

International Conference on Space Optics—ICSO 1997

Toulouse, France

2–4 December 1997

Edited by George Otrio



Contrôle optique de la stabilité dimensionnelle de structures

Michel Lequime, Jean-Jacques Guerin, Pierrick Leblay



International Conference on Space Optics — ICSO 1997, edited by Georges Otrio, Proc. of SPIE Vol. 10570, 105701A · © 1997 ESA and CNES · CCC code: 0277-786X/18/\$18 · doi: 10.1117/12.2326486

CONTROLE OPTIQUE DE LA STABILITE DIMENSIONNELLE DE STRUCTURES

Michel LEQUIME, Jean-Jacques GUERIN et Pierrick LEBLAY

*BERTIN & Cie, Division Systèmes à Fibres Optiques
Centre d'Aix-en-Provence, Pôle d'Activités d'Aix-Les Milles
155, rue Louis Armand - B.P. 22000 - 13791 AIX-EN-PROVENCE Cedex 3*

RESUME – Cette communication a pour objectif de décrire le principe et les caractéristiques d'un Moyen Sol Optique utilisant l'interférométrie en lumière blanche et qui permet de mesurer avec une très grande précision (quelques dizaines de nanomètres) les évolutions à court et long termes de certaines distances caractéristiques d'un instrument au cours de la séquence d'essais qui lui est appliquée.

ABSTRACT – *This paper aims at providing with the principle and the main features of an Optical Ground Support Equipment based on the White-Light Interferometry and which allows to quantify with a great accuracy (few tens of nanometers) the short term and long term changes of some specific lengths of a space instrument during its ground qualification test sequence.*

1 INTRODUCTION

Le développement de systèmes optiques d'observation spatiale de plus en plus performants nécessite de disposer de structures mécaniques de positionnement et de maintien des éléments optiques dont le comportement intrinsèque soit aussi stable que possible et qui puissent en outre faire l'objet d'une caractérisation et d'une qualification isolées.

Il peut s'avérer en particulier utile de quantifier, dès la phase de développement correspondant à la réalisation d'un Modèle Structural et Thermique, la stabilité de la position du Miroir Secondaire d'un Télescope dans le référentiel du Miroir Primaire, lorsque l'instrument correspondant est soumis aux différentes contraintes susceptibles de lui être appliquées au cours de la séquence d'essais (Essai Vide Soleil, Essai Thermoélastique, Essai en Vibrations, Essai de Déformées d'Interface, Essai de Retournement sous gravité, ...). Le Modèle n'étant pas alors équipé d'optiques nominales, il n'est pas possible d'utiliser des mesures de qualité image (PSF ou WFE) pour en déduire les évolutions de tirage, de basculement et d'excentrement de la combinaison optique réalisée : il est donc nécessaire d'avoir recours à des mesures directes de distance.

Compte tenu des précisions recherchées pour de tels contrôles (entre 1 μm et 0,1 μm suivant les configurations), il est nécessaire de faire appel à des techniques optiques de type interférométrique dans lesquelles on transforme les évolutions δL de la distance L séparant deux surfaces optiques de référence en variations $\delta\phi$ de la phase ϕ d'un signal optique, en accord avec les relations de définition rappelées ci-après :

$$\phi = 2\pi \frac{2L}{\lambda} \Rightarrow \delta\phi = \frac{4\pi \delta L}{\lambda}$$

dans lesquelles on a supposé que le système de mesure fonctionnait en réflexion.

Pour que ces évolutions de phase ϕ soient détectables, il faut employer une source lumineuse dont la longueur de cohérence soit grande devant la distance à mesurer L , ce qui conduit à sélectionner un **laser** à faible largeur de raie.

Une telle méthode présente en pratique un certain nombre d'inconvénients :

- La longueur d'onde centrale du laser utilisé doit présenter une **stabilité en fréquence** meilleure que la précision recherchée sur la mesure des variations de distance. Ainsi, si l'on souhaite déterminer les variations de position relative de deux surfaces de référence placées à un mètre l'une de l'autre avec une précision meilleure que $0,1 \mu\text{m}$, il est nécessaire que la stabilité en longueur d'onde du laser soit meilleure que 10^{-7} en relatif, ce qui conduit à sélectionner des sources laser d'une mise en œuvre relativement complexe et d'un coût unitaire élevé.
- Les mesures réalisées étant des mesures de phase (et non de différence de marche), la détermination de la grandeur acquise n'est connue qu'à 2π près. Pour que le résultat obtenu conserve donc un caractère absolu sur de grandes périodes de temps, il est nécessaire d'adjoindre à cette mesure de phase un dispositif de **comptage de franges** et de faire en sorte que sa mise en œuvre soit **permanente**, afin d'éviter toute erreur ou omission dans les opérations d'incrémentation et de décrémentation de ce compteur. Ceci impose donc que le système de mesure ne soit à aucun moment arrêté ou désolidarisé de l'instrument, ce qui est bien évidemment très contraignant.
- Dans certaines configurations de test (Vide Thermique notamment), il n'est pas possible de placer la source laser à l'intérieur du caisson, compte tenu des impacts négatifs que cela entraînerait sur ses performances en stabilité. Dans ces conditions :
 - soit on utilise un hublot pour éclairer avec le faisceau laser de mesure les surfaces de référence solidaires de l'instrument depuis l'extérieur du caisson, ce qui génère des contraintes particulièrement sévères d'alignement et impose en pratique que l'instrument ne se déplace pas au cours de l'essai,
 - soit on a recours à un déport par fibres optiques et traversée étanche pour relier le laser aux différents interféromètres de mesure, et dans ce cas, on génère des rétroreflexions susceptibles d'une part de dégrader la stabilité en puissance et en longueur d'onde du laser de mesure, et d'autre part de former des cavités parasites dont les réponses propres viennent se superposer à celle de l'interféromètre de mesure.

Pour remédier à l'ensemble de ces problèmes, la Société BERTIN a imaginé une nouvelle méthode de contrôle basée sur l'interférométrie en lumière blanche et qui permet de comparer à tout instant et avec une très grande précision la longueur effective d'une ou plusieurs distances caractéristiques d'un instrument avec une longueur de référence.

2 PRINCIPE GENERAL

Le principe de la méthode utilisée est représenté de manière schématique à la Figure 1.

Le flux émis par une source incohérente à spectre large de type diode électroluminescente (DEL) à émission par la tranche est injectée dans une fibre optique monomode et adressée au travers d'un coupleur 3 dB vers un premier interféromètre de Michelson appelé *Transducteur de Distance* (TD) et dont la différence de marche Δ_{TD} (bras long – bras court) est égale au double de la distance L dont on souhaite contrôler les évolutions.

La largeur spectrale de la source étant typiquement de 60 nm, pour une longueur d'onde centrale de 1310 nm, sa longueur de cohérence est de l'ordre de $30 \mu\text{m}$, ce qui est à l'évidence très inférieur à la différence de marche (DDM) caractéristique du transducteur de distance.

Le flux réfléchi par ce capteur est envoyé vers un deuxième interféromètre de Michelson appelé *Cellule de Référence* (CR), et dont la constitution est analogue à celle du premier à ceci près que sa différence de marche caractéristique Δ_{CR} ($\Delta_{CR} = 2L_0$) est fixe, stable et légèrement inférieure à celle du Transducteur de Distance.

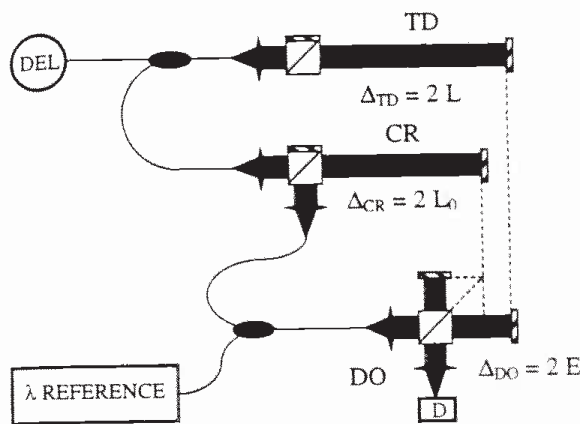


Figure 1 – Schéma de principe

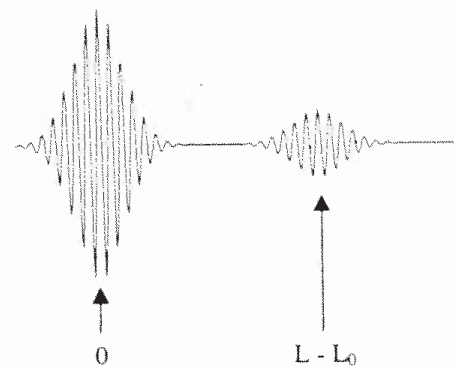


Figure 2 – Allure du signal enregistré

On peut montrer qu'en régime de cohérence, la mise en série de ces deux interféromètres est équivalente à la constitution d'un nouvel interféromètre à deux ondes dont la visibilité est égale à $\frac{1}{2}$ et dont la différence de marche est égale à l'écart entre les différences de marche des deux interféromètres initiaux, soit ici $\Delta = 2L - 2L_0 = 2E$.

Sous réserve que cet écart reste grand devant la longueur de cohérence de la source, la relecture de cette dernière information peut à nouveau être faite à l'aide de techniques de cohérence, en utilisant un troisième interféromètre de Michelson, appelé *Démodulateur Optique* (DO) dont la différence de marche peut être ajustée sur une large plage couvrant l'intervalle entre 0 et $2E$. Le signal enregistré par le photodétecteur est représenté à la Figure 2 et se trouve en fait constitué de deux pics de corrélation, dont le premier est associé à la différence de marche nulle du démodulateur optique et dont le deuxième est d'intensité 4 fois moindre et correspond à l'accord de phase global défini par la relation $\Delta_{DO} = 2E = \Delta_{TD} - \Delta_{CR}$.

La mesure précise du déplacement du miroir à l'intérieur du démodulateur optique permettant de passer de l'un de ces pics de corrélation au suivant peut être réalisée en injectant dans ce moyen une longueur d'onde de référence, les contraintes de stabilité ici applicables étant naturellement beaucoup moins contraignantes, puisque la différence de marche effective de l'interféromètre concerné ne dépasse pas $2E$ et peut donc être gardée inférieure à quelques millimètres par un choix convenable de l'écart entre L et L_0 .

Sous réserve que la longueur de référence L_0 utilisée soit suffisamment stable, la mesure des variations de cet écart E est équivalente à celle des variations de la longueur initiale L , mais donne accès à un certain nombre d'avantages conceptuels importants, à savoir :

- la mesure ainsi réalisée n'est plus à proprement parler incrémentale, ce qui signifie que toute interruption dans la mesure n'est pas à un obstacle à l'obtention d'une information **absolue** d'écart sur de longues périodes de temps,
- toute dérive à long terme du démodulateur optique est automatiquement supprimée par la procédure de mesure adoptée (recalibration permanente assurée par l'enregistrement du pic de corrélation correspondant à la différence de marche nulle de ce même démodulateur optique),

- les dérives spectrales de la source employée (soit ici la diode à émission par la tranche) n'ont aucun impact sur la mesure puisque les parties utiles des interférogrammes enregistrés correspondent en fait à des signaux de DDM nulle,
- les réflexions parasites ne sont plus préjudiciables à la qualité de la mesure, puisque d'une part les contraintes de stabilité de la source sont relâchées et que d'autre part les cavités parasites auxquelles ces réflexions donnent naissance sont caractérisées par des différences de marche propres sans rapport direct avec celle du transducteur de distance.

3 MISE EN ŒUVRE PRATIQUE

3.1 Transducteurs de Distance

Les transducteurs de distance que nous avons développés sont constitués de deux sous-ensembles principaux, à savoir un collimateur interférométrique et un rétrorefléteur miniature de type coin de cube creux.

Le **collimateur interférométrique** associe une embase de connexion pour fibre optique monomode à une lentille asphérique moulée de focale 15 mm. Le calcul montre (et l'expérience confirme) qu'un ajustement fin de la position de l'extrémité de la fibre optique par rapport au foyer de cette lentille permet de garantir un coefficient de rétrocouplage élevé (typiquement meilleur que 90%) quelle que soit la distance qui sépare le collimateur de l'élément réflecteur, et ce dans une plage de fonctionnement comprise entre 100 mm et 2 mètres.

La partie interférométrique du collimateur est constituée d'un cube séparateur de faibles dimensions (typiquement 10 mm de côté) et d'un rétrorefléteur monté par adhérence sur l'une des faces de ce cube. L'ensemble ainsi constitué est monté dans un corps en Invar de forme cylindrique et interfacé sur la périphérie du Miroir Primaire à l'aide d'un support en Zérodur.

Le **rétrorefléteur miniature** est de type coin de cube creux, et peut être entièrement réalisé en Zérodur par adhérence moléculaire si les contraintes particulières de l'application rendent cette solution nécessaire (garantie d'une très grande stabilité sur une large plage de température).

La photographie disposée à la Figure 3 présente une version prototype d'un tel Transducteur de Distance (la fibre n'étant pas ici raccordée). On notera les faibles dimensions de l'ensemble (l'échelle de la photographie est donnée par la pièce de 20 centimes).



Figure 3 – Transducteur de distance prototype

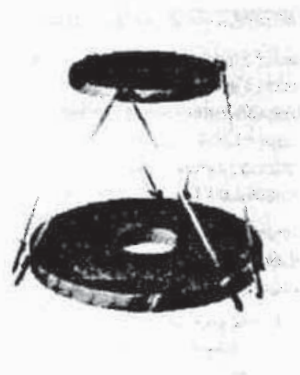


Figure 4 – Schéma d'implantation

Les performances interférométriques d'un tel collimateur sont très satisfaisantes puisque la visibilité des signaux obtenus dépasse les 85% et que les informations de Différences de marche obtenues ne

sont pas affectées par une déconnexion/reconnexion de la fibre optique monomode dans son embase.

Les tolérances de positionnement transverses du rétroreflécteur par rapport à l'axe du faisceau lumineux émis par le collimateur dépendent bien évidemment de la dimension transverse de ce faisceau et donc de la focale de la lentille : lorsque celle-ci est de 15 mm, on peut admettre un décentrement de ce coin de cube d'environ 0,5 mm sans dégrader de manière significative les performances globales du système. La faible valeur de cette tolérance nous a conduit à définir une version améliorée de ce collimateur interférométrique dans laquelle un diasporamètre de faible débattement est inséré entre la lentille de collimation et le cube séparateur, et permet donc d'ajuster finement la direction du faisceau émis de manière à la faire coïncider avec celle définie par le sommet du coin de cube (l'emploi d'un rétroreflécteur sur le bras court permet de réaliser cet ajustement sans dégradation de la qualité interférométrique des signaux délivrés par le transducteur de distance).

3.2 Implantation sur l'Instrument

Celle-ci est réalisée en accord avec la disposition de principe schématisée à la Figure 4 : les six réflecteurs sont associés deux par deux en trois points de la périphérie du secondaire séparés de 120° , tandis que les six collimateurs sont agencés suivant le même motif, mais celui-ci ayant subi une rotation de 60° autour de l'axe du télescope.

Dans ces conditions, les 6 distances élémentaires ainsi matérialisées sont très voisines les unes des autres, de sorte qu'une Cellule de Référence **unique** peut être utilisée pour ramener l'ensemble des DDM effectives dans la plage de balayage du Démodulateur Optique.

La combinaison des variations de longueur associées à ces 6 transducteurs de distance permet de quantifier l'ensemble des déplacements du Miroir Secondaire dans le référentiel du Miroir Primaire, à savoir la variation de tirage (cet effet de piston conditionnant en particulier l'amplitude de la défocalisation du Télescope), les déplacements radiaux (excentrement et basculements), qui ont un impact important sur sa qualité image de l'Instrument et enfin la rotation relative des deux miroirs autour de l'axe les joignant (mouvement qui est a priori sans effet sur la qualité d'un instrument présentant une symétrie de révolution).

Il est important de souligner ici que la Cellule de Référence constitue pour 5 des six degrés de liberté du problème (basculements, excentrement et torsion autour de l'axe) un mode commun de perturbation qui s'élimine de manière rigoureuse lors du calcul des amplitudes de déplacement correspondantes : ceci signifie qu'une modification de la longueur matérialisée par cette Cellule de Référence sera sans impact sur le résultat de ces 5 mesures. Cette conclusion n'est bien évidemment pas vraie dans le cas de l'effet de piston, pour lequel l'erreur générée est strictement égale à la dérive ayant éventuellement affecté la Cellule de Référence.

3.3 Constitution de la Cellule de Référence

Cette Cellule de Référence est constituée d'un caisson étanche à l'intérieur duquel se trouve disposé un plateau épais en Zérodur supporté sans contraintes. Ce plateau constitue en fait un véritable banc optique de grande stabilité, sur lequel on vient fixer par adhérence moléculaire les différents sous-ensembles nécessaires au bon fonctionnement de cet interféromètre, à savoir (cf. Figure 5) :

- une interface assurant en même temps la reprise mécanique d'un collimateur interférométrique d'émission rigoureusement identique à celui utilisé pour les transducteurs de distance, et celle d'un collimateur de réception de constitution simplifiée (c'est-à-dire sans cube séparateur ni rétroreflécteur associé au bras court) : comme indiqué à la Figure 5, ce deuxième collimateur permet de récupérer le flux réfléchi par le quatrième port du premier séparateur et de l'injecter sans pertes dans le cœur d'une fibre optique de type multimode, ce qui évite la traversée en double passage

d'un coupleur de dérivation obligatoirement associé à un fonctionnement en réflexion de l'interféromètre (gain de 7 dB).

- un premier rétroreflecteur R1 dit de repliement, et entièrement réalisé en Zérodur par adhérence moléculaire de prismes élémentaires,
- un deuxième rétroreflecteur R2 dit de fermeture, et de même constitution que le précédent.

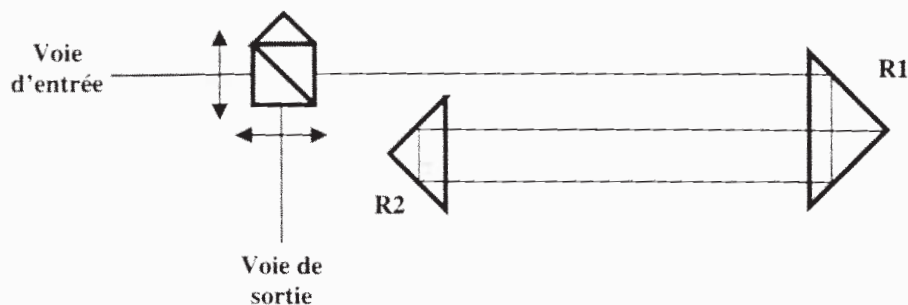


Figure 5 – Principe optique de la Cellule de Référence

Un réglage convenable de la position transverse de ces deux derniers éléments permet de choisir le taux de repliement du montage ainsi constitué (et donc un ajustement discret de la longueur de référence associée à la cellule par multiples entiers de son encombrement optique), tandis que le déplacement axial du rétroreflecteur de repliement permet d'obtenir une accordabilité continue de cette même longueur de référence. Sur le schéma de principe présenté à la Figure 5, nous avons choisi un taux de repliement de 3, ce qui pour une distance de référence de 1 mètre ramène l'encombrement hors tout de la Cellule de Référence à moins de 600 mm x 350 mm x 250 mm.

3.4 Démodulateur Optique

Comme indiqué précédemment, les contraintes de stabilité applicables au démodulateur optique sont très relâchées puisque l'enregistrement régulier de l'interférogramme associé à sa différence de marche nulle permet de s'affranchir de l'ensemble de ses dérives éventuelles.

Ce démodulateur est donc constitué d'un interféromètre de Michelson à coins de cube, dont l'un des éléments est rendu solidaire d'une table de translation motorisée (vitesse de déplacement de plusieurs millimètres par seconde), de course modérée (quelques millimètres) et de haute résolution (quelques dizaines de nanomètres).

On associe à ce démodulateur une longueur d'onde de référence qui peut par exemple être obtenue par réflexion du spectre large fourni par la diode électroluminescente sur un réseau de Bragg à réponse stabilisée en température (largeur spectrale de l'ordre de 0,25 nm, variation de la longueur d'onde centrale de réflexion inférieure à 0,1 nm sur 50°C de gamme) : cette solution permet de n'utiliser qu'une seule source de faible coût et de grande fiabilité à l'intérieur de ce Moyen Sol Optique.

3.5 Multiplexage

Pour démoduler les informations associées à chacun des 6 transducteurs élémentaires à l'aide du même système d'émission-réception, il suffit d'insérer entre le coupleur de tête et les transducteurs de distance un commutateur 1 → 6, et de programmer celui-ci pour obtenir l'éclairage de la voie de mesure choisie.

Si l'emploi d'un système à actionneur électro-mécanique semble conduire à des durées de vie insuffisantes pour l'application envisagée (ceux-ci sont en général conçus pour assurer plus de 10 millions de commutations élémentaires sans défaillance) ou à des temps de réponse trop longs (ces actionneurs répondent habituellement en quelques dizaines de millisecondes), il est possible de remplacer une telle architecture par un système dérivé dans laquelle la commutation entre voies est obtenue par le séquençement temporel de 6 sources élémentaires. Il suffit dans ce cas d'associer une Diode Electroluminescente particulière à chaque transducteur, et de ramener les 6 fibres retour sur la fibre entrée de la cellule de référence en utilisant un coupleur $6 \rightarrow 1$. Une telle solution est ici rendue possible par le faible coût élémentaire de chaque source et par l'insensibilité du résultat à la longueur d'onde centrale de la source utilisée.

4 PERFORMANCES ET LIMITATIONS

Les différentes études et réalisations que nous avons menées sur un tel système montrent que :

- la **résolution** accessible sur la mesure des variations instantanées de la distance associée à un transducteur donné est de **quelques nanomètres** pour une bande passante d'acquisition de l'ordre du kiloHertz,
- la **précision** de mesure garantie sur des enregistrements pris à 3 mois d'intervalle est **meilleure que 5.10^{-8}** (soit 50 nm lorsque la distance d'épreuve est fixée à 1 mètre), la moitié de ce poste étant associée à la dérive résiduelle de la Cellule de Référence.

L'interrogation d'un système 6 voies peut être réalisée en quelques secondes, le temps de scrutation dépendant principalement de la qualité de l'ajustement relatif des distances effectives associées aux différentes voies.

Pour que de telles performances soient effectivement accessibles, il est toutefois nécessaire que les interféromètres à grande différence de marche utilisés par un tel moyen soient mis en œuvre sous vide. Cette contrainte ne s'applique pas au démodulateur optique compte tenu de sa faible DDM et de son mode particulier de fonctionnement (utilisation permanente d'une longueur d'onde de référence).

5 CONCLUSION

Le Moyen Sol Optique que nous venons de décrire permet de mesurer avec une très haute précision (quelques 10^{-8} en relatif) les évolutions dimensionnelles de structures de grande taille (1 mètre ou plus) utilisées dans le domaine spatial, que ce soit en mode statique ou en mode dynamique.

L'utilisation d'un tel système n'est pas réservée à des instruments optiques fonctionnant dans le domaine visible ou proche IR : il pourrait notamment être utilisé pour caractériser au sol le comportement sous sollicitations thermiques ou mécaniques d'instruments travaillant dans les domaines IR moyen ou lointain, UV et X, et pour lesquels les moyens interférométriques traditionnels de type analyseurs de front d'onde ne peuvent fournir que des informations indirectes.

L'adaptation d'un tel concept à une utilisation embarquée est tout à fait envisageable, même si celle-ci nécessitera une miniaturisation de la Cellule de Référence et le développement d'une version statique du démodulateur optique : des études d'avant-projet ont montré que ces deux objectifs étaient parfaitement accessibles.

6 REMERCIEMENTS

Les travaux décrits dans la présente communication ont bénéficié du soutien financier de l'AEROSPATIALE et du CNES.