept d'une segmentation diluée de 6 miroirs circulaires de 8m de diamètre constitue une option intéressante pour un télescope de 20m d'ouverture. **Cette option est d'ailleurs actuellement proposée par le projet américain LLST.**

• **Invention des miroirs à courbure variable (ou miroirs zooms) – Trois configurations très simples**  
**Invention of variable curvature mirrors (or zoom mirrors) – Three straightforward configurations**

Afin d'obtenir **les premiers miroirs à courbure variable (VCM) fournissant la limite de diffraction, j'ai découvert en 1974 des distributions d'épaisseur non-constante** [Aa 3] [Ab 6] [Ab 7]. Ces distributions d'épaisseur appartiennent à deux familles distinctes que j'ai nommées **forme 'type-tulipe'** et **forme 'type-cycloïde'** **ces formes très commodes d'emploi**. La forme type-tulipe est déformée par une **force centrale en réaction périphérique**. La forme type-cycloïde est déformée par une **charge uniforme**, e.g. une pression ou dépression d'air, **en réaction périphérique**. Le profil de la surface arrière d'un VCM est obtenue par machines à commande numérique.

Ces VCM permettent de compenser le champ angulaire d'un interféromètre ayant un bras mobile en réalisant l'invariance des chemins optiques. En cophasant le champ, ils apportent la solution au problème de la conjugaison active de la position des pupilles d'entrée et de sortie. Un résultat général est le suivant [Ai 3] : **L'étendue optique** – dans le sens de Jacquinot -- de tous les interféromètres ayant un bras mobile et un VCM disposé au foyer de ce bras est ainsi augmentée d'un facteur de l'ordre de 100.

**Dans le cas d'une charge active uniforme correspondant à la forme type-cycloïde**, j'ai construit et testé le premier VCM en 1973. Ce miroir a été installé au foyer du bras mobile de l'interféromètre infrarouge par transformée de Fourier (TF) du CNRS à Verrières Le Buisson qui a été élaboré par P. Jacquinot puis développé par P. Connes.

Suite aux excellentes performances de ce VCM, A. Valentin du Laboratoire de Physique Moléculaire et Applications (LPMA, Paris VI, Univ. Jussieu) m'a demandé de doter le Grand Interféromètre par Transformée de Fourier (GITF, spectrographe infrarouge) de ce type de miroir. Le GITF est le plus grand interféromètre existant avec une différence de marche 25m. **Le VCM a permis de gagner un facteur 100 sur l'« entendue optique » du GITF**. Ce gain en luminosité renouvelait complètement les performances pour l'analyse des phénomènes transitoires.

La compensation de champ a été également appliquée récemment aux lignes à retards des interféromètres stellaires par synthèse d'ouverture inventés et développés par A. Labeyrie en 1973. Etant donné la résolution angulaire extrêmement grande de ces instruments, le champ à compenser est ici limité à quelques secondes d'arc. Un VCM doit être disposé pour chaque la ligne retard (trombone optique) associée à un télescope. Lors du mouvement diurne, les lignes à retard maintiennent l'égalité des chemins optiques sur l'axe, tandis que **les VCMs maintiennent cette égalité dans le champ de l'instrument.**

Ces miroirs ont intéressé J. Beckers pour l'Interféromètre du VLT de l'ESO au Chili, et D. Mourard pour le GI2T du CERGA près de Grasse. L'ESO m'a confié les études et le développement de **VCMs dont la courbure varie de  $f/\infty$  à  $f/4$  pour compenser une différence de marche de 120m du VLTI.** Ces VCM, ou *miroirs zooms*, compensent un champ de 3'' au foyer recombinaison du VLTI. Dans le cas des grandes déformations, une analyse d'élasticité très approfondie a été effectuée pour déterminer les distributions d'épaisseur produisant une flexion purement parabolique. Les distributions obtenues pour les formes *tulipe* et *cycloïde* ont été comparées avec celles issues de la théorie des faibles déformations. Afin d'éviter les vibrations, la *forme cycloïde* avec pression d'air variant jusqu'à 8Atm a été préférée. Ces recherches et leur validation ont fait l'objet de la thèse de mon élève Marc Ferrari. Les 15 VCMs construits et testés par notre laboratoire et ont donné la précision prévue par la théorie. **Ces VCMs sont en opération sur les huit Lignes à Retard du VLTI / ESO, ainsi que sur les télescopes auxiliaires (AT) sur la configuration PRIMA** (Phase Reference Imaging – cf. Frédéric Deric).

• **Théorie des cantilevers – Premières solutions analytiques donnant une épaisseur finie non nulle à leur extrémité**  
Theory of cantilever beams – First analytical solutions providing a non-zero finite thickness at the free-end

La flexion des poutres encastées ou *cantilevers* est un des premiers problèmes, sinon le premier, étudié par les élasticiens. Ce problème qui présente une dimension de moins que celles de la théorie des plaques, concerne aussi le cas de barres dont la contrainte maximum est constante (problème d'Euler-Clebsch énoncé par Galilée). On lui adjoint le cas où la courbure de la fibre médiane reste constante au cours de la déformation. Il s'agit de rechercher les distributions d'épaisseur satisfaisant ces conditions pour des charges variées. Pour une charge au bord, au poids propre, ou uniforme, on montre que les équations différentielles à résoudre appartiennent à la même classe analytique.

Les solutions connues dans le cas des contraintes constantes, fournissent des cantilevers dont l'extrémité libre est d'épaisseur nulle. **J'ai montré que, contrairement à une opinion très répandue et dans les deux cas – courbure constante ou contrainte constante –, les équations sont complètement intégrables et fournissent donc des cantilevers dont l'épaisseur reste finie à l'extrémité libre** [Ap 21]. Les distributions d'épaisseur trouvées ont une représentation polynomiale à exposants fractionnaires et contiennent les solutions connues ayant l'extrémité libre d'épaisseur nulle. **Ces nouvelles distributions d'épaisseur constituent une extension des formules historiques d'Euler-Clebsch.** Elles trouveront des applications pour la mise en forme active des composants élémentaires d'un découpeur d'image ou *'image slicers'*.

• **Grands télescopes à miroir liquide – Invention de miroirs en vase déformables multimodes – VMDM**  
Large telescopes with liquid mirror – Invention of vase multimode deformable mirror – VMDM

Un nouveau type de télescope à miroir primaire liquide (LMT) a été développé à l'Univ. Laval par E. Borra et al. et à l'Univ. de Vancouver par P. Hixson et al.. Ces télescopes ne peuvent observer qu'au zénith. **Le plus grand, de 6-m de diamètre, effectue un « sky survey » depuis 2005.** La forme parabolique est obtenue par rotation du barillet sur coussin d'air. La qualité d'image est excellente puisque la tache de diffraction d'Airy est obtenue avec un rapport de Strehl supérieur à 0.9. Les LMT n'utilisent actuellement qu'un miroir primaire avec un correcteur dioptrique à trois ou quatre verres de E.H. Richardson et travaillent sur un champ de 15 à 30' centré sur le zénith. Les CCDs grand format, utilisables en balayage synchronisé –*drift scan*– avec le mouvement diurne, ont permis l'avènement de ce nouveau type de télescopes en effectuant des *sky surveys*.

L'utilisation de télescope à miroir liquide **hors du zénith est une grande difficulté.** Cela est possible en ajoutant deux miroirs déformables corrigeant les aberrations en fonction de la distance zénithale. Suite à mon étude théorique d'élasticité d'une forme vase, **j'ai conçu une configuration déformable appelée miroir en vase déformable multimode équipé de bras radiaux de déformation** (VMDM) [Ap 19] [Ap 26]. Un miroir prototype ayant douze bras radiaux de déformation a été construit. **Les six modes de déformation obtenus montrent que les résultats expérimentaux sont excellents et conformes à la théorie** [Ap 20]. Pour la construction d'un LMT travaillant jusqu'à 5° du zénith, le concept retient une combinaison à trois miroirs de type Paul avec des miroirs secondaire et tertiaire du type VMDM.

• **Projet European Extremely Large Telescope (E-ELT) – Optique active et taille de segments sous contrainte**  
European Extremely Large Telescope project (E-ELT) – Active optics for segmented stress mirror polishing

Les très grands télescopes de l'astronomie utilisent le *principe de segmentation du grand miroir primaire*. Afin d'obtenir des champs de ciel appréciables, les meilleures performances sont obtenues avec un miroir primaire asphérique. Le projet E-ELT est un concept à 5 miroirs – 39m d'ouverture – ou les *miroirs adaptatifs* plans M4 et M5 doivent permettre d'obtenir des images *diffraction-limited* sur un champ de 8arcmin de ciel.

Ces télescopes possèdent un miroir primaire constitué de *segments asphériques*. Chaque segment est issu d'une portion de *surface conicoïde* comme par exemple un paraboloïde ou un ellipsoïde. **Les difficultés de réalisation de tels**

**segments sont considérables.** Cependant des télescopes Ritchey-Chrétien de 10m de diamètre ont été construits selon ce principe : les deux télescopes KECK-Univ.Californie, et actuellement le GTC-Canaries (Le télescope HET-Univ.Texas et de son homologue SALT-Afrique du Sud utilisent un primaire segmenté sphérique ; ils sont donc dédiés à des programmes ayant un champ de ciel petit et une résolution angulaire limitée par turbulence atmosphérique : Ils sont *seeing-limited*).

Suite à mon travail de 1972 [Ap1] **sur la méthode de *taille sous contrainte et relaxation élastique* et au vu de mes résultats de 1977 [Ai 1], démontrant que l'on peut générer des surfaces non-axisymétriques avec excellente précision de continuité,** la méthode d'Optique Active a été adoptée pour l'exécution des 36 segments du Télescope KECK. Sur l'initiative de H. Smith, alors directeur de l'Observatoire McDonald -Texas, G. Nelson, responsable du projet KECK, m'a invité comme expert en 1977 à des réunions de travail pour ce type de développement. Dans leur publication, J. Lubliner & J. Nelson (Applied Optics, 19, 2332 (1980)) font référence à mon article théorique sur la correction des aberrations par élasticité, publié en 1974 [Ap 3].

D'une manière similaire aux R&D que nous effectuons au sein de notre université, la taille des segments asphériques du télescope KECK a tout d'abord été effectuées à l'Université d'Arizona. Le transfert de technologie dans l'industrie américaine a été une opération délicate ayant nécessité le recours à deux industriels. En Europe, la question reste encore entière pour la construction du projet E-ELT. Il faudra savoir se donner les moyens d'effectuer ce transfert car il ne serait pas acceptable que les erreurs de surface optique du type haute fréquence spatiale limitent les performance de l'optique adaptative et la correction de la turbulence atmosphérique.

Mon article de 2005 dans Meccanica [Ap 26] apporte une solution innovante plus précise pour la taille de segments asphériques hors-axe par optique active. Elle utilise **une géométrie en vase composée de deux zones concentriques de rigidité différentes et équipée de bras radiaux** pour d'application des forces – que j'ai nommée miroir en vase déformable multimode - VMDM (voir ci-avant) –, cette configuration permettant la *superposition par flexion d'une famille de modes d'aberration* que j'ai appelée *modes de Clebsch-Zernike*. Ces modes génèrent tous les modes utiles à l'asphérisation des segments hors-axe d'un miroir de forme conicoïde. La rigidité plus grande de la couronne externe liée au segment et recevant les forces de déformation permet de générer la déformation nécessaire de façon très progressive, et ainsi de diminuer d'un facteur 2 le nombre de forces à appliquer. Cette configuration est un outil bien adapté à la taille de chacun des 1000 segments de l'E-ELT.

Suite à mes présentations au Comité international WG Optical-design ELT 42m et au Comité ESE Science-Engineering E-ELT 39m de l'ESO, nos deux brevets d'invention en 2009-2010 comme co-auteur, le Groupe Projet E-ELT nous a attribué en 2012 un contrat R&T sur l'asphérisation d'un segment prototype E-ELT de 1.5m par « stress polishing ». Ce développement nécessite des équipements nouveaux en cours d'installation au Laboratoire d'optique (Dpt. LOOM du LAM)

• **Enregistrement des réseaux holographiques à espacement variable de traits – Invention de miroirs compensateurs déformables – Méthode universelle d'enregistrement**

**Holographic recording of variable spacing gratings – Invention of deformable compensators – Universal recording method**

D'autres types de réseaux de diffraction, différents des réseaux plan-asphériques évoqués plus haut, sont utilisables en haute résolution spectrale sur des domaines de longueur d'onde inférieurs au tiers d'octave. Il s'agit de **réseaux holographiques à espacement variable des traits**. Du fait de leur procédé d'enregistrement faisant appel à la fixation photosensible d'un interférogramme obtenu par interférence de deux faisceaux, **ces réseaux sont également susceptibles de corriger des aberrations** : il suffit d'introduire la correction optique appropriée dans l'un des faisceaux monochromatique d'enregistrement.

Du fait de l'enregistrement à une longueur d'onde centrale, ces réseaux ne sont pas exempts de chromatisme, ce qui limite leur domaine spectral (ceci n'est pas le cas des réseaux par réflexion plan-asphériques ou toriques décrits précédemment qui sont achromatiques). Les **miroirs en vase déformables multimode (VMDM) [Ai 8] [Ap 26]** ouvrent une voie idéale pour obtenir une grande variété de corrections d'aberrations superposables. *Il suffit de générer ces aberrations négativement sur l'un des faisceaux d'enregistrement.*

Dans le cadre des nouveaux instruments à construire pour rénover les équipements du **Télescope Hubble** en 2002, **j'ai conçu et construit un VMDM plan à six bras permettant l'enregistrement holographique des trois réseaux du Cosmic Origins Spectrograph (COS)**. Pour chaque réseau de COS, Michel Duban a montré que le nombre de pixels formant les aberrations résiduelles, image d'un point, peut être réduit d'un facteur 10, *soit un gain de 1,5 en magnitude limite par rapport au système proposé par nos collègues américains. Les résultats des tests interfométriques de ce VMDM plan ont confirmés ce gain en qualité d'image [Ap 24] [Ap 25].*

**Cette méthode simple et générale pourra aisément être universellement appliquée par les constructeurs pour l'obtention de tous types de réseaux holographiques corrigés à espacement variable de traits.**

• **Télescopes anastigmatiques de Rumsey modifiés – Asphérisation des trois miroirs – Double vase et Forme tulipe**  
**Modified-Rumsey anastigmat telescope – Aspherization of three mirrors – Double vase form and tulip form**

Pour des télescopes dont le champ de ciel doit être compris entre 1 et 2°, le concept du télescope de Rumsey devient beaucoup plus intéressant qu'un Schmidt (champ courbe) ou qu'un Ritchey-Chrétien muni d'un correcteur diotrique.

En ajoutant un troisième composant à une combinaison afocale de Mersenne, qui est en elle-même anastigmat, N. Rumsey a trouvé une combinaison à trois réflexions qui est également anastigmat. Cette combinaison, **dont le champ focal est directement plan**, est particulièrement bien adaptée aux grandes mosaïques de détecteur CCD *nécessairement planes*.

**Les difficultés dues à la forme des miroirs – tous trois hyperboliques, d'asphéricité sensiblement en progression géométrique – avaient jusqu'ici empêchées la construction d'un tel télescope.**

Les méthodes d'optique active m'ont permis de reconsidérer le problème. **En modifiant le télescope de Rumsey, j'ai pu imaginer une forme en double vase déformable comme substrat commun aux miroirs primaire et tertiaire, et dont la surface optique est continue entre ces miroirs.** Les conditions de continuité entre ces miroirs – *ordonnées et pentes identiques* – sont des paramètres libres disponibles en conservant toutes les propriétés des anastigmat à champ plan. L'avantage primordial est de **permettre la taille simultanée de deux miroirs au moyen d'un seul outil sphérique** ayant le diamètre externe du primaire. J'ai développé ce concept en démontrant par l'analyse d'élasticité que ces deux miroirs peuvent être hyperbolisés simultanément par une même dépression d'air [Ai 6].

**Suite à ce résultat théorique, j'ai obtenu en 1997 un financement BQR de l'Université de Provence pour la construction du premier télescope Rumsey-modifié : MINI-TRUST de 45cm d'ouverture à f/5.** Le contrat de participation de l'IAS-Frascati (R. Viotti et al.) a permis de construire les miroirs en doubles exemplaires pour MINI-TRUST II. En 2004, les résultats des test optiques après intégration du télescope sont excellents : **la surface d'onde obtenue par double passage montre une qualité d'image dans la limite de diffraction** [Ap 27] [Ac 21].

Le concept à trois réflexions a été proposé en 2008 par le projet américain « Large Synoptic Survey Telescope » (LSST). Malheureusement la structure du miroir primaire en nid d'abeille ne permettra pas d'appliquer la présente méthode d'asphérisation par optique active.

## ■ ACTIVITE D'ENSEIGNEMENT – STAGES D'ETUDIANTS

### ■ TEACHING ACTIVITIES – STUDENT TRAININGS

A partir de 1990 jusqu'en 2005, **j'ai donné des cours magistraux aux élèves ingénieurs de l'Ecole Nationale Supérieure de Physique de Marseille** (ENSPM – faisant maintenant partie de l'Ecole Centrale) sur l'optique instrumentale, la diffraction, les aberrations géométriques, la théorie de l'élasticité et l'optique active.

J'ai également donné quelques cours sur ces sujets aux étudiants de Maîtrise de Physique de l'Université d'Aix-Marseille I.

J'ai été co-responsable en 2003-2005 avec F. Vedel du Master *Instrumentation Optique et Lasers* (IOL) des trois universités Aix-Marseille (AMU).

J'ai donné un **enseignement dans le Master IOL** (2006- 2011), soit en moyenne 4 cours magistraux de 2h chaque année : Optique de Gauss, étendue optique, théorie de la diffraction, théorie des aberrations, théorie de l'élasticité des plaques minces et des coques, optique active, relations entre les modes d'élasticité de Clebsch et les modes optiques de Seidel.

Depuis 1983, j'ai accueilli environ **trente élèves stagiaires de Maîtrise**, d'IUT et élèves ingénieurs (ENSI). Les principaux sujets traités ont été les suivants :

- détermination des constantes élastiques de quelques verres d'optique,
- mesure de la rupture de quelques verres d'optique en fonction du temps de charge,
- détermination de déformabilité de quelques verres en charge extérieure,
- montage et mise au point d'interféromètres de Fizeau et de Twyman-Green,
- tests interférométriques d'un miroir en vase tubulaire corrigeant le mode astigmatisme,
- étude d'un système de mesure des forces de réaction pour paraboliser les grands miroirs,
- découpe de masques multi-fente pour laser YAG et table motorisée,
- contrôle et dépouillement interférométrique de surfaces déformées par optique active,
- modélisation des flexions obtenues avec deux types de miroirs à courbure variable,
- élaboration de logiciels de contrôle des courbures d'un miroir zoom,
- tests interférométriques d'un miroir plan déformable multimode,

## ■ ACTIVITE D'ENCADREMENT – THESES DOCTORALES

### ■ SUPERVISION ACTIVITIES – DOCTORAL THESIS (PhDs)

Chercheurs ayant effectué une thèse de doctorat sous ma direction :

- **Min Wang** ( Dr. en 1992) sur « Optique astronomique et active » : Tests optiques en laboratoire et sur le ciel et performances obtenues avec le télescope segmenté Mini-Témos de 1.3 m installé à l'OHP; nouveau type de miroir correcteur d'astigmatisme par déformation tubulaire; décomposition des modes d'aberration d'un réseau concave utilisé en

grandissement -1. Après un postdoc, M. Wang est, en 2013, 'Senior scientist' à l'Institut National d'Optique du Canada (Québec).

- **Marc Ferrari** (Dr. en 1994) sur « Optique active et grandes déformations » : Développement analytique de la théorie des grandes déformations appliquée au cas des miroirs à courbure fortement variable (miroirs zoom). Détermination de la géométrie d'épaisseur par un système d'équations non linéaires pour les cas suivant : i) une forme cycloïde soumise à une charge uniforme, ii) forme tulipe soumise à une force centrale. Après trois postdocs - ESTEC/ESA, Université Laval puis ESO -, M. Ferrari a intégré le LAM comme Astronome-adjoint.

- **Gilberto Moretto** (Dr. en 1996), cotutelle avec E. Borra, sur « Optical correctors for liquid mirror telescopes » :

Développement expérimental d'un miroir déformable multimode permettant de générer des modes élastiques de Clebsch compatibles avec les modes optiques d'aberration (modes de Seidel). Tests interférométriques de flexion et superposition de plusieurs modes. Etude d'un télescope à trois miroirs avec primaire fixe. Après un poste au Stewart Obs., Tucson, puis 'Senior research associate' au NSO (New Mexico), G. Moretto est ingénieur dans l'industrie.

- **Luz-Maria Montoya** (Dr. en 2004), en co-encadrement avec K. Dohlen, sur « Cophasage des miroirs segmentés pour les ELTs » : Analyse théorique de la distribution d'intensité de la surface d'onde réfléchi par des segments en prenant en compte les paramètres caractérisant les défauts de piston, l'interstice entre segments, le défaut de bord rabattu, et la turbulence atmosphérique. Evaluation de effets par interférométrie Mach-Zender sur un miroir segmenté. L-M. Montoya a obtenu un poste à l'institut du Grand Télescope des Iles Canaries.

- **Arnaud Liotard** (Dr. en 2006), en co-encadrement avec F. Zamkotsian, sur le développement des micro-miroirs intégrés (appelés 'Meoms') et leur application potentielle à l'optique adaptative pour les grands télescopes. Evaluation des performances de plusieurs prototypes sur banc interférométriques. Contributions à la conception de Moems. A. Liotard a accepté un poste à l'Aérospatiale.

- **Emmanuel Hugot** (Dr. en 2007), en co-encadrement avec M. Ferrari, sur « Optique astronomique et élasticité » :

Détermination par code d'éléments finis de miroirs asphérisables par méthode active. Itérations par comparaisons des modes de flexion et des modes d'aberrations. Recherche de configurations optimales pour le cas d'astigmatisme. Cas d'asphérisation par déformation sous contrainte du projet de miroir secondaire adaptatif d'une unité du VLT. E. Hugot a intégré le LAM comme Chargé de recherche.

- **Arthur Vigan** (Dr. en 2009), en co-encadrement avec B. Leroux, sur « Détection et caractérisation des exoplanètes par imagerie directe avec IRDIS / VLT ». Modélisation et comparaisons théoriques de différentes combinaisons instrumentales incluant divers masque de phase permettant d'améliorer le contraste en mode imagerie et en mode spectroscopique. Applications au projet IRDIS de la deuxième génération d'instrument pour le VLT. Après un postdoc aux USA, A. Vigan a intégré le LAM comme CDD.

- **Enguerran Delavaquerie** (Dr. en 2010), en co-encadrement avec F. Cassaing (ONERA), sur « Analyse de front d'onde en plan focal : algorithmes analytiques pour miroirs segmentés ». Modélisations et méthodes matricielles de cophasage de grands télescopes composés de miroirs segmentés (ELT) en utilisant le plan focal et un plan proche de celui-ci. Pupilles redondantes et non-redondantes. Validations expérimentales sur banc multi-miroirs. A. Delavaquerie Liotard a accepté un poste à l'Aérospatiale.

## ■ RESPONSABILITE DE DIRECTION DU LABORATOIRE D' OPTIQUE - R&D (LOOM) (1975-2005)

### ■ LEADING RESPONSIBILITY OF THE OPTICAL LABORATORY – R&T (LOOM) (1975-2005)

En 1968, Ch. Fehrenbach nous a donné les moyens de créer un *laboratoire de surfacage optique* à l'Observatoire de Marseille, Place Le Verrier. En effet, de nombreuses optiques asphériques dont nous avons besoin à l'Observatoire de Haute Provence - et dans quelques autres instituts - étaient impossibles à obtenir dans l'industrie ou bien beaucoup trop onéreuses. Le Laboratoire d'Optique de l'Observatoire de Marseille (LOOM) a été dédié à l'exécution d'optiques astronomiques le plus difficiles.

La vocation du LOOM présente plusieurs aspects : i) *recherche et développement* pour mettre au point les *méthodes d'optique active*, tester des surfaces optiques dont la forme varie dynamiquement et corriger ainsi des aberrations variées, ii) *fabrication* pour la communauté française et internationale de pièces optiques issues des *méthodes d'optique active*, et éventuellement, iii) *fabrication* optiques par la méthode conventionnelle dite *des retouches locales*.

En 1969, G. Moreaux puis P. Montiel, opticiens surfaceurs de formation, sont venus se joindre à notre groupe, suivi en 1970 de R. Leblondet, ancien opticien du laboratoire Couder de l'Observatoire de Paris qui avait déjà réalisé plusieurs miroirs de télescopes. Utilisant la méthode des retouches locales, qui requiert un *art consommé* par son analogie

avec la sculpture, ils ont eu la patience de travailler souvent plus d'une année sur un même miroir. Utilisant les méthodes d'optique active pour la réalisation des lames correctrices correctrices et miroirs déformés, ils ont obtenu des optiques asphériques beaucoup plus rapidement, d'une *excellente précision* et de qualité reconnue. P. Lanzoni est venu compléter l'équipe dans les années 1990. Il est devenu expert dans le polissage des miroirs à courbure variable.

**J'ai consacré une grande partie de mon temps à mettre en oeuvre avec eux les méthodes d'optique active.** Après les bons résultats obtenus sur des dimensions modestes, j'ai conçu avec notre équipe une machine à surfacer dont la table de 1 mètre, montée sur un palier hydrostatique, ne se déforme pratiquement pas en rotation. La collaboration des Observatoires de Haute Provence et Lyon a permis de faire construire cette machine à l'Arsenal de Marine de Toulon. Les résultats furent excellents mais nous ne pouvions pas tailler d'optiques plus grandes que 1m de diamètre. J'ai ensuite obtenu de l'INAG le financement d'une machine permettant la parabolisation de miroir jusqu'à 2m de diamètre et d'un bâtiment pour son installation. Tout le laboratoire et plusieurs personnes de la Division Technique de l'INAG (devenue INSU) ont participé à son élaboration. Inspirée de la construction précédente, cette machine a été utilisée pour l'exécution du miroir primaire du télescope solaire Thémis (France-Italie) installé aux Canaries.

Au sein du laboratoire de surfacage j'ai eu la responsabilité de la réalisation de toutes les pièces optiques qui nous ont été demandées : environ 85 lames de Schmidt déformées par ma méthode active pour l'OHP, le LAS, l'Observatoire de Meudon, l'Université de Liège, la TCFH et l'astronomie spatiale, ces lames ayant des diamètres compris entre 4 et 30 cm ; une lame de Schmidt de 70 cm en remplacement de celle du Télescope Franco-Belge de l'OHP ; deux optiques complètes de Télescope Ritchey-Chrétien de 1 m pour l'OHP et le Gornergratt ; un miroir parabolique de 1,5 m pour le GI2T du CERGA ; une vingtaine de matrices actives plan-déformées pour des réseaux asphériques par Jobin-Yvon et Diffraction Products ; une quinzaine de matrices actives concaves pour des réseaux toriques par Hyperfine. Ces dernières ont servi de base d'évaluation pour l'instrument Spatial franco-soviétique Evris-Mars et ont fourni les réseaux haute résolution des spectrographes CDS et UVCS de la mission spatiale SOHO.

J'ai proposé une méthode de découpe par laser YAG afin de générer avec une précision de 2 à 3 microns les masques 2D dont nous avons besoin pour la spectroscopie multi-objet. Le Télescope CFH nous a confié ce développement pour le MOS. La nouvelle méthode informatisée, mise au point par notre équipe en collaboration avec Micro-Contrôle, est opérationnelle à Hawaii depuis 1990. LAMA donne toute satisfaction en *mode fentes rectilignes* aussi bien qu'en *mode fentes curvilignes*. Dans ce dernier cas la largeur des fentes est constante dans le sens de la dispersion spectrale.

L'INSU nous a confié la réalisation des optiques principales du Télescope Ritchey- Chrétien THEMIS et du miroir de 1 m du spectrographe associé. Cet instrument Franco-italien, dirigé à l'époque par J. Rayrole, est installé aux Canaries. Le miroir secondaire en *vase* a été taillé par la méthode d'optique active (en 2 exemplaires). A la demande de l'INSU nous avons procédé à la phase d'intégration opto-mécanique au LOOM en 1993-95.

J'ai élaboré des logiciels de passage de rayons pour l'instrumentation focale des télescopes, spectrographes et caméras utilisant des miroirs non axisymétriques et des *réseaux asphériques*. A l'époque, de tels logiciels n'existant pas, ceci m'a permis de calculer complètement de nouvelles combinaisons par réflexion et d'utiliser efficacement les possibilités de la méthode d'optique active. Plusieurs observatoires et instituts m'ont confié la responsabilité d'effectuer des calculs optiques et de développer la construction de réseaux asphériques avec l'industrie française et américaine. Je citerai parmi les principaux instruments : le spectrographe PEDISCOU utilisé au télescope de 1,5 m et au foyer Cassegrain du 2 m OHP; le spectrographe UV PRIME utilisé au foyer primaire du CFHT (découverte de Mg II en absorption dans le spectre d'un quasar) ; les spectrographes MARLY de l'OHP et de l'Observatoire de Nanjing (obtention de 2000 vitesses radiales en accompagnement du programme HIPPARCOS) ; le spectrographe Cassegrain CARELEC du 2m de l'OHP (visible et IR). Enfin avec le spectrographe-imageur ISARD du télescope de 2m Bernard Lyot du Pic du Midi (OMP), j'ai continué le développement de réseaux asphériques obtenus par *optique active*. Cet instrument, mis en service en 1992 et destiné à l'étude des objets faibles, est l'instrument principal du télescope B. Lyot.

J'ai pris une part active au sein des groupes de définition pour trois instruments que nous avons proposés comme réponses françaises aux appels d'offres VLT. Notre proposition '*Développement de miroirs à courbure variable (VCM)*' de 1990 pour le VLTI a été acceptée par ESO. Comme suite aux pré-études, ESO nous a confié, après plusieurs phases, la réalisation des VCM pour les huit lignes à retard. Les neuf VCM réalisés au LOOM ont été acceptés par l'ESO. Nous avons réalisé les électro-mécanismes de mise en charge et le contrôle électronique de la courbure selon les standards informatiques ESO. Les tests ont montré que l'informatique contrôle la courbure VCM avait une sensibilité de  $5.10^{-4}$ . Cette sensibilité est aussi celle du contrôle de position des pupilles de sortie au foyer recombinaison. Les deux premiers VCM ont été installés sur les huit *lignes à retard* du VLTI en 2003. Cinq autres ont suivis en 2005. Ces VCM sont totalement opérationnels au Chili depuis 2007. Quatre d'entre eux sont dédiés aux *Unit Telescopes* (UT) de 8 mètres; les quatre autres aux *Auxiliary Telescopes* de 2.5 mètres de diamètre.

- D'autres VCMs ont été demandés par ESO en 2005 pour les *Auxiliary Telescopes* du VLTI.
- A la demande de D. Mourard, un VCM a été exécuté et mis en service en 2000 au GI2T du CERGA.
- A la demande de A. Valentin et C. Camy-Peyret du LPMA, Univ. Jussieu -Paris VI, le GITF est équipé d'un VCM.

Dans une coopération franco-québécoise avec l'Université Laval, nous avons développé des miroirs actifs d'un type nouveau appelé *miroir en vase déformable multimode (VMDM)*, utilisable comme secondaire et tertiaire d'un

télescope à primaire liquide (LMT) pouvant travailler à quelques 10 ou 15° du zénith. Le prototype de 20cm de diamètre, comporte 12 bras périphériques de déformation. Il a subi avec succès une déformation astigmatique de 2mm de flèche tout en restant élastique. D'autres tests ont permis de vérifier la superposabilité des modes de déformation de Clebsch-Zernike.

Ces MDM ont intéressé l'Université de Boulder (Colorado) pour le nouveau *Cosmic origins spectrograph* (COS) qui devait être installé en 2004 à bord du *Hubble space telescope* (HST). Pour cela, deux nouveaux VMDM de 10cm ayant 6 bras radiaux ont été construits et testés avec succès pour l'enregistrement des réseaux de COS. Malheureusement, J.Green et le planning de la NASA n'ont pas permis de faire enregistrer ces réseaux qui devait apporter un gain de 2 magnitude en détection. Suite à l'accident tragique survenu aux cosmonautes de la navette Columbia en 2002, l'installation du spectrographe COS sur HST est actuellement reportée en 2008. Cependant, de tels MDM pourront servir ultérieurement comme compensateurs d'une *méthode universelle* d'enregistrement de réseaux holographiques corrigeant les aberrations.

En collaboration avec R. Viotti et al., IAS de Rome, nous avons obtenu le financement pour l'exécution en double des optiques du télescope MINISTRUST, 45cm d'ouverture,  $f/5$ , 1.5° de champ (anastigmat à *champ plan* ayant trois réflexions). La *forme double vase* du substrat commun aux miroirs primaire et au tertiaire, a été réalisée par commande numérique dans l'industrie. Tous ces miroirs ont été taillés au LOOM par polissage sphérique au repos. Leur hyperbolisation a été obtenue in-situ par dépression d'air. La *forme tulipe* du miroir secondaire a permis, après taille sous contrainte, l'hyperbolisation par relaxation élastique. La mécanique du télescope de type Serrurier a été conçue au LOOM et réalisée dans l'industrie. En 2004, les tests optiques des deux télescopes ont fourni la *limite de diffraction*.

En 2005 lorsque j'ai confié la direction à mon élève, Marc Ferrari, le LOOM comprenait 17 personnes : professeurs, chercheurs, post-docs, étudiants, ingénieurs et techniciens.

En 2013, **notre équipe est impliquée sur les thèmes suivants : optique astronomique, optique active et élasticité, optique adaptative, calcul optique, spectroscopie, haute résolution angulaire, coronographes, interférométrie, transformée de Fourier, micro-optiques intégrées, conception instrumentale, élaboration de logiciels et d'électroniques d'asservissement**

## ■ NOTE SUR MA RESPONSABILITE DE DIRECTION DU LOOM

### ■ PERSONAL NOTE AS LEADER OF LOOM

Au cours de mes 30 années de responsabilité du LOOM, je me suis efforcé de rassembler chercheurs, ingénieurs et techniciens afin de constituer une équipe de R&D en instrumentation astronomique. Nos compétences et notre efficacité ont été reconnues au niveau national et international. *Malgré les difficultés quelquefois importantes, le personnel du LOOM n'a cessé d'augmenter en nombre et en spécialités polyvalentes. Ce travail m'a demandé une importante disponibilité notamment pour obtenir des postes et des promotions.*

L'aspect recherche et développement a été parfois mal compris par certains de nos collègues qui ne sont pas instrumentalistes. En fait, cet aspect doit rester essentiel pour permettre un maximum de créativité. En retour notre laboratoire a concrétisé, pour la communauté française et internationale, l'élaboration d'instruments dont les performances sont reconnues, utilisant le plus souvent *de nouveaux concepts uniquement applicables par méthodes d'optique active.*

L'Astronomie Optique a encore beaucoup à attendre des développements instrumentaux. Nous ne pourrions plus gagner sur les détecteurs dont les rendements actuels sont proches de l'unité, tout au moins pour le visible. Il faut progresser avec les télescopes plus grands et une instrumentation plus transparente en s'appuyant sur *la segmentation des miroirs, les techniques de cophasage des segments, l'optique active, l'optique adaptative, les microcomposants optiques et les méthodes d'analyse de surface d'onde.*

**J'ai toujours souhaité que notre laboratoire d'optique reste présent dans ces développements relevant bien de notre spécificité. J'apprécie la reconnaissance de la communauté astronomique française et sa dotation en postes chercheurs qui m'a permis de créer et d'agrandir une école de R&D vouée à l'instrumentation astronomique.**

## ■ ACTIVITES INTER-DISCIPLINAIRE

### ■ MULTIDISCIPLINARY ACTIVITIES

• **Synchrotron ESRF, Grenoble – Miroirs déformables en incidence rasante – Rayons X et gamma**  
ESRF Synchrotron, Grenoble, France – **Grazing incidence deformable mirrors – X-ray and Gamma-ray**

Hors astronomie, à la demande de J. Goulon, responsable scientifique du "European Synchrotron Research Facilities" (ESRF) de Grenoble, **j'ai fait réaliser en 1992 un miroir déformable en incidence rasante** permettant la convergence optimale des faisceaux X et gamma de plusieurs expériences en sortie d'anneau. Utilisées sur une surface en

bande très allongée, les déformations actives du type astigmatisme [Ai 1] ont produit une *convergence de faisceau extrêmement efficace*. Consécutivement, ce type de miroir pour ESRF a été construit par l'industriel SESO.

• **Grand Interféromètre GIFT, Université Jussieu, Paris - Miroirs à courbure variable - Infrarouge**  
GIFT Large Interferometer, University Jussieu, Paris – Variable curvature mirrors – Infrared

Hors astronomie, j'ai été sollicité par A. Valentin pour un contrat R&D, concrétisé en 2002-2004, avec le Laboratoire de Physique Moléculaire et Applications (LPMA) (Univ. Jussieu, P.&M. Curie, Directeur C. Camy-Peyret) destiné à la réalisation et l'implantation d'un miroir à courbure variable (VCM) [Aa 3] sur le "Grand Interféromètre par Transformée de Fourier" (GIFT), interféromètre infrarouge à deux bras, *le plus grands au monde de ce type*. Nous avons construit un VCM pour cet instrument en 2005. **Il a fait gagner un facteur 100 en luminosité – ou étendue – à ce grand instrument de la physique infrarouge qui a été internationalement utilisé.**

■ EXPERTISE

■ EXPERTISE

**E1– Remise en Forme In-situ du Miroir Secondaire CFHT – Une première mondiale en optique active**

**E1– In-situ Reshaping of CFHT Secondary Mirror – A world premiere in active optics**

En 1982, le laboratoire d'optique de l'Observatoire de Victoria acheva le miroir Cassegrain du Télescope Canada-France-Hawaii, CFHT, qui fut installé sur le télescope. Après avoir procédé aux réglages utiles, **la position du foyer Cassegrain se trouvait 70cm plus bas que la position prévue**. Par suite d'une imprécision dans la calibration de la méthode de contrôle du miroir, *il était impossible* d'installer les instruments déjà construits et ceux en cours de construction. La question était posée par R. Racine : *'Devions-nous refaire le miroir ? ou bien réaliser un nouveau miroir ?'* Dans le premier cas, le foyer resterait inutilisé pendant deux ans. Réaliser un autre miroir aurait été encore plus long car nous n'avions pas de *blank* disponible (**Avec D=1,4m, c'est le plus grand mirror secondaire de tous les télescopes existants**).

Après avoir vérifié qu'il n'y aurait pas de risque de rupture, **j'ai proposé de déformer le miroir existant par un système de deux zones actives et concentriques appliquées sur le dos du miroir** [B 3]. Une pression d'air est appliquée par un "air-bag" sur la zone  $0 < r/r_{ext} < 1/2$ . La réaction est réalisée par d'un **vide partiel** appliqué sur la zone  $1/2 < r/r_{ext} < 1$ . Un **tube torique souple** – qui contient du mercure pour le supportage latéral – **ferme l'enceinte** par collage entre le bord du miroir et de son barillet. Quelque peu similaire à ma méthode à deux zones actives pour la taille des lames de Schmidt [Ap 1], ce système actif a été construit et installé par P. Bely et al.. Le système corrige le défaut d'asphéricité du miroir selon le mode *boucle ouverte*. Il se superpose au supportage dorsal par dépression d'air en fonction de la distance zénithale.

Cette "*solution élégante à un épineux problème*", dixit R. Racine, donne *toute satisfaction* depuis 1983.

**E2– Le Télescope Réflecteur de Schmidt Géant LAMOST (NAOC/Académie des Sciences de Chine)**

**E2 – The Giant Reflective Schmidt Telescope LAMOST (NAOC/Chinese Academy of sciences)**

*Lorsque les astronomes D.-q. Su et X. Cui ont adopté ma formule optique* [Aa 4] **pour la géométrie de leur télescope de Schmidt géant par réflexion**, the Large Sky Area Multi-Object Fibre Spectroscopic Telescope (LAMOST), ils m'ont invité régulièrement depuis 1995.

J'ai ensuite accepté de faire partie du *Comité International de Revue LAMOST* mis en place en 2005. Les autres astronomes de ce comité étaient R. Ellis (CALTECH Observatories, Pasadena), P. Gillingham (Télescopes Keck, Hawaii et AAT, Australie), R. Kron (Sloan Digital Sky Survey SDSS, Chicago), L. Noethe (ESO, Munich), L. Stepp (projet du 30m TMT, Californie), F. Watson (AAT, Australie) et D. York (SDSS, Chicago).

Lors de ces réunions à Nanjing et à Beijing, **j'ai rédigé les recommandations sur les optiques principales du télescope**. Nous avons transmis un document comprenant huit points de recommandations. Nous avons unanimement exprimé notre enthousiasme sur les buts scientifiques de LAMOST, sur les réussites techniques acquises, et avons suggéré un renforcement du management et surtout du budget. Le projet a été totalement financé en 2006.

J'ai rédigé plusieurs propositions pour une évolution de deuxième génération de spectrographes (résolution spectrale accrue de 1000 à 2000). A la demande de Y.-T. Zhu et al., **j'ai proposé et calculé un concept de spectrographe utilisant des réseaux plan-asphériques** [Aa 8] [Ap 13] permettant ainsi de gagner en luminosité par suppression des deux lames correctrices. Cette solution, qui n'a pu être retenue pour les 16 spectrographes doubles, nécessitait le développement de grands réseaux (20x30cm) mais présente aussi *l'avantage d'éliminer les images fantômes produites par rétro-réflexion* sur la lame correctrice.

Suite à l'inauguration en 2008 à la Station Xinglong, *ou j'ai eu l'honneur d'être invité*, le télescope est entré en phase de réglages fins et de calibrations. Depuis 2012, LAMOST construit le plus grand catalogue spectroscopique d'objets stellaires et des galaxies, ou « spectroscopic sky survey », jamais élaboré.

### **E3– Le projet Européen de Télescope Extrêmement Large - 39m – E-ELT (ESO)**

#### **E3– The 39m European Extremely Large Telescope project – E-ELT (ESO)**

En 2006, plusieurs concepts de télescopes extrêmement grands (ELTs) ont été étudiés, comparés et évalués par le Groupe conception optique d'experts internationaux constitué par ESO. Ces projets comprenaient notamment des options Cassegrain ou Gregory. **i)** Une avec miroir secondaire adaptatif de très grand diamètre (6m). **ii)** Une autre à cinq miroirs dont trois de puissance, M1, M2, M3 qui *forment la pupille de M1 entre deux plans* M4, M5, permettant d'effectuer une correction de dégradation atmosphérique sur une dimension plus favorable (2.7m). Le champ est limité par la diffraction sur 2-3arcmin à 500nm, sur 5arcmin à 2microns, et limité par la turbulence sur 10arcmin.

J'ai accepté l'invitation de C. Césarsky, DG de l'ESO, pour faire partie *du Comité international du WG-Optical-Design du projet ELT/ESO (2006-2008)*. Au cours de ces réunions, *j'ai fortement contribué à faire adopter le concept à 5 mirrors*. L'option à 5 miroirs a finalement été retenue. **J'ai montré dans deux Notes successives [B34][B35] qu'un miroir primaire M1 purement parabolique pouvait être obtenu par une légère asphéricité (600nm environ) du miroir pupillaire plan M4**, ceci en produisant une très légère dégradation de l'imagerie. Un primaire parabolique présente l'avantage de permettre une *meilleure précision absolue pour la métrologie des tests optiques* des ~1000 segments du projet E-ELT.

*J'ai été nommé membre du Comité Européen E-ELT Science & Engineering (ESE/ESO) (2009-2012) pour le développement du projet et la sélection prioritaire des instrumentations focales.*

### **■ RECHERCHES THEORIQUES RECENTES : ELASTICITE THEORY**

#### **■ RECENT THEORETICAL RESEARCH STUDY : ELASTICITY THEORY**

#### **• Développement de la théorie des plaques minces – Nouveaux résultats théoriques**

##### **Development of the thin shell theory – New theoretical results**

A partir de la théorie des plaques minces, communément admise (e.g. Timoshenko & Woinowsky-Krieger, *Theory of plates and shells*, McGraw-Hill (1959), *j'ai établi le système d'équation différentielles permettant de déterminer correctement les distributions de forces et moments dans le cas de déformations non-axisymétriques*.

La plupart *des conventions de signe données dans la littérature conduisent à des résultats erronés*. *J'ai énoncé une convention de signe permettant d'éviter ces erreurs*. Des vérifications à la fois expérimentales et par codes d'éléments finis ont confirmé ces résultats. **Ces développements théoriques ont été publiés en 2005 dans *Meccanica*, Springer [Ap 26]** et détaillés dans mon livre *Astronomical Optics and Elasticity Theory – Active Optics Methods*, Springer, p.176 et p.369 (2009).

#### **Elaboration de la théorie des coques faiblement coniques**

##### **Development of the weakly conical shell theory**

*J'ai élaboré la théorie de l'élasticité des coques tubulaires faiblement coniques. Celle-ci n'existait pas à ma connaissance*. A partir d'une coque axisymétrique cylindrique d'épaisseur faiblement variable et déformée par une charge uniforme appliquée sur toute la surface, *j'ai établi la loi simple suivante applicable dans le cas d'une coque faiblement conique : le produit flexion-épaisseur est une relation linéaire*. Ceci a été vérifié en calcul d'éléments finis *J'ai publié cette théorie en 2008 [Ac 23] et en détail dans *Astronomical Optics and Elasticity Theory – Active Optics Methods*, Springer Publ., Chap. 10 (2009) [AA 1]*

Cette théorie permet d'obtenir aisément des flexions dont la géométrie présente deux zones d'inflexion fournissant ainsi pour les télescopes en rayons X un couple de miroirs permettant de satisfaire *la condition des sinus* (aberration sphérique et coma annulées). *Ceci devrait faciliter la construction de grands télescopes en incidence rasante ayant une résolution angulaire bien supérieure à celle du Télescope Chandra* (NASA, lancé en 1999).

### **■ PROGRAMME DE RECHERCHE**

#### **■ RESEARCH PROGRAM**

#### **• Télescope anastigmat à champ plan de type Rumsey-modifié Lemaitre (coll. IAS-Frascati, Italie)**

##### **Flat-field anastigmat telescope in a modified-Rumsey form (coll. IAS-Frascati, Italy)**

Suite aux résultats obtenus avec le télescope MINI-TRUST [Ap 27], *je développe l'optique active pour un projet de télescope à trois réflexions de 2 à 3m d'ouverture pour des 'surveys' profonds de 1 à 2 degrés de champ nécessitant une haute résolution spatiale*. Les instruments 'survey' actuels (SDSS/USA, Megacam/CFHT) ou ceux en cours (MMT-reconverti /Arizona, VST/ESO), nécessitent l'emploi de correcteurs dioptriques à 3 ou 4 lentilles, soit avec les miroirs du

télescope (foyer primaire ou Cassegrain) un total de 7 à 10 surfaces optiques à exécuter pour un champ typique de  $1^\circ$ . Il est clair que ces systèmes sont très complexes et que leur chromatisme résiduel est une limitation très sérieuse dans les bandes U et V. Pour le spatial et pour des sites d'excellent seeing ( $0,6 \text{ arcsec}$ ), *j'ai montré qu'un **Rumsey-modifié*** – qui ne nécessite que la taille de 2 surfaces optiques sphériques, puisque M1 et M3 sont exécutés simultanément sur un *même substrat*, et M2 est obtenu par *stress polishing* – *donne une imagerie de qualité supérieure*.

Cette recherche consiste à *déterminer par synthèse optique-élasticité les conditions de continuité des pentes et des ordonnées permettant de résoudre l'hyperbolisation active simultanée du primaire M1 et du tertiaire M3 sur un même substrat*. Le secondaire M2 pourra être un miroir adaptatif.

Les paramètres déterminant les conditions d'application de l'asphérisation par optique active permettent la réalisation de télescopes de Rumsey-modifié de 2 à 3m d'ouverture et  $2^\circ$  de champ. Une demande de financement d'un projet de 2m d'ouverture et  $1,5^\circ$  de champ est en cours de préparation pour une demande au Programme Européen FP8. Le programme France-Italie concerné est ARENA, dirigé par N. Epstein, pour la Base Antarctique Concordia (Dome C).

• **Télescopes pour l'astronomie X – Haute résolution angulaire – Asphérisation par optique active**  
**X-ray telescopes for astronomy – High angular resolution – Aspherization by active optics**

Les méthodes d'optique active est applicable aux miroirs des télescopes rayons X qui utilisent des coques axisymétriques monolithiques ou segmentées. Les miroirs primaire et secondaire de ce type de télescope, en incidence rasante, ne sont pas toujours constitués d'un couple paraboloïde-hyperboloïde (eg. le Télescope Chandra de  $1''$  d'arc de résolution). D'autres télescopes utilisent un couple de miroirs sphéroïde-sphéroïde afin d'augmenter le champ au détriment de l'imagerie axiale. Mais, considérant l'ensemble des télescopes embarqués jusqu'ici, *il est clair qu'aucun d'eux ne satisfait la condition des sinus*.

*On sait que dans le concept ultime, corrigeant parfaitement un petit champ, le profil exact d'une combinaison à deux miroirs est celle de Chase-Vanspeybroeck*. Ces géométries présentent généralement deux zones d'inflexion pour chaque miroir et sont très difficiles à réaliser sans défauts zonaux de haute fréquence spatiale. *Par contre, ces profils peuvent aisément être obtenus par Optique Active*. La nouvelle génération de télescopes de l'astronomie X pourrait ainsi bénéficier de champs de ciel à très haute résolution angulaire.

*Suite aux résultats de ma théorie de l'élasticité des coques tubulaires faiblement coniques* (résumée brièvement plus haut), *et à la demande du directeur M. Weisskopf de l'Observatoire du Télescope Chandra et de S. O'Dell, j'ai accepté de donner une présentation de revue invitée pour la session Télescopes en astronomie X - Conférence SPIE de San Diego [Ai 11]*. En collaboration internationale, je compte entreprendre de nouvelles recherches dans ce domaine. Une partie de mes résultats est en cours de publication en 2013 [Ai 12].

• **Miroirs pupillaires de contour elliptique corrigeant les aberrations – Obtention par optique active**  
**Elliptical contour pupil mirrors correcting for optical aberrations – Active optics design**

Dans de nombreuses instrumentations focales, les faisceaux sont repliés par des miroirs plans. *Lorsqu'il est possible de projeter la pupille sur un tel miroir, il devient extrêmement intéressant de pouvoir corriger les aberrations du système sur ce miroir*. Ceci diminue le nombre de surfaces optiques et augmente la résolution spatiale dans le champ. Si la déviation introduite par le miroir correcteur - de contour elliptique - ne dépasse pas  $20\text{-}25^\circ$  on peut obtenir une excellente qualité de correction dans tout le champ de l'instrument.

En pratique, dans le cas d'une pupille circulaire projetée sur un miroir incliné, les solutions d'optique active corrigeant l'aberration sphérique par ou par conduit aux deux options de conception suivantes :

- a) *Aspheric –ou freeform– mirrors* obtenus par *stress mirror polishing* : on utilise **deux formes vases accolées et encastrées le long du contour elliptique commun** – ou **forme fermée de contour elliptique semi-encastré**. Les substrats en vitrocéramique Zerodur permettent de générer une surface biquadratique de symétrie elliptique par *simple charge uniforme et épaisseur constante de la zone active*. Elle a été développée pour le projet spacial **MESSIER**, un télescope anastigmat à trois miroirs –TMA– pour des observations dans les bandes UVOIR. Détecteur à champ courbe pour annuler la distorsion (D. Valls-Gabaud – IAP, G.R. Lemaitre et al.). [Ap37]
- b) *Aspheric –ou freeform– reflective gratings* obtenus par *réplication sur matrice active déformable* : on utilise **une matrice à contour intérieur elliptique rigidement encastré au bord**. Ces matrices métalliques permettent de générer une surface biquadratique de symétrie elliptique par *simple charge uniforme et épaisseur quasi-constante de la zone active*. Elle a été développée et appliquée avec succès pour le spectrographe ultraviolet MOS de **FIREBall-II** (Télescope de 1m LAM-CALTECH-CNES-NASA) lors du vol ballon de septembre 2018 à Fort Sumner (PIs : C. Martin - Caltech, B. Milliard - LAM). [Ap36]

Pour ces deux configurations, des solutions plus affinées ont permis de corriger également l'aberration sphérique du 5<sup>ème</sup>-ordre en substituant la zone optique d'épaisseur constante par une épaisseur légèrement diminuée du centre au bord.

#### ■ CONTRATS DE R&D (2002-2023) – MIROIRS A COURBURE VARIABLE (VCMs)

#### ■ R&D CONTRACTS (2016-2019) – VARIABLE CURVATURE MIRRORS (VCMs)

##### • Active optics variable curvature mirrors (VCMs) for field of view compensation -- Cycloid and Tulip forms

High angular resolution in astronomy requires long baseline interferometry. The VLT Interferometer (VLTI) is made of four 8m unit telescopes (UTs) arranged on fixe locations and four 2.2m auxiliary telescopes (ATs) arranged on discretely variable spacing locations. Due to Earth rotation, *on-axis optical-path equalizations* of the eight telescopes are realized by **delay lines**, in a long tunnel, where each **optical cat-eye system can translate on rails** along a 70m length. The beams are re-combined in a lab sideways near center of the delay-line tunnel. Technical and scientific fields of view are 5 and 3 arcsec respectively.

Translation carriage of each optical cat-eye system is made of a three-mirror 40cm telescope that retro-reflects the delay-line beam on a **variable curvature mirror (VCM)** located at the focal surface of each telescope carriage. Curvature control of VCMs provide *off-axis optical-path equalizations*, or in other terms, ensure a convenient location of **delay-line output pupils**.

In addition, due to setting change of ATs baseline geometry, each AT requires use of 2 VCMs for the location control of the **delay-line input pupil**. One needs a VCM for the object to study and another VCM for a reference star.

In summary, the total number of **VCMs** involves **16 units** (8 for the delay-lines and 8 for the ATs) and **12 units** spare.

I have been the inventor of VCMs by investigating elasticity theory that led to three different types that use variable thickness mirrors with a combination of two external loads as follows : uniform load, outer-edge ring force, central axial force. One then obtained **VCMs geometrical configurations** that I called **cycloid-like forms and tulip forms**.

The following contracts were performed between LAM (formerly LOOM) - Aix-Marseille-Universite AMU (formerly Univ. de Provence) and the Universite de Paris Jussieu at LPMA, and also between LAM-AMU and European Southern Observatory (ESO) under a decision from **Jacques Beckers**, head of the interferometric ESO-VLTI division in 2001. The purpose was - and still is - to build and calibrated **cycloid-like form VCMs** in agreement to ESO specifications. Here are contracts that have been carried out.

-- Commissioning by LPMA/LOOM of a VCM for the Large Fourier-Transform Interferometer at Jussieu, Paris (2004).

-- Commissioning by ESO of 5 VCMs built by LOOM for the VLT Interferometer at Mt Paranal (2002-2006).

-- Commissioning by ESO of 5 VCMs built by LOOM for the VLT Interferometer at Mt Paranal (2007-2010).

-- Commissioning by ESO of 5 VCMs built by LAM for the VLT Interferometer at Mt Paranal (2011-2014).

-- Commissioning by ESO of 5 VCMs built by LAM for the VLT Interferometer at Mt Paranal (2014-2017).

-- Commissioning by ESO of **10 VCMs** built by LAM for the VLT Interferometer at Mt Paranal (2019-2023). Final Reports to ESO have been accepted for **6 VCMs**. The **4 next VCMs** are under fabrication at LAM **should be deliver to ESO by the end of 2023**.

LAM responsible team : G. Lemaitre and P. Lanzoni.

#### ■ PROGRAMME DE RECHERCHE (2022-2027)

#### ■ RESEARCH PROGRAM (2016 -2023)

##### • Multi Object Spectrograph of the FIREBall Balloon Experiment -- Free-from aspherized diffraction grating

-- FIREBall, which stands for Faint Intergalactic Redshifted Emission Balloon, is a NASA/CNES instrument that includes a steerable two-mirror telescope with a Multi-Object Spectrograph (MOS) is to study faint diffuse emissions of galaxies at ultraviolet wavelenghtes centered at  $\lambda = 200$  nm. The MOS is based on two identical reflective Schmidt systems sharing a **plane-aspheric grating obtained by active optics methods**. The active optics aspherization of the reflective diffraction

grating is achieved from **replication technique of a deformable matrix**. Its non-rotational symmetry shape or free-form allows delivering an elliptic symmetry to the grating. This technique is a **new invention** over the world:

- **G. R. Lemaitre** et al., Invited Review Paper, Optical Society of America, OSA Proc. Conf. OF&T, Hawaii (2014)
- **G. R. Lemaitre**, Journal of the Mechanical Behavior of Materials JMBM, De Gruyter Publ., pp. 1-16 (2018)  
<https://doi.org/10.1515/jmbm-2018-2008>

The first launch of FIREBall has been operated with success at Fort Sumner on **Sept. 5th, 2019** (New Mexico State, USA). Preliminary results of spectral data reductions are under process.

**A next launch is scheduled on mid-2023 with the same instrument**. Some upgrading will be proceeded before the launch, noticeably the alignments of the MOS mirrors and free-form elliptic symmetry grating.

FIREBall's Co-PI is Bruno Milliard (LAM).

### • **CASTLE-MESSIER wide-field broad-band three-mirror telescope on curved field of view -- Free-form aspheric mirror**

MESSIER – which becomes CASTLE – is an experiment proposal named in honor to French astronomer Charles Messier who started compiling in 1774 his famous Messier Catalogue of diffuse non-cometary objects. This proposal is dedicated to **the detection of extremely low surface brightness objects** that should reach detections as low as 32 magnitude/arcsec<sup>2</sup> in the optical range and 37 magnitude/arcsec<sup>2</sup> in the UV ( $\lambda=200$  nm).

The main features of the telescope proposal require a particular all-reflective optical design as follows,

- 1- a wide field anastigmat telescope with fast f-ratio, such as f/2.5,
- 2- a broad spectral coverage from ultraviolet to infrared in five bands  $\lambda\lambda$  [200 – 1500 nm],
- 3- a curved-field detector as from new technology,
- 4- a distortion-free field of view at least in one direction,
- 5- an optimal time delay integration by use of drift-scan techniques,
- 6- no diffractive spider placed inside the telescope optical train.

Result of my investigations is a **three-mirror folded Schmidt telescope** which provides all above features. This proposed telescope is made of a non-axisymmetric aspheric mirror **M1**, a holed flat mirror **M2**, and a concave spherical mirror **M3** where the focal surface is located outside the hole of M2 mirror. **Mirror M1 is most difficult mirror to obtain**. The best alternative for M1 is to develop active optics techniques that provide high imaging quality because of the high smoothness surface continuity.

The free-form surface of M1 mirror is geometrically defined by homothetic elliptic iso-level lines and is obtained from a single uniform load - as air pressure - that acts over the surface of a **closed substrate made of two opposite vase-forms (Lemaitre)** whilst under axial reaction to its elliptical perimeter ring during spherical polishing. Control of its inner load intensity provides the adjustment of elastic deformation aspheric sag.

Our space project proposal is a telescope 36cm aperture, f/2.5, with 1.6° x 2.6° field of view. The design naturally provides a curved field detector and also allowing null distortion aberration for drift-scan observations. The **freeform mirror is generated by spherical stress polishing (Lemaitre)** that provides super-polished freeform surfaces after elastic relaxation. Preliminary analysis required use of the optics theory of 3rd-order aberrations and elasticity theory of thin elliptical plates. Final cross-optimizations were carried out with Zemax raytracing code and Nastran FEA elasticity code in order to determine the complete geometry of a glass ceramic Zerodur deformable substrate.

Le concept de télescope grand champ pour le projet spatial CASTLE (anciennement MESSIER) utilise un **miroir M1 asphérique free-forme à symétrie elliptique** dans une combinaison optique toute réflexion du type Schmidt. Proposition d'un **substrat déformable en double vase** pour ce miroir asphérisable sous contrainte par optique active (Coll. LAM – CNES – SITP Shanghai, Chine).

J'ai dirigé et pris en charge sur mon contrat ESO-AMU la construction des **deux substrats en vases** par l'Institut SITP de Shanghai de l'Académie des sciences de Chine (CAS). Ces substrats ont été livré en 2021 et acceptés par le LAM.

L'assemblage des deux substrats en vitro-céramique (type Zerodur) et le **polissage sous contrainte au LAM** devrait être effectué à **partir de 2023** par le service optique du LAM.

4 publications MESSIER – CASTLE, dont trois comme premier auteur (2016-2017-2018)

## PUBLICATIONS AND PATENTS

### REFEREED PAPERS

- Ap 1 New procedure for making Schmidt corrector plates  
G. Lemaître  
Applied Optics, 11, N° 7, p. 1630 (1972)
- Ap 2 New procedure for making Schmidt corrector plates  
G. Lemaître  
Applied Optics, 11, N° 10, p. 2264 (1972)
- Ap 3 Optique astronomique et élasticité  
G. Lemaître  
These de doctorat d'état es sciences physiques, Université de Provence Aix-Marseille I (1974)  
<https://odyssee.univ-amu.fr/exhibits/show/sciences-techniques/sciences-astronomie>
- Ap 4 Compensation des aberrations par élasticité  
G. Lemaître  
Nouvelle Revue d'Optique, 5, N° 6, p. 361 (1974)
- Ap 5 Asphérisation par élasticité d'une lame de 50 cm pour le télescope de Schmidt de l'Observatoire de Lyon  
G. Lemaître  
Astron. Astrophys. 44, N° 2, p. 305 (1975)
- Ap 6 Sur la flexion de miroirs secondaires de télescopes de formes variées  
G. Lemaître  
Nouvelle Revue d'Optique, 7, N° 6, p. 389 (1976)
- Ap 7 Reflective Schmidt anastigmat telescopes and pseudo-flat [mirror] made by elasticity  
Jour. Opt. Soc. America, 66, N° 12, p. 1334 (1976)
- Ap 8 Spectrographic development of diffraction gratings aspherized by elastic relaxation  
G. Lemaître, J. Flamand  
Astron. Astrophys. 59, N° 2, p. 249 (1977)
- Ap 9 Toroidal grating obtained on an elastic substrate  
M.C.E. Huber, E. Jannitti, G. Lemaître, G. Tondello  
Applied Optics, 20, N°12, p. 2139 (1981)
- Ap 10 Combinaisons optiques à réseaux asphériques : Le spectrographe UV PRIME Focus [at CFHT]  
G. Lemaître  
Astron. Astrophys. Letter, 103, N° 2, L -p.14 (1981)
- Ap11 Le Témis 4. Une solution française au problème du télescope mosaïque  
A. Baranne, G. Lemaître  
Optica Acta, 29, N° 6, p. 847 (1982)
- Ap12 A UV Prime focus spectrograph for the CFHT  
O. Boulade, B. Di Biagio, G. Lemaître, P. Montiel, D. Revest, Y. Rio, O. Testard, L. Vigroux

Astron. Astrophys., 163, p. 301 (1986)

- Ap13 The TEMOS Concept: A segmented telescope with active optics secondary mirror  
G. Lemaître, A. Baranne  
Mitteilungen der Astronomischen Gesellschaft, 67, p. 156 (1986)
- Ap14 Imaging extreme ultraviolet spectrometer employing a single toroidal diffraction grating: The initial evaluation  
M.C.E. Huber, J.G. Timothy, J.S. Morgan, G. Lemaître, G. Tondello, E. Janitti, P. Scarin  
Applied Optics, 27- 16, p. 3503 (1988)
- Ap15 All reflective aspherized grating spectrographs for the Haute-Provence and Nanjing Observatories : MARLYs and CARELEC  
G. Lemaître, D. Kohler, D. Lacroix, J.P. Meunier, A. Vin  
Astron. Astrophys. 228, p. 546 (1990)
- Ap16 Diffraction-limited toroid mirrors aspherized by active optics and inextensional deflection of drum-like forms  
M. Wang, G. Lemaître  
Astron. Astrophys. 240, p. 551 (1990)
- Ap17 Active optics and deformed toroid concave gratings: Higher order aspherizations  
M. Wang, G. Lemaître  
Astron. Astrophys., 271, p. 365 (1993)
- Ap18 Analysis of large deflection varying curvature mirrors for the ESO Very Large Telescope Interferometer  
M. Ferrari, G. Lemaître  
Astron. & Astrophys., 274, p. 12 (1993)
- Ap19 A simple active corrector for liquid mirror telescopes observing at large zenith angles  
M. Wang, G. Moretto, E.F. Borra, G. Lemaître  
Astron. & Astrophys. 285, p. 344 (1994)
- Ap20 Active mirrors warped using Zernike polynomials for correcting off-axis aberrations of fixed primary mirrors – I. Theory and elasticity design  
G.R. Lemaître, M. Wang.  
Astron. & Astrophys. Suppl. Ser. 114, p. 373 (1995)
- Ap21 Active mirrors warped using Zernike polynomials for correcting off-axis aberrations of fixed primary mirrors – II. Optical testing and performance evaluation  
G. Moretto, G.R. Lemaître, T. Bactivelane, M. Wang, M. Ferrari, S. Mazzanti, B. Dibiagio, E.F. Borra.  
Astron. & Astrophys. Suppl. Ser. 114, p. 379 (1995)
- Ap22 Equal curvature and equal constraint cantilevers : Extensions of Euler and Clebsch formulas  
Meccanica (Springer-Verlag), 32, p. 493 (1997)
- Ap23 A general method of holographic grating recording with a null-powered multimode deformable mirror : the case of the Cosmic Origins Spectrograph for HST 2002  
G.R. Lemaître, M. Duban  
Astron. & Astrophys. 339, Letter p. 89 (1998)
- Ap24 Recording method for obtaining high-resolution holographic gratings through use of multimode deformable plane mirrors  
M. Duban, G.R. Lemaître, R. Malina  
Applied Optics, 37, p. 3438 (1998)
- Ap25 Illustration of the use of multimode deformable plane mirrors to record high-resolution concave gratings : results for the Cosmic Origins Spectrograph gratings of the Hubble Space Telescope  
M. Duban, K. Dohlen, G.R. Lemaître  
Applied Optics, 37, p. 7214 (1998)
- Ap26 Universal method for holographic grating recording : Multimode deformable mirrors generating Clebsch-Zernike polynomials  
G.R. Lemaître, M. Duban  
Applied Optics, 40, p. 461 (2001)
- Ap27 Active optics : Vase or meniscus multimode mirrors and degenerated monomode configurations

Meccanica (Springer-Verlag), 40, No.3, pp. 233-249 (2005)

- Ap28 Active optics and modified-Rumsey wide-field telescopes : MINITRUST demonstrators with vase- and tulip-form mirrors  
G.R. Lemaître, P. Montiel, P. Joulie, K. Dohlen, P. Lanzoni,  
Applied Optics, 44, No.34, pp. 7322-7332 (2005)
- Ap29 Active optics: single actuator principle and angular thickness distribution for astigmatism compensation by elasticity  
E. Hugot, G.R. Lemaître, M. Ferrari,  
Applied Optics, 47, NO 10, pp. 1401-1409 (2008)
- Ap30 Active Optics : stress polishing of toric mirrors for the VLT SPHERE adaptive optics system  
E. Hugot, M. Ferrari, K. El Hadi, P. Vola, J.-L. Vola, G.R. Lemaître, P. Rabou, K. Dohlen, P. Puget, J.-L. Beuzit,  
Applied Optics, 48, No 15, pp. 2932-2941 (2009)
- Ap31 Active optics for high dynamic variable curvature mirrors  
E. Hugot, M. Ferrari, G.R. Lemaître, F. Madec, S. Vives, D. Le Mignant, J.-G. Cuby,  
Optics Letters, Optical Soc.of America, Vol. 34, Issue 19, pp. 3009-3011 (2009)
- Ap32 Stress polishing of thin shells for adaptive secondary mirror – Application to the Very Large Telescope deformable secondary  
E. Hugot, M. Ferrari, A. Riccardi, M. Xompero, R.R. Lemaître, R. Arsenault, N. Hubin  
Astron.& Astrophys, Vol. 527 (2010)
- Ap33 Optical Design and Active Optics Methods in Astronomy  
G.R. Lemaître  
Optical Review, Vol. 20, No. 2, 103-117 (2013)
- Ap34 Active Optics with a Minimum Number of Actuators  
G.R. Lemaître  
Advanced Optical Technology – Special Issue on Astronomical Optics, De Gruyter edit.  
Vol. 3-3, pp 223-249 (2014)
- Ap35 Elasticity Theory of Thin Plates and Active Optics. Solutions for Generating Toroid Surfaces with Vase Forms  
G.R. Lemaître  
Appl. Math. & Math. Phys., Springer, Vol.1, No1, pp 77-100 (2015)
- Ap36 Fast, wide-field and distortion-free telescope with curved detectors for surveys at ultralow surface brightness  
E. Muslimov, D. Valls-Gabaud, G. R. Lemaître, E. Hugot, W. Jahn, S. Lombardo, Xin Wang, P. Vola, and M. Ferrari  
Applied Optics, OSA publ., Vol. 56, Issue 31, pp. 8639-8647 (2017)  
<https://doi.org/10.1364/AO.56.008639>
- Ap37 Active optics in astronomy – Modeling of deformable substrates: freeform surfaces for FIREBall and MESSIER  
G.R. Lemaître  
Journal of the Mechanical Behavior of Materials, De Gruyter Publ., pp. 1-16 (2018)  
<https://doi.org/10.1515/jmbm-2018-2008>
- Ap38 Active optics in astronomy – Freeform mirror for the MESSIER telescope proposal  
G.R. Lemaître, P. Vola, E. Muslimov  
Journal of Mathematical and Computational Applications – MCA, MDPI Publ., 24(1), 2 (2019)  
<https://doi.org/10.3390/mca24010002>
- Ap39 A next-generation telescope with curved focal plane for ultra-low surface brightness survey  
S. Lombardo, E. Muslimov, G.R. Lemaître, E. Hugo  
MNRAS, 488, pp. 5057-5064 (2019)  
<https://doi.org/10.1093/mnras/stz2068>  
HAL Id: hal-0226334

- Ap40 Comments on “Suggested quasi- Cassegrain system for multi-beam observation of FAST”  
G. R. Lemaître  
RAA News and Views, 20, No. 1, 1 (2020)  
Communication related to <https://doi.org/10.1088/1674-4527/20/1/1>
- Ap41 Active Optics – Advances of Cycloid-like Variable Curvature Mirrors for the VLTI Array  
G. R. Lemaître, P. Vola, P. Lanzoni, S. Mazzanti, F. J. Dérie, F. Y. Gonté  
MDPI Photonics - Special Issue on Active Optics, 9, 66-89 (2022)  
<https://doi.org/10.3390/photonics9020066>  
[https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-03943633v1\\*](https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-03943633v1)
- Ap41 Active Optics – Freeform Segment Mirror Replications from a Deformable Matrix  
G. R. Lemaître, P. Lanzoni  
MDPI Photonics - Special Issue on Active Optics, 9(4), 206-215 (2022)  
<https://doi.org/10.3390/photonics9040206>  
<https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-03956346>
- Ap42 Active Optics - Progress in Modeling of Tulip-like VCMs  
G. R. Lemaître, P. Vola, P. Lanzoni  
MDPI Optics, 4, 39–54 (2023)  
<https://doi.org/10.3390/opt4010004>  
<https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-03956444>

#### PAPERS IN COMPTES RENDUS OF THE ACADEMIE DES SCIENCES - PARIS

- Aa 1 Sur les dioptries asphériques de révolution en optique astronomique  
Comptes Rendus Acad. Sci. Paris, 270 Série A, p. 266 (1970)
- Aa 2 Sur les dioptries asphériques en optique astronomique  
CR Acad. Sci. Paris, 276 Série B, p. 145 (1973)
- Aa 3 Elasticité et miroirs à focale variable  
CR Acad. Sci. Paris, 282 Série B, p. 87 (1976)
- Aa 4 Sur la résolution des télescopes de Schmidt de type catoptrique  
CR Acad. Sci. Paris, 288 Série B, p. 297 (1979)
- Aa 5 Asphérisation par relaxation élastique de miroirs astronomiques dont le contour circulaire ou elliptique est encastré ou semi-encastré  
CR Acad. Sci. Paris, 290 Série B, p. 171 (1980)
- Aa 6 Combinaisons optiques pour des grands télescopes spécialisés  
A. Baranne, G.R. Lemaître  
CR Acad. Sci. Paris, 291 Série B, p. 39 (1980)
- Aa 7 Combinaison optique pour les très grands télescopes : le concept TEMOS  
A. Baranne, G.R. Lemaître  
CR Acad. Sci. Paris, 305 Série II, p. 445 (1987)
- Aa 8 Spectrographes à réseaux asphériques par réflexion : Les spectrographes MARLY des Observatoires de Haute Provence et de Nanjing  
G.R. Lemaître, D. Kohler  
CR Acad. Sci. Paris, N° 308 Série II, p. 381 (1989)

#### INVITED PAPERS AND INVITED REVIEWS IN INTERNATIONAL CONFERENCES

- Ai 1 Coma and astigmatism compensated by elastic relaxation on segmented mirrors of a large telescope

*Invited Paper* by European Southern Observatory,  
Proc. ESO/CERN Conf. on *Optical Telescopes of the Future*, Genève, Switzerland, p. 321 (1977)

- Ai 2 Elastic relaxation figuring for mass production of paraboloid mirrors  
*Invited Paper* by Steward Observatory, Tucson-USA  
Proc. KPNO Conf. on *Optical and Infrared Telescopes for the 1990's*, Tucson, USA, p. 896 (1980)
- Ai 3 Active Optics and Elastic Relaxation Methods  
*Invited Review Paper* by the International Commission for Optics, 12<sup>th</sup> ICO Symposium 1980, Graz, Austria,  
in book entitled: *Current Trends in Optics*, F.T. Arrecchi and F.R. Aussenegg ed., Francis & Taylor publ., London, p. 135 (1981)
- Ai 4 Ground based development with the Schmidt concept  
*Invited Review Paper* by the International Astronomical Union, IAU Colloquium 78, Asiago, Italia, in book entitled: *Astronomy with Schmidt Type Telescopes*, M. Capaccioli ed., Reidel publ. Co., Dordrecht-Holland, p. 533 (1984)
- Ai 5 Optique active et miroirs à focale variable  
*Invited Review Paper* by OPTO, in Internat. Conf. on *Optical System Design*, Paris, ESI Publ., p. 51 (1987)
- Ai 6 Various Aspects of Active Optics  
*Invited Review Paper* by the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers - SPIE, Orlando, USA, 1988,  
in *Active Telescope Systems*, SPIE Proc., 1114, p. 328 (1989)
- Ai 7 Proposal for metal mirrors of meniscus shape at once actively aspherized and actively supported  
G.R. Lemaître, R.N. Wilson  
*Invited Paper* by The Univ. College of London, UK, on *Metal Mirrors*, 1991, London, Proc. SPIE Conf., 1931, p. 66 (1992)
- Ai 8 Active Optics: Aberration correction with multimode deformable mirrors  
*Invited Review Paper* by the University of Saint Petersburg, Russia, Symposium on *Laser Optics 2003 – Wavefront Transformation and Laser Beam Control*, Proc. SPIE Conf., 5481, p. 70-81 (2004)
- Ai 9 TRSS: A three reflection sky survey at Dome-C with an active optics modified-Rumsey telescope  
*Invited Paper* by the Nat. Inst. Astron. Opt. & Techn. of Nanjing on *Wide Field Survey Telescope on Dome-C*, 2005, Beijing, Chinese Acad. Sc., Acta Astronomica Sinica, 1354, p. 62-71 (2006)
- Ai 10 Note-1: E-ELT 5-mirror option with M1 paraboloid,  
LAM report GL to the Optical Design Working Group (WG4) and to the ESE Committee, ESO (2006)
- Ai 11 Note-2: E-ELT 5-mirror option with M1 paraboloid,  
LAM report GL to the Optical Design Working Group (WG4) and to the ESE Committee, ESO (2006)
- Ai12 Review on Active Optics Methods : What can we do by elastic bending ?  
*Invited Review paper* by the AOMATT 2010 Committee, Conf. on *Advanced Optical Manufacturing Technologies*, Dalian, China, SPIE Proc. 7655, 0A-1 (2010)
- Ai13 Review on Active Optics Methods in astronomy from X-rays to the infrared  
*Invited Review Paper* by conference chair Committee on *Adaptive X-ray Optics*, SPIE Conf. on *Optics and Photonics*, San Diego, USA, SPIE Proc. 7803, M7803, 0B-1 (2010)
- Ai14 Optical Design and Active Optics Methods in Astronomy  
*Invited Review Paper* by conference chair Committee ODF'12 - St Petersburg, published by the Optical Society of Japan in *Optical Review*, 20, No. 2, 103-117 (2013)
- Ai15 Multi Object Spectrograph of the Fireball-II Balloon Experiment  
G. R. Lemaître, R. Grange, S. Quiret, B. Milliard, S. Pascal, V. Lamandé  
*Invited Review Paper* by the Optical Society of America, OSA Proc. Conf. on *Optical Fabrication and Testing (OF&T)*, Hawaii (2014)

#### PATENTS ON ACTIVE OPTICS – SINGLE AUTHOR

---

Country	Registration #	Date	Patent Number	Submitted Date
---------	----------------	------	---------------	----------------

---

Aspherization of Schmidt Plates by Active Optics Method – Plane Surfacing Method :

Ab 1	France	70119261 du	27-05-1970	FR 2 097 216	03-03-1972
Ab 2	RFA	64738/70 du	23-07-1970	DE 2 036 598	09-12-1971
Ab 3	USA	107680 du	19-01-1971	US 3 693 301	26-09-1972
Ab 4	Japon	P20365984 du	25-07-1970	JP 5 0007597 ?	25-01-1974 ?

Aspherization of Mirrors by Active Optics Method – Aberration Corrected Mirrors :

Ab 5	France	7233285 du	20-09-1972	FR 2 199 674	12-04-1974
------	--------	------------	------------	--------------	------------

Variable Curvature Mirrors Generated by Active Optics -- Diffraction Limited Optics :

Ab 6	France	7607577 du	05-03-1976	FR 2 343 262	30-09-1977
Ab 7	USA	746792 du	02-12-1976	US 4 119 366	10-10-1978

Apherization of Mirrors and Diffraction Gratings – Active Vase Forms :

Ab 8	France	7931632 du	20-12-1979	FR 2 472 198	26-06-1981
Ab 9	USA	217440 du	17-12-1980	US 4 382 657	10-05-1983

---

PATENTS ON ACTIVE OPTICS – CO-AUTHOR

---

Country	Registration #	Date	Patent Number	Submitted Date
---------	----------------	------	---------------	----------------

---

Method of Shaping an Aspherical Optical Element – Segmented Telescope Mirrors  
/ Procédé de Façonnage d'un élément optique asphérique  
M. Ferrari (LAM), G. Lemaitre (LAM), E. Hugot (LAM), C. de Mollerat du Jeu (SESO)

Ab10	USA	12/486393 du	17-06-2009	US 2009/315202 0 A1	24-12-2009
Ab11	Europe	09290455 du	16-06-2009	EP 2 144 093 A1	13-01-2010

Procédé de fabrication d'un élément optique déformé élastiquement par une bague collée.  
/ Method of shaping an optical element that is elastically deformed by an adhesively-bonded ring  
M. Ferrari (LAM), G. Lemaitre (LAM), E. Hugot (LAM), C. de Mollerat du Jeu (SESO)

Ab12	USA	US 13-892739 du	13-05-2013	US 2013-0306224	21-11-2013
Ab13	Europe	EP13-0166700 du	06-05-2013	EP 2 664 415 A1	20-11-2013

---

BOOK

AA 1 « **Astronomical Optics and Elasticity Theory – Active Optics Methods** » 10 chapters, 596 pages, 240 figures, published by Springer, Heidelberg-Berlin-New-York, Astronomy and Astrophysics Library (2009)

<http://www.springer.com/astronomy/book/978-3-540-68904-1?changeHeader> [ISBN 978-3-540-68905-8](https://www.isbn-international.org/number/9783540689058)

This treatise on *Active Optics Methods* describes the various developments of the concept since the origins, in the 1960's, up to the important development of the Giant Reflective Schmidt LAMOST, a segmented telescope built by China, whose best optical form to give to the primary mirror was established by the author.

*Astronomical Optics and Elasticity Theory* provides a very thorough and comprehensive account of what is known in this field. After an extensive introduction to optics and elasticity, the book discusses variable curvature, single mode and multimode deformable mirrors, as well as, in depth, active optics, its theory and applications. Further, optical design utilizing the Schmidt concept and various types of Schmidt correctors, as well as the elasticity theory and the aspherization of thin lenses, plates and shells are elaborated upon. Several *Active Optics Methods* are developed for obtaining aberration corrected diffraction gratings. Further, a weakly conical shell theory of elasticity is elaborated for the aspherization of grazing incidence telescope mirrors.

The very didactic and fairly easy-to-read presentation of the topic will enable PhD students and young researchers to actively participate in challenging astronomical optics and instrumentation projects.

**Keywords** » Active Optics Methods - Aspherized Gratings - Aspherized Lenses - Aspherized Plates - Cycloid Forms - Deformable Mirrors - Elasticity Theory - Multimode Deformable Mirrors - Optical Aberrations - Optical Design - Single Mode Deformable Mirrors - Telescope Mirrors - Telescope Optics - Tulip Forms - Variable Curvature Mirrors - Vase Forms - X-Ray Telescopes - Zoom Mirrors

## MONOGRAPHIE

AA2 « **Optical Mirrors** » , 26 pages, published by Wiley & Sons in *The Optical Encyclopedia* (2016)

## PAPERS 1<sup>ST</sup> AUTHOR IN INTERNATIONAL CONFERENCES

- Ac 1 La taille de lames déformées élastiquement  
International Commission for Optics 8th Conf. - ICO 8, Reading, UK, Proc. in book entitled: *Optical Instruments and Technique*, Home Dickson publ., London, p. 310 (1969)
- Ac 2 Optique astronomique et élasticité  
Thèse de Doctorat d'Etat - Université de Provence - Aix-Marseille I (1974)
- Ac 3 Optical figuring by elastic relaxation methods,  
International Commission for Optics ICO 12, Taylor & Francis publ., London, p. 135-146 (1981)
- Ac 4 Un spectrographe à réseau asphérique pour télescope f/4  
Proc. IAU Colloquium 67, Zelenchuk, Russia, in book entitled in *Instrumentation for astronomy with large telescopes*, Reidel publ. Co., Dordrecht-Holland, p. 137 (1982)
- Ac 5 A space Schmidt project for the 1990's ?  
Proc. IAU Coll. 78, Asiago, Italia, in book entitled *Astronomy with Schmidt type telescopes*, Reidel publ. Co., Dordrecht-Holland, p.541 (1984)
- Ac 6 All-reflective aspherized grating spectrographs at the prime focus of the CFHT  
G.R. Lemaitre et L. Vigroux,  
in book entitled *Instrumentation for Ground-Based Optical Astronomy*, Springer-Verlag ed., New York, p.275 (1987)
- Ac 7 The LOOM proposal : Variable asphericity secondary mirrors and vase-like forms  
Proc. *Workshop on Large Telescopes*, Hamburg, Germany, p. 236 (1987)
- Ac 8 The fabrication of toroidal and coma-corrected toroidal diffraction gratings from spherical master gratings using elastically-deformable substrates  
G.R. Lemaitre, M.C.E. Huber, J.G. Timothy, J.S. Morgan, G. Tondello, G. Naletto  
Conf. on *Space Astronomical Telescopes and Instruments*, Orlando, Proc. SPIE p.1494 (1991)
- Ac 9 Off-Axis Mirrors Aspherized by Active Optics  
International Workshop on *Mirror Substrate Alternatives*, Grasse, France, CNRS Publ., p.217 (1995)
- Ac10 Optical Results with TEMOS 4: A 1.4 meter telescope designed with a primary mirror of spherical segments and a metal secondary mirror actively aspherized  
G.R. Lemaitre, M. Wang  
Conf. at University College London Conf. on *Metal Mirrors*, London, UK, Proc SPIE 1931, p. 43-52 (1992)

- Ac11 Modified Rumsey telescope and associated elasticity design for active aspherization  
ESO Conf. on *Telescopes of Today and Tomorrow*, Landskrona, Suede, Proc. SPIE 2871, p.436 (1996)
- Ac12 Ground based and orbital off-axis aspherized grating imager-spectrographs : ISARD-OMP and OSIRIS-ODIN  
G.R. Lemaître, E. H. Richardson  
Conference on *Optical Astronomical Instrumentation*, Kona, HI, Proc. SPIE 3355, p 682 (1998)
- Ac13 A diffraction limited 8-20 m telescope with an active and adaptive tertiary  
Conference on *Advanced Technology Optical/IR Telescopes*, Kona, HI, Proc. SPIE 3352, p766-777 (1998)
- Ac14 Tulip form variable curvature mirrors : Interferometry and Field Compensation  
G.R. Lemaître, S. Mazzanti, M. Ferrari  
Conference on *Astronomical Interferometry*, Kona, HI, Proc. SPIE 3350, p.373 (1998)
- Ac15 Multi-object spectroscopy in space  
D. Burgarella, K. Dohlen, V. Buat, G. Lemaître, A. Perez  
in *Space Telescopes and Instruments V*, Kona, HI, Proc. SPIE, 3356, p.176 (1998)
- Ac16 Actively aspherized pupil mirrors for ELTs  
Proc. of Lund Observatory & ESO Conf. on *Extremely Large Telescopes*, 57, p. 121 (1999)
- Ac17 Active Optics and Corrective Holographic Gratings  
G.R. Lemaître, M. Duban,  
International Colloquium for *Space Optics – ICSO 6*, Proc. CNES-ESA, 34, 623 (2000)
- Ac18 VLTI Pupil Transfer: Variable Curvature Mirrors – II Plasticity, Hysteresis and Curvature Control  
G.R. Lemaître, M. Ferrari, S. Mazzanti, P. Lanzoni, P. Joulie, D. Leduc, M. Copede  
Conf. on *Astronomical Telescopes and Instrumentation*, Munich, Germany, Proc. SPIE 4006, 192 (2000)
- Ac19 Corrected gratings recording by active optics compensators  
G.R. Lemaître, M. Duban,  
Conf. on *Future EUV/UV and Visible Space Astrophysics Missions*, Waikoloa, USA, Proc. SPIE 4854, 447-456 (2002)
- Ac20 Active optics and the non-axisymmetric case  
Conf. on *Astronomical Telescopes and Instrumentation*, Glasgow, UK, Proc. SPIE 5494, 101-112 (2005)
- Ac21 Active optics: MINITRUST wide-field three-reflection telescopes  
G.R. Lemaître, P. Montiel, P. Joulie, K. Dohlen, P. Lanzoni,  
Conf. on *Astronomical Telescopes and Instrumentation*, Glasgow, UK, Proc. SPIE 5494, 156-168 (2005)
- Ac22 Three-reflection telescope proposal as flat-field anastigmat for wide field observations at Dome C  
G.R. Lemaître, M. Ferrari, R. Viotti, C. La Padula, G. Comtes, M. Blanc, M. Boer,  
Conf. *Dome C Astronomy and Astrophysics*, EAS Publications Series, EDP Sciences, 14, 325-330 (2005)
- Ac23 Active Optics and X-ray telescope mirrors  
Conf. on *Space Telescopes and Instrumentation II : UV to Gamma Rays*, Marseille, France, Proc. SPIE 7011, M0037 (2008)
- Ac24 Reflective Schmidt designs for extended object detection in space astronomy – Active optics methods  
Gerard R. Lemaître, Xin Wang, Emmanuel Hugot,  
Proc. Conf. ODF'14 on *Optical Design & Fabrication*, Itabashi, Tokyo, Japan, 12S1-08 (2014)

OTHER PAPERS - NOTES - INTERNATIONAL CONFERENCES AS CO-AUTHOR

- B 1 Sur l'élasticité et lames correctrices des télescopes de Schmidt  
Mémoire de DEA d'Optique-Astrophysique, Université de Provence Aix-Marseille I (1968)
- B 2 Sur la flexion du miroir de 3.60 m du télescope d' European Southern Observatory  
ESO Bulletin, No 8, p. 21 (1971)
- B 3 Notes sur la remise en forme du miroir Cassegrain du Telescope de 3.6m Canda-France-Hawaii,  
Private communications to Rene Racine, director of CFHT (1982)
- B 4 Imaging extreme UV spectrometer for astrophysical investigation in space  
C.E. Huber, J.G. Timothy, J.S. Morgan, G.R. Lemaître, G. Tondello, M.E. Puiatti, P. Scarin  
Proc. SPIE Conf. on *Instrumentation in Astronomy VI*, Tucson, p. 127 (1986)
- B 5 The Optical Very Large Array  
A. Labeyrie, G.R. Lemaître, L. Koechlin  
Proc. SPIE Conf. on *Advanced Technology Optical Telescopes III*, Tucson, USA, p. 323 (1986)
- B 6 UV prime focus spectrograph with CCD at CFHT  
O. Boulade, G.R. Lemaître, L. Vigroux  
Proc. SPIE Conf. on *Instrumentation in Astronomy VI*, Tucson, USA, p. 110 (1986)
- B 7 The LOOM proposal : The TEMOS concept  
A. Baranne, G.R. Lemaître  
Proc. Workshop on *Large Telescopes*, Hamburg, Germany, p. 226 (1987)
- B 8 Steps towards an optical very large array  
A. Labeyrie, G.R. Lemaître, C. Thom, F. Vakili  
Proc. NOAO/ESO Conf., in *HR Imaging and Interferometry*, Garching, Germany, p. 669 (1988)
- B 9 Evaluation of toroidal gratings in the EUV  
M.C.E. Huber, G. Naletto, P. Nicolosi, G.R. Lemaître, G. Tondello, E. Janitti, J. Morgan, J.G. Timothy  
Proc. SPIE Conf. on *X-ray Instrumentation in Astronomy*, San Diego, USA, (1988)
- B 10 Proposed EUV rocket observations of the solar CORONA and the development of aspheric diffraction gratings  
J.G. Timothy, T.E. Berger, J.S. Morgan, M.C. Huber, G.R. Lemaître, G. Tondello,  
Proc. 2nd European Astronomy Conf., Davos, Switzerland, p. 147 (1990)
- B11 2D mask generation by pulsed YAG laser for multi-object spectroscopy at CFHT : LAMA  
B. Di Biagio, E. Le Coarer, G.R. Lemaître  
Proc. SPIE Conf. on *Instrumentation in Astronomy VII*, Tucson, USA, 1235, p. 422-42 (1990)
- B12 Variable curvature mirrors for the VLTI  
M. Ferrari, G.R. Lemaître  
Proc. ESO Conf. on Progress in *Telescope and Instrumentation Technologies*, Garching, Germany,  
p. 551 (1992)
- B13 Aspherized concaved gratings by active submaster for high resolution spectroscopy  
M. Wang, G.R. Lemaître  
Proc. ESO Conf. on Progress in *Telescope and Instrumentation Technologies*, Garching, Germany,  
p. 729 (1992)
- B14 Highly variable curvature mirrors for the ESO Very Large Telescope Interferometer  
M. Ferrari, G.R. Lemaître, S. Mazzanti, O. von der Luhe, B. di Biagio, P. Montiel, D. Revest, P. Joulie,  
J.F. Carré  
Conf. on *Astronomical Telescopes and Instrumentation for the 21th Century*, Proc. SPIE 2201,  
p. 811 (1994)
- B15 Liquid mirror telescope: A progress report  
E.F. Borra, L. Girard, M. Wang, G. Tremblay, G.R. Lemaître  
Conf. *Astronomical Telescopes and Instrumentation for the 21th Century*, Kona, 1 Proc. SPIE 2199,  
p. 524 (1994)

- B16 An astronomical telescope with a liquid primary observing at large zenith angles  
E.F. Borra, G. Moretto, M. Wang, G.R. Lemaître  
Conf. on *Astronomical Telescopes and Instrumentation for the 21th Century*, Proc. SPIE 2199, p.252 (1994)
- B17 Realization of a highly variable curvature mirror for the VLT Interferometer  
M. Ferrari, S. Mazzanti, G.R. Lemaître  
Conf. on Optical Testing and Holography, Tokyo, Japan, Proc. SPIE 2570, p.270 (1995)
- B18 Liquid mirror telescopes: A progress report  
E.F. Borra, M. Ferrari, L. Girard, G. Moretto, G. Tremblay, G.R. Lemaître  
ESO Conference on *Telescopes of Today and Tomorrow*, Landskrona, SW, Proc. SPIE 2871, p. 326 (1996)
- B19 A high efficiency imaging EUV spectrometer  
J.S. Morgan, D.C. Slater, G. Tondello, G. Naletto, G.R. Lemaître, J.G. Timothy, M.C. Huber, E. Jannitti  
Conf. on *Extreme Ultraviolet Astronomy*, Pergamon Press publ., New York, p. 380 (1998)
- B20 HST Cosmic Origin Spectrograph : A multi-mode deformable plane mirror for recording upgraded resolution concave gratings  
M. Duban, K. Dohlen, G. R. Lemaître  
Conf. on *Space Telescopes and Instruments V*, Proc. SPIE Conf., Kona, USA, 3356, p.963 (1998)
- B21 A general method for recording high resolution holographic gratings by using a null powered multi-mode deformable mirror  
M. Duban, G.R. Lemaître, R.F. Malina  
Conf.. on *UV Optical Space Astronomy Beyond HST*, Boulder, USA, PASP Conference Series, 164, p. 428 (1999)
- B22 VLTI pupil transfer: Variable curvature mirrors – I : Results and performance and interferometric laboratory optical layout  
M. Ferrari, G.R. Lemaître, S. Mazzanti, P. Lanzoni, F. Derie, P. Gritton, S. Ménardi  
Conf. on *Astronomical Telescopes and Instrumentation*, Munich, Germany, Proc. SPIE 4006, 10 (2000)
- B23 Active optics methods for highly aspheric mirrors : Manufacturing the quaternary mirror of the OWL Project  
M. Ferrari, G.R. Lemaître,  
Conf. on *Optical Design, Materials, Fabrication and Maintenance*, Munich, Proc. SPIE 4003, 34-42 (2000)
- B24 ARAGO: A robotic observatory for the variable sky  
M. Boer, A. Acker, J-L Atteia, G. Buchholtz, F. Colas, M. Deleuil, M. Dennefeld, G.R. Lemaître & al.,  
Conf. on *Astronomical Telescopes and Instrumentation*, Proc. SPIE 4836, 453-460 (2002)
- B25 LAMOST multi-object spectrographs with aspherized gratings  
Y-t. Zhu, G.R. Lemaître,  
Conf. on *Instrument Design for Ground-based Telescopes*, Proc. SPIE 4841, 1127-1133 (2003)
- B26 Variable curvature mirrors : Implementation in the VLTI delay-lines for field compensation  
M. Ferrari, S. Mazzanti, G.R. Lemaître, J. Lemerrer, P. Lanzoni, F. Derie, A. Huxley, A. Wallanders,  
Conf. on *Interferometry for Optical Astronomy II*, Proc. SPIE 4838, 1155-1162 (2003)
- B27 Active optics concepts for hypertelescope aberration control and pupil densification  
K. Dohlen, P. Dargent, M. Ferrari, G.R. Lemaître,  
Conf. on *High-Contrast Imaging for Exo-Planet Detection*, Proc. SPIE 4860, 371-380 (2003)
- B28 Three-mirror telescopes for sky surveys on ground and in space : The MINI-TRUST  
R. Viotti, R. La Padula, A. Vignato, G. Lemaître,  
Conf. on *Highly Innovative Space Telescope Concepts*, Proc. SPIE 4849, 377-383 (2003)
- B29 Wide field astronomy with small size telescopes  
M. Badiali, A. Carusi, A.M. Di Lellis, M. Frutti, C.D. La Padula, G.R. Lemaître, P. Montiel, D. Nanni, A. Vignato, G.B. Valsecchi, and R.F. Viotti,

- B30 Wide field astronomy with three-reflexion [two-mirror] telescopes  
R. La Padula, G.R. Lemaître, P. Montiel, A. Vignato, R. Viotti  
Mem. Soc. Astron. Italiana, 74, p.63-65 (2003)
- B31 Wide-field observations [proposed] at Dome Concordia - Antartica  
R. Viotti, M. Badiali,, G.R. Lemaître  
Mem. Soc. Astron. Italiana, Suppl. N.2, p. 177-180 (2003)
- B32 Toroid mirrors and Active Optics: degenerated configuration for monomode deformable mirrors,  
E. Hugot, G.R. Lemaître, M. Ferrari,  
Conf. on *Astronomical Telescopes and Instrumentation*, Orlando, Proc.SPIE 6273, 102-107 (2005)
- B33 Wide field astronomy at Dome C : NKDF with N=1 and SNAP-MIR,  
D. Burgarella, M. Ferrari, T. Fusco, M. Langlois, G.R. Lemaître, B. Leroux, G. Moretto, M, Nicole, et al.  
EAS Publications Series, 25, 187-193 (2006)
- B34 On the ESO-ELT five-mirror option with M1 mirror as a paraboloid – I  
ELT Optical Design Working Group, Note G. Lemaître to ESO (17-02-2006)
- B35 On the ESO-ELT five-mirror option with M1 mirror as a paraboloid – II  
ELT Optical Design Working Group, Note G. Lemaître to ESO (14-09-2006)
- B36 The Antartica wide-field high -resolution infrared telescope - WHITE  
D. Burgarella, B. Le Roux, M. Langlois, G.R. Lemaître, T. Fusco, M, Ferrari,  
Proc. SPIE Conf. 7012-84 (2008)
- B37 Active optics theory: compensation of aberration using the single actuator principle,  
E. Hugot, M. Ferrari, G.R. Lemaître, F. Madec  
Proc. SPIE Conf. 7018-173 (2008)
- B38 Large convex thin shell for the VLT deformable secondary mirror: Manufacturing status  
E. Hugot, M. Ferrari, G.R. Lemaître, P. Montiel, S.P. Mazzanti, and P. Lanzoni  
Proc. SPIE Conf. 7018-4 (2008)
- B39 Stress polishing of toric mirrors for the VLT-SPHERE common path,  
E. Hugot, M. Ferrari, K. El-Hadi, G.R. Lemaître, and P. Montiel  
Proc. SPIE Conf. 7018-5 (2008)
- B40 Stress polishing of aspherical surfaces for VLT AO instrumentation,  
E. Hugot, M. Ferrari, G.R. Lemaître, K. El Hadi, P. Montiel, J.F. Carré, and D. Fappani  
Proc. OSA Conf. on *Optical Fabrication and Testing*, Rochester, ISBN 978-1-55752-861-2, Paper OWD3 (2008)
- B41 On the super polishing under stress of aspherical surfaces for exo-planet detection and solar instruments  
E. Hugot, M. Ferrari, S. Vives, M. Lalandes, K. El Hadi, S. Moindrot, G.R. Lemaître, and K. Dohlen  
Proc. SPIE Conf. 7739-13 (2010)
- B42 In-flight aberration corrections for large space telescopes using active optics  
M. Laslandes, M. Ferrari, E. Hugot, G.R. Lemaître  
Proc. SPIE Conf. 7739-149 (2010)
- B43 Space Active Optics: toward optimized correcting mirrors for future large spaceborne observatories  
M. Laslandes, E. Hugot, M. Ferrari, G.R. Lemaître, and A. Liotard  
Proc. SPIE Conf. 8176A-38 (2011)
- B44 Stress polishing of E-ELT Segment at LAM  
M. Laslandes, E. Hugot, M. Ferrari, J. Floriot, N. Rousselet, S.Vives, G.R. Lemaître, J.F. Carré, and M. Cayrel  
Proc. SPIE Conf. 8169-02 (2011)

- B45 Stress polishing of segments for future extremely large telescopes: results obtained on a full scale demonstrator  
E. Hugot, M. Ferrari, M. Laslandes, J. Floriot, N. Rousselet, G. Lemaître  
Proc. SPIE Conf. 7731 (2012)
- B46 Multi Object Spectrograph of the Fireball Balloon Experiment  
R. Grange, G. Lemaître, S. Quiret, B. Milliard, S. Pascal  
Proc. SPIE Conf. Montreal 9144-107 (2014)
- B47 The FireBall-2 UV sample grating efficiency at 200-208nm  
S. Quiret, B. Milliard, R. Grange, G. Lemaître, A. Caillat, A. Cotel  
Proc. SPIE Conf. 9144-109 (2014)
- B48 A freeform-based, fast, wide-field and distortion-free camera for ultra low surface brightness surveys  
E. Hugo, X. Wang, D. Valls-Gabaud, G. Lemaître, T. Agocs, R. Shu, J. Wang  
Proc. SPIE Conf. 9143-188 (2014)
- B49 Fireball multi object spectrograph: as-built optic performances  
R. Grange, B. Milliard, G.R. Lemaître, S. Quiret, S. Pasca, A. Origine, E. Hamden, D. Schiminovich  
Proc. SPIE Conf. on Space Telescopes and Instrumentation - Ultraviolet to Gamma Ray, Tracking #: AS16-AS102-197, 2016
- B50 Integration and test of the Fireball Multi Object Spectrograph  
R. Grange, B. Milliard, G.R. Lemaître, S. Quiret, P. Vola, P. Balard, S. Pascal, A. Orgine  
ICSO 2016 Conf. ESA-CNES, 18-21 Oct., Biarritz, Proc. abstract number: 068 (2017) ???
- B51 The MESSIER path-finder : a wide-field and distortion-free telescope using a curved detector  
E. Muslimov, E. Hugot, X Wang, D. Valls Gabaud P. Vola, and G. R. Lemaître  
European Optical Society (EOS) Conf. Proc., Munich, June 26-29 (2017)
- B52 Design of optical systems with toroidal curved detectors  
E. Muslimov, E. Hugot, M. Ferrari, T. Behaghel, G.R. Lemaître, M. Roulet, and S. Lombardo,  
Optics Letters, OSA, **43**, Issue 13, pp.3092-3097 (2018)
- B53 MESSIER: exploring the ultra-low surface brightness universe with a curved focal plane based satellite  
S. Lombardo, E. Muslimov, D. Valls-Gabaud, E. Hugot, G. Lemaître, M. Roulet, M. Ferrari  
ICSO Proc. International Conference on Space Optics, 9-12 October 2018 Greece (2018)
- B54 Active Optics: MESSIER three-mirror telescope proposal for an UVOIR wide-field space survey  
G. R. Lemaître, P. Vola, E. Muslimov  
Proc. IXth Annual Intl. Meeting of the Georgian Mechanical Union and International Conference on "Related Problems of Continuum Mechanics", 11–13 October 2018, Kutaisi, Republic of Georgia (2018)
- B55 CASTLE: A curved-sensor-based wide-field telescope at Calar Alto  
S. Lombardo, Muslimov E. R., Lemaître G. R., et al.  
Proc. SPIE Conf. vol. 11451-5 (2020)

#### INVITED CONFERENCES IN FOREIGN COUNTRIES (WITHOUT ACTS)

- C 1 Focal Instrumentation for a 3.6 m telescopes  
Inv. by H.M. Al-Naimy and T.H. Kadoury, Astronomy and Space Research Center,  
Baghdad, Irak (1983)
- C 2 Prime focus instrumentation for the CFHT  
Inv. by R. Racine, CFHT, HI, USA (1984)
- C 3 Un nouveau concept pour très grand télescope : TEMOS  
Inv. By SF2A, IAP (1987)
- C 4 Active Optics and faint-object spectroscopy with large telescopes  
Inv. by J. Rose, Department of Astrophysics, Chapel Hill, NC, USA (1989)
- C 5 Active Optics and extreme ultraviolet spectroscopy : SOHO

- Inv. by M.C.E. Huber, Space Science Dpt., ESTEC, Nordjvik (1990)
- C 6 Active optics and highly variable curvature mirrors  
Inv. by J. Beckers, ESO, Garching (1991)
- C 7 Extreme ultraviolet instrumentation and Active Optics  
Inv. by S. Bowyer and R. Malina, CEUA, Univ. of California, Berkeley (1991)
- C 8 Méthodes d'Optique Active en astronomie  
Inv. by P. Lavigne and P. Langlois, Institut National d'Optique, Québec (1994)
- C 9 Active Optics in astronomy  
Inv. by C. Humphries and E. Atad, Royal Observatory of Edinburgh, UK (1995)
- C 10 Active Optics, telescopes and instrumentation  
Inv. by R. Buonanno, Observatoire de Rome, et A. Preite-Martinez, IAS Frascati, Italie (1995)
- C 11 Active Optics and a three reflection telescope: MINITRUST  
Inv. by R. Viotti, IAS de Frascati, Italie (1996)
- C 12 Active Optics in astronomy  
Inv. by M. Rosado, UNAM, Mexico (1998)
- C 13 Spectroscopy with aspherized gratings  
Inv. by E. Carasco, INAOE, Puebla, Mexique (1998)
- C 14 Active Optics Methods and all-reflective Schmidt telescopes  
Inv. by H-j. Su, Beijing Observatory and LAMOST Project, China (1999)
- C 15 Schmidt telescopes and spectrographs  
Inv. by X.-q. Cui, Nanjing Institute for Astronomy and LAMOST Project, China (1999)
- C 16 Review on Spectrographs with aspherized gratings generated by Active Optics  
Inv. by D.-q. Su, NIAOT-Nanjing, China (2003)
- C 17 Active Optics design for the aspherization of the LRS diffraction gratings of LAMOST  
Inv. by X.-q. Cui, NIAOT-Nanjing, China (2003)
- C 18 Review of Active Optics Methods: Axisymmetric and non-axisymmetric cases  
Inv. by H.-j. Su, NAOC-Beijing, China (2003)
- C 19 The various Schmidt systems and Active Optics  
Inv. by E. Schmidt, neveu de B. Schmidt, inventeur du télescope grand champ, Université de Majorqa, Spain (2003)

## TECHNICAL REPORTS (about 200)

Rapports d'expertises sur l'optique principale de télescopes nationaux et étrangers.

Réponses à appels d'offre pour des projets d'optique internationaux.

Rapports de réception d'optiques principales et auxiliaires pour plusieurs grands télescopes.

Rapports pour des modifications optiques de télescopes et d'instruments divers.

Rapports de spécification des optiques pour la construction de 17 spectrographes avec réseaux asphériques, suivis de rapports de définition de matrices actives pour l'exécution des réseaux par la France et les USA.

Rapports de proposition de développements variés à des instituts français, internationaux et étrangers.

Demandes de financement (université, INSU, région, plans européens, instituts italiens et américains)

Contributions à des manuels d'utilisation de spectrographes.

Co-rédactions scientifiques d'environ 10 contrats de recherches internationaux avec le CNRS et l'Université de Provence Aix Marseille I et avenants à ces contrats (ESO-Munich, DAO-Victoria, IAS Frascati - Italie).

Rapports sur le développement et la réalisation de miroirs à courbure variable pour l'Interféromètre VLT (ESO) et le Grand interféromètre GTF- IR de l'Université P. et M. Curie, Jussieu Paris VI (LPMA).

### GENERAL PUBLIC PRESENTATIONS

- Paper : La Méthode des Relaxations Élastiques en Optique Astronomique I,  
in monthly review *Ciel et Espace*, 180, p. 5 (1981)
- Paper : La Méthode des Relaxations Élastiques en Optique Astronomique II,  
in monthly review *Ciel et Espace*, 181, p. 6 (1981)
- Exhibition : Evolution des Télescopes et de l'Optique Astronomique,  
Musée des Sciences et Techniques, Paris - La Villette (1982)
- Conference : A Review on Giant Telescope Concepts,  
Amateur Astronomers, Society of Hawaii, Kamuela, HI (1985)
- Conference : Les Grands Observatoires Actuels,  
Association pour un Planétarium, Aix-en-Provence (1993)
- Conference L' Optique Active et les Grands Télescopes,  
Association des anciens élèves ENSAM, Paris (2000)