

Qualification de grands réflecteurs en environnement spatial par holographie dynamique

C. Thizy*, Y. Stockman*, D. Doyle**, Y. Houbrechts*, P. Lemaire*, M. Georges*, E. Mazy*, A. Mazzoli*, G. Ulbrich**

*Centre Spatial de Liège, Avenue du Pré-Aily, B-4031 Angleur-Liège, Belgique. Email :cedric.thizy@ulg.ac.be

**ESTEC-European Space Agency, Keplerlaan 1, NL-2200 AG Noordwijk ZH, Les Pays-Bas

Résumé

Les nouvelles générations de télescopes spatiaux dans le domaine infrarouge nécessitent des réflecteurs de grandes dimensions et de haute qualité. Ceux-ci, pour des raisons de poids, sont basés sur les technologies des matériaux composites dont les comportements aux basses températures sont mal connus. Une méthode par interférométrie holographique de vérification et de validation en environnement spatial de ce type de réflecteurs est présentée. Elle est basée sur l'utilisation d'une caméra holographique dynamique observant un dépôt sur lequel est projeté le faisceau objet venant de la surface réfléchissante. Outre une augmentation de la dynamique de mesure, cette méthode offre l'avantage principal, par rapport aux techniques d'interférométrie optique, de ne pas nécessiter de système optique d'adaptation du front d'onde au réflecteur à mesurer et donc un gain de flexibilité majeur pour des formes exotiques de réflecteurs (types asphériques). Le système de mesure a été calibré avec un interféromètre ponctuel à effet Doppler. L'influence des différentes sources d'erreur du système sur la mesure a été évaluée. Cette évaluation a porté principalement sur des aspects vibratoires et thermiques.

Ces réflecteurs devant être testés sous vide et à basses températures, le système de mesure a été rendu compatible à ces conditions. Des éléments de la caméra holographique (objectifs, CCD, cristal, fibre optique) ont été adaptés et testés sous vide.

La certification métrologique de l'ensemble du système sera réalisée par la mesure d'une antenne parabolique, de 1.1 m de diamètre de comportement connu et placée dans un environnement spatial simulé. Le test consistera à mesurer les déplacements et déformations de l'antenne entre un état initial à la température ambiante, et un état final à une température d'environ 130K.

I. Introduction

Les futures missions d'exploration spatiale de l'ESA mettent en œuvre de grands réflecteurs fonctionnant dans le domaine des ondes infrarouges à millimétriques. Afin de qualifier ces réflecteurs la technique de mesure utilisée doit répondre à certaines exigences en matière de performances.

Elle doit être capable de mesurer des déformations plus grandes que 250 μm avec une précision meilleure que 250 nm. Les réflecteurs testés auront des diamètres de quelques centimètres à 4 m. Leurs formes sont variées, asphérique, convexe, concave, conique. La réflectivité de la surface varie de 10 à 100 % dans le visible, et sa rugosité est comprise entre 0.1 nm et 1 μm . Le système de mesure doit être capable de fonctionner aussi bien dans un environnement ambiant que sous vide avec la température de la surface refroidie à 40 K.

Actuellement aucun système commercial n'est capable de combiner toutes ces performances. C'est pourquoi le CSL a développé une technique basée sur une caméra holographique (CH) dynamique^{1,2}.

II. Validation de la technique de mesure

La CH permet de mesurer des déplacements compris entre 20 nm et 25 μm en une acquisition.

L'avantage unique de cette CH est d'utiliser un cristal photoréfractif qui permet un enregistrement in-situ de l'hologramme. Celui-ci est effacé simplement par le faisceau référence et un nouveau hologramme peut être enregistré. Des séquences enregistrement-lecture holographique peuvent donc être enchaînées indéfiniment, les données sont alors cumulées. La CH peut donc mesurer de grands déplacements, en théorie il n'y a pas de limites.

L'interférométrie holographique est une technique plein champ, le diamètre du faisceau d'illumination et le dispositif d'imagerie peuvent s'adapter à la taille de la surface à mesurer.

Il s'agit d'une mesure de déplacement relatif, cette technique peut donc s'adapter à n'importe quelle forme de réflecteur. Ce qui n'est pas le cas des interféromètres classiques pour lesquels un dispositif d'adaptation du front d'onde au réflecteur est nécessaire.

La CH est généralement utilisée pour mesurer des déplacements sur des surfaces diffusantes. Ici la CH mesure également les déplacements sur des surfaces spéculaires en introduisant un diffuseur dans le montage.

Pour finir, la CH a été adaptée de manière à fonctionner dans des conditions de vide, et le montage a été conçu de manière à limiter l'accès au réflecteur à une ouverture de quelques centimètres de diamètre et ainsi de limiter les fuites thermiques.

Par contre, contrairement aux exigences, la mesure de forme n'est pas possible, mais elle est déterminée pendant la fabrication.

II.1 Test de la méthode en laboratoire

Notre principale préoccupation est de valider la technique de la CH pour la mesure de déplacement sur des surfaces spéculaires. Un montage a donc été réalisé sur une table optique (figures 1 et 2.) dans lequel un diffuseur a été introduit devant la CH. Le réflecteur est remplacé par un miroir sphérique (F/10) qui réfléchit la lumière sur le dépoli, laquelle est diffusée vers la CH.

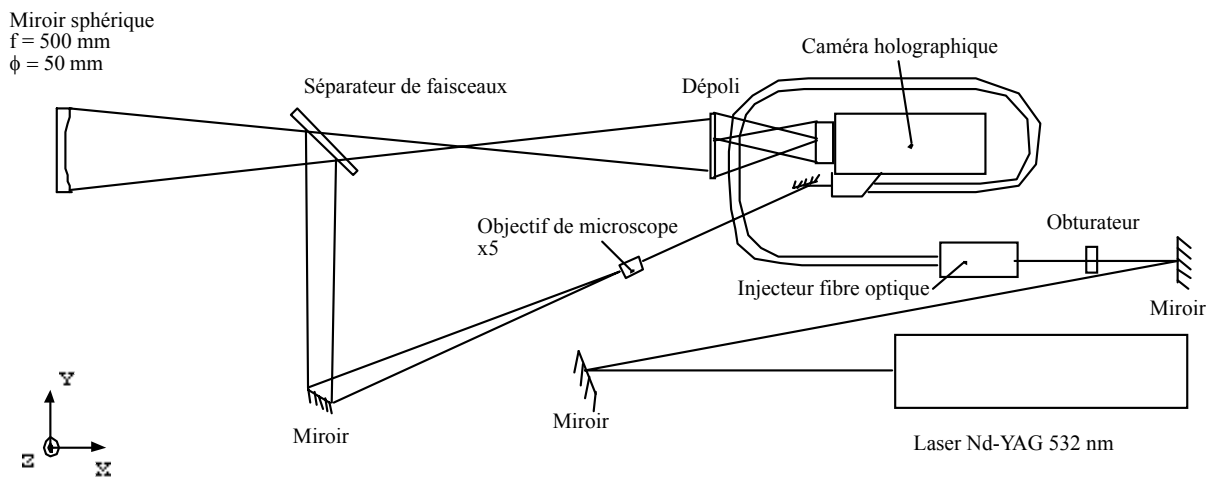


Figure 1 Schéma du montage pour l'observation d'objet spéculaire avec la caméra holographique

Un laser Nd-YAG d'une puissance de 500 mW couplé à une fibre optique monomode amène la lumière à la caméra holographique.

Le miroir sphérique est monté sur une platine de translation permettant de faire varier la position de focus. Une platine de rotation permet également de l'incliner selon les axes Y et Z. Le dépoli est monté sur trois platines de translation (X, Y et Z). L'objectif de microscope a été sélectionné de manière à illuminer correctement le miroir, il est placé proche du plan focal de

celui-ci. Un séparateur de faisceau permet de séparer le faisceau d'illumination du faisceau réfléchi.

L'obturateur électronique est contrôlé de manière à coupé le faisceau quand l'hologramme est enregistré dans le cristal photoréfractif. Le miroir, ou le dépoli, est déplacé. L'obturateur s'ouvre pour effectuer la lecture holographique. La CH observe au même instant l'image diffractée par l'hologramme avec le faisceau référence (état initial du miroir) et l'image du miroir dans son état actuel. Si le miroir a été déplacé entre les deux instants, une figure de franges représentative du déplacement est enregistrée par la CH. Pratiquement, plusieurs interférogrammes sont enregistrés et les techniques classiques de décalage de phase sont utilisées pour obtenir l'image de phase.

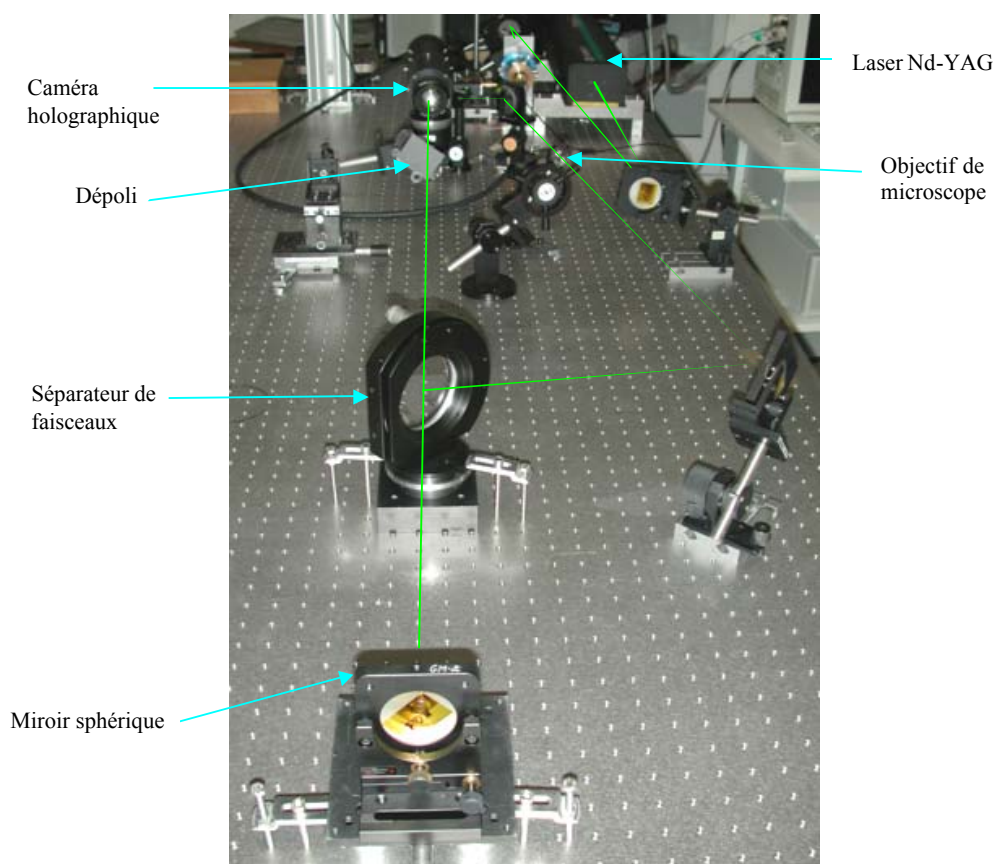


Figure 2 Photo du montage de laboratoire

De manière à calibrer la technique, nous avons comparé les résultats obtenus avec la CH à ceux obtenus avec un interféromètre à effet Doppler. Un miroir plan était collé à l'arrière du miroir sphérique et ce dernier subissait une rotation selon l'axe Z. L'interféromètre mesurait cet angle et la CH mesurait le déplacement induit par cette rotation, les deux étant reliés par le diamètre du miroir sphérique. Une différence de 20 nm RMS entre les deux moyens de mesure est obtenue pour différentes amplitudes de rotation (figure 3).

Également le principe du cumul des données a été vérifié. Il s'agit d'un procédé itératif. Lorsque le nombre de franges sur l'interférogramme est proche de la limite de résolution de la CH, un nouveau hologramme de référence est enregistré. De grandes amplitudes de rotation équivalant à des déplacements d'environ 30 μm ont pu être mesurées en 12 étapes. La différence était inférieure à 100 nm. Dans le cadre de cette expérience, l'image du miroir sur la caméra CCD mesurait environ 90 pixels de diamètre, le déplacement maximal que l'on pouvait mesurer avec la CH était donc de l'ordre de 5 μm .

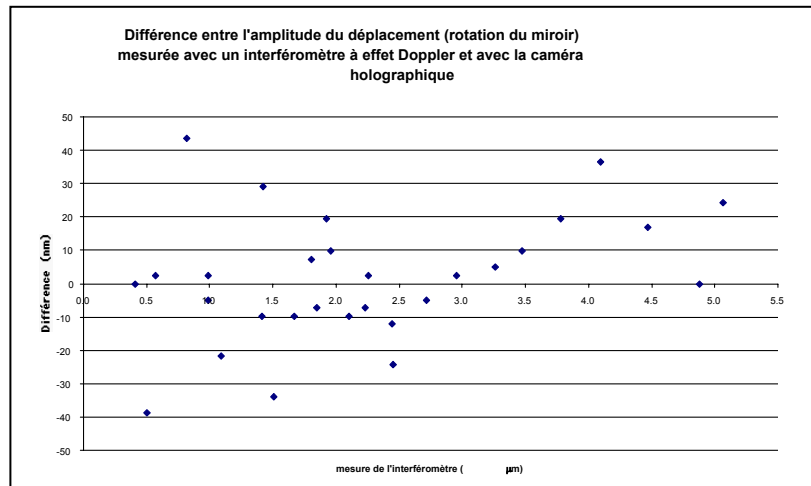


Figure 3 Calibration de la technique caméra holographique avec un interféromètre

Le montage a été modélisé à l'aide du logiciel ASAP. La figure 4 montre que les résultats simulés et expérimentaux sont du même ordre de grandeur au niveau orientation des franges et amplitude du déplacement.

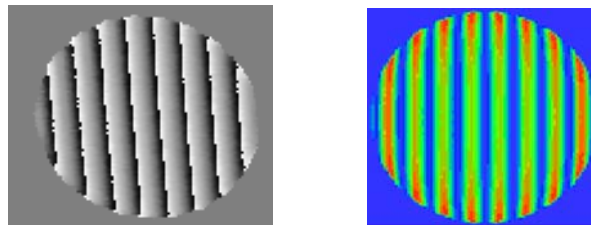


Figure 4 Interférogramme observé par la caméra holographique à travers le dépoli (gauche) et simulé (droite)

II.2 Évaluation des différentes sources d'erreur

L'élément critique de cette technique est le dépoli. Tout d'abord, nous avons évalué l'impact de la position du diffuseur. En effet, la simulation montre que le contraste des franges change en fonction de la position du diffuseur pour un système non stigmatique. Le diffuseur doit être le plus loin possible³ de la caustique pour avoir de bons résultats. Les résultats expérimentaux ont confirmé cette tendance (figure 5). Par contre un compromis doit être trouvé, parce que plus le diffuseur s'éloigne plus le montage devient long et plus le diamètre du dépoli augmente.

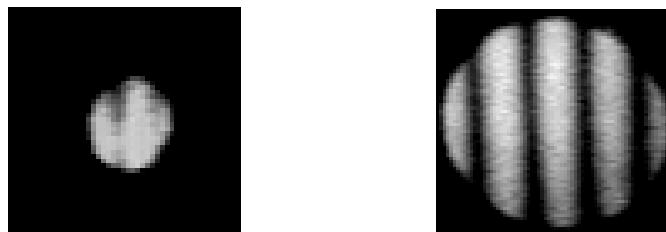


Figure 5 Impact de la position du diffuseur sur le contraste des franges. À gauche le diffuseur est à 100 mm du point focal, à droite, il est à 300 mm.

Les caractéristiques du diffuseur ne sont pas critiques. Cinq plaques de verre ont été polies avec des tailles de grains différentes. L'intensité du faisceau transmis à travers le diffuseur était différente, mais la qualité des interférogrammes était équivalente quelle que soit le dépoli.

L'évaluation du dépoli a également porté sur sa sensibilité aux vibrations et aux variations thermiques. Des acquisitions ont été réalisées en translatant le dépoli selon les 3 axes X, Y et Z en même temps que le miroir était incliné. Ceci permettait d'évaluer le contraste des franges en fonction de l'amplitude de la vibration. Selon la direction de l'axe optique (X) le dépoli peut subir une vibration d'amplitude 200 μm . Pour des vibrations selon un axe perpendiculaire à l'axe optique (Y et Z) l'amplitude des vibrations est plus critique et la limite est 10 μm . Au-dessus de ces limites, la qualité de l'image de phase n'est pas bonne et elle ne peut pas être déroulée. Cette dégradation de la qualité de l'image de phase est due à la décorrélation du speckle induite par le déplacement du dépoli.

De plus, un déplacement dans le plan du dépoli amène une contribution à la mesure du déplacement du miroir (figure 6). Cette contribution est la conséquence des variations du vecteur sensibilité dans le champ de mesure.

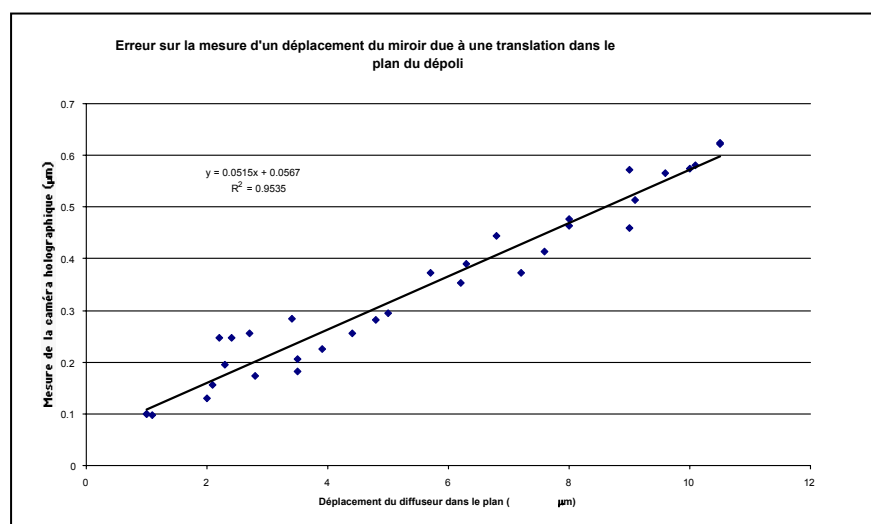


Figure 6 Influence, sur la mesure, d'un déplacement du dépoli dans son plan

L'erreur sur la mesure due à une translation de l'objectif de microscope a également été évaluée. Elle est moins importante que pour une translation du dépoli (erreur de 100 nm pour un déplacement dans le plan de 5 μm), mais une bonne stabilité mécanique est tout de même requise.

Nous avons également vérifié qu'un alignement précis de la source n'était pas nécessaire. Une erreur de ± 50 mm sur sa position initiale est acceptable.

L'objectif final étant de tester des réflecteurs, le système sera installé dans une facilité de test dans un environnement spatial et cryogénique. Il était donc important de connaître l'influence de la température sur le montage et notamment sur le dépoli. Pour cela nous avons collé une résistante chauffante en forme de couronne sur le dépoli. Pour des variations de température de l'ordre de 4 $^{\circ}\text{C}$ la caméra holographique mesure une contribution de l'ordre de 100 nm. Il sera donc nécessaire de veiller à ce que le gradient de température des éléments du montage ne soit pas trop important.

III. Certification de la méthode

Le dispositif développé sera testé sur un cas pratique afin de vérifier sa fiabilité et son bon fonctionnement. La configuration de test est présentée sur la figure 7. L'instrument et le réflecteur seront placés dans une facilité de test de 2 m de diamètre et 4.7 m de long, dans des conditions de vide et cryogénique.

Le réflecteur testé est une parabole en CFRP de 1.1 m de diamètre, F/2.8, avec une couche en or. Son comportement est connu, il a déjà été mesuré avec un interféromètre infrarouge à haute résolution également développé au CSL et un interféromètre infrarouge commercial.

Afin de réaliser ce test, la CH a été rendue compatible vide. Les deux objectifs constituant la CH ainsi que son châssis ont été adaptés de manière à ce que l'air puisse circuler. De même, une partie de la fibre optique a été adaptée et un passage de cuve a été conçu, le laser se trouvant à l'extérieur de la facilité. L'objectif de microscope a également du être modifié. Chaque élément modifié a été testé séparément sous vide afin de réaliser un test de dégazage.

Le réflecteur est placé à l'intérieur d'une tente thermique dont les panneaux sont refroidis à l'azote liquide. Le réflecteur devrait atteindre une température de l'ordre de 130 K. La CH, le dépoli et l'objectif d'illumination sont fixés sur un banc en inox qui est disposé verticalement. Ce support ainsi que celui du réflecteur sont fixés sur le banc optique de la cuve. Ils doivent être stable mécaniquement afin de limiter les erreurs de mesures et également permettre l'enregistrement et la lecture holographique. De manière à vérifier cette stabilité, un interféromètre de Michelson avec un laser He-Ne a été ajouté au système, l'un des miroirs des bras de l'interféromètre étant sur le banc en inox et l'autre sur le réflecteur.

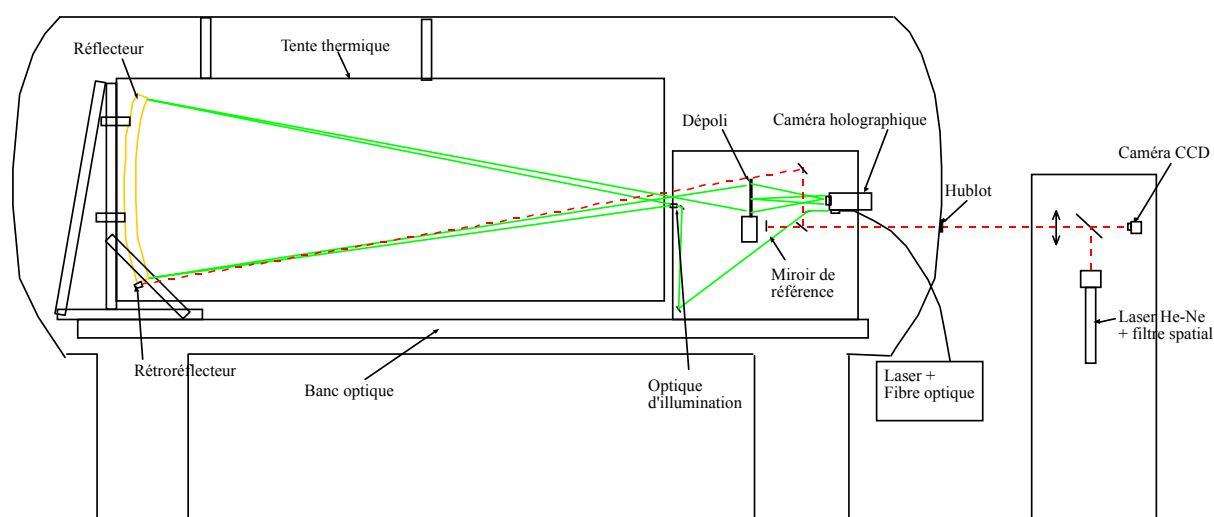


Figure 7 Schéma du test de certification

L'objectif de microscope permettant d'illuminer le réflecteur est proche du panneau thermique et doit donc être isolé. Une autre solution serait de le reculer, mais l'ouverture dans le panneau serait alors plus grande rendant l'efficacité thermique des panneaux moins importante. Une tente isolante thermiquement sera placée autour de l'instrument. Celle-ci permettra également de diminuer les variations de température au niveau de l'instrument.

Le support de l'antenne sera également soumis à des flux thermiques. Il faudra donc le réguler en température afin d'éviter tout mouvement éventuel provoqué par sa dilatation thermique. La CH mesurera donc principalement les déplacements du réflecteur et non pas ceux de son support.

IV. Conclusion

La méthode présentée a permis de démontrer que l'holographie peut être adaptée à la mesure de déplacement sur des surfaces spéculaires. L'instrument a également été adapté aux conditions vides. Il est relativement facile à mettre en œuvre, mais comme il s'agit d'une technique très sensible, la stabilité mécanique est primordiale.

Les résultats du test de certification seront présentés lors du colloque.

V. Remerciements

Cette activité a été financée par l'ESA sous le contrat 16070/02/NL/CP

VI. Références

- [1] M.P. Georges, V.S. Scaufaire, P.C. Lemaire, "Compact and portable holographic camera using photorefractive crystals. Application in various metrological problems", Appl. Phys. B 72, 761 (2001).
- [2] M. Georges, C. Thizy, V. Scaufaire, S. Ryhon, G. Pauliat, Ph. Lemaire, G. Roosen, "Holographic interferometry with photorefractive crystals : review of applications and advances techniques", Proceedings SPIE Vol. 4933 on Speckle Metrology 2003, Trondheim, Norway, 18-20 June, pp.250-255
- [3] D. Malacara, "Optical Shop Testing" 2^o edition Wiley-interscience, 1992