

Holographie digitale en infrarouge lointain en vue de la mesure de déformation de grands réflecteurs spatiaux en ambiance vide-thermique

J.-F. Vandenrijt, C. Thizy, M. Georges, P. Queeckers⁽¹⁾, F. Dubois⁽¹⁾, D. Doyle⁽²⁾

Centre Spatial de Liège, Université de Liège

Avenue du Pré Aily, 4031 Angleur – Liège, Belgique

(1) Microgravity Research Center, Université de Bruxelles

Avenue F.D. Roosevelt 50, 1050 Brussels, Belgique

(2) ESA-ESTEC, Keplerlaan 1, 2200 AG Noordwijk, The Netherlands

1. Introduction

La métrologie de déformation de réflecteurs spatiaux de grandes dimensions est une demande récurrente de l'Agence Spatiale Européenne (ESA). Il est donc de son intérêt de pousser le développement de nouvelles techniques de qualification et de validation.

Les techniques holographiques en longueurs d'ondes visibles sont couramment employées pour mesurer le déplacement ou la déformation de la surface des objets. Cependant, la faible longueur d'onde induit un critère de stabilité contraignant qui rend, dans certains cas, la mesure impossible dans de bonnes conditions. Pour parer à ces inconvénients, nous proposons l'utilisation d'une plus grande longueur d'onde afin de rendre les mesures moins sensibles aux perturbations extérieures. Pour cela, nous avons sélectionné l'utilisation du laser CO₂ émettant à 10 μm dans le domaine de l'infrarouge lointain (ou infrarouge thermique). De plus, l'utilisation d'une plus grande longueur d'onde permet d'avoir une gamme de mesure de déplacement plus grande qu'en visible. Ainsi notre technique permet de combler un creux entre, d'une part, les techniques interférométriques en visible (très petits déplacements) et les techniques basées sur l'imagerie pour les plus grands déplacements (corrélation numérique d'images, etc..).

Un des éléments les plus importants du processus holographique est l'utilisation d'un milieu d'enregistrement adéquat. Comme les matériaux photosensibles présentés dans la littérature ne nous ont pas paru suffisamment performants pour cette tâche, nous avons rapidement envisagé l'utilisation d'enregistrement numérique grâce aux détecteurs matriciels infrarouges dont les performances sont adaptées à nos besoins – comme les détecteurs à microbolomètres non refroidis très couramment rencontrés de nos jours. Dans ce papier, nous exposons les réalisations effectuées dans le cadre du projet ESA GSTP HOLODIR dédié à la métrologie de réflecteurs spatiaux par la méthode de l'holographie digitale [2] en infrarouge lointain (HDIR).

Il existe deux types de configurations de travail en holographie digitale. Une première possibilité considère l'objet spéculairement (comme en interférométrie). Cependant, dans le cas de réflecteurs sphériques et sans utilisation de lentilles correctrices, il est difficile de récupérer les rayons lumineux réfléchis. Une seconde possibilité consiste à éclairer l'objet par une source élargie et diffusante générant du speckle qui est projeté vers la surface de l'objet à tester et par un système d'imagerie classique par réflexion sur l'objet spéculaire. Ce dernier scénario a déjà été proposé par Hansen [1] qui a montré l'application de l'ESPI en lumière visible sur des miroirs. À notre connaissance, ceci n'a jamais été proposé en infrarouge lointain et en holographie digitale.

2. Validation de la technique

Dans le cadre du projet HOLODIR, nous avons étudié et comparé ces deux configurations sur des spécimens représentatifs de dimensions de l'ordre du mètre – notamment sur un réflecteur parabolique de 1,1 mètre de diamètre et 1,6 mètres de longueur focale, visible à la Figure 1 en haut. La

méthode spéculaire a rapidement été écartée à cause de la difficulté de récolter sur le détecteur la totalité des rayons lumineux réfléchis. Il apparaît, en effet, que cette récolte nécessite une optique spécifique et coûteuse. Nous avons donc implémenté la méthode de l'éclairement au moyen d'une surface diffusante.

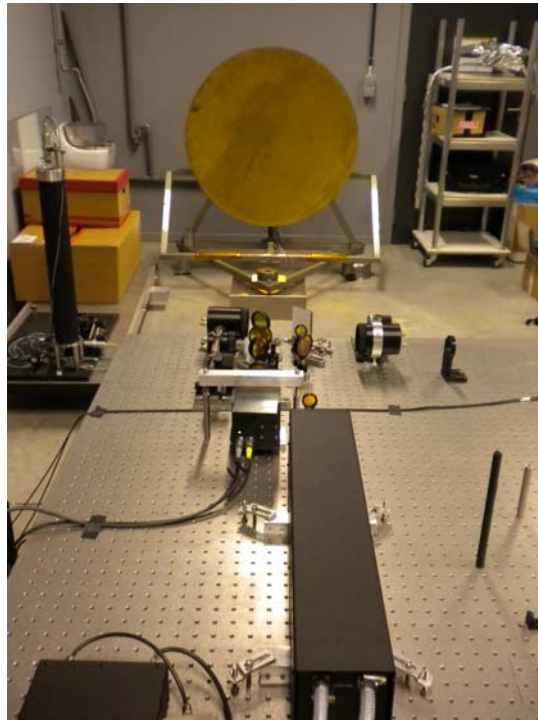


Figure 1 : Montage compact compatible avec une utilisation en cuve à vide.

Dans un premier temps, le montage optique a été réalisé en laboratoire sur une table optique et le réflecteur attaché sur un support déposé sur le sol. Le montage optique, visible aux Figure 1 et Figure 2, a été étudié afin d'être compatible avec une utilisation en environnement de vide thermique. Notamment, pour d'éviter des variations de chemin optique dus à des variations thermiques du banc optique, celui-ci a été réalisé en invar.

Ce montage optique est constitué d'un laser CO₂ fonctionnant à une longueur d'onde de 10,5 μm . Les couples de lentilles L1/L2, L4/L5, et L6/L5, constituent des systèmes afocaux. Le couple L1/L2 est utilisé pour étendre le faisceau laser. Le couple L4/L5 fait l'image du centre de courbure du réflecteur sur le détecteur. Enfin, la lentille L6 est utilisée pour compenser l'effet de la lentille L5 afin d'obtenir un faisceau référence faisceau collimaté au niveau du détecteur. Le speckle est produit au moyen d'un diffuseur (noté D) composé d'une plaque d'Invar recouvert de poudre diffusante, illuminé de façon étendue à travers la lentille d'éclairement L3. Un miroir placé sur un translateur piezoélectrique (noté MPZT) est utilisé pour réaliser le décalage de phase. L'enregistrement des images est réalisé au moyen d'une caméra thermographique VarioCam de la société InfraTec, équipée d'un détecteur à microblomètres de 640×480 pixels, utilisée sans objectif. Un exemple de mesure HDIR réalisé au moyen de ce dispositif est montré à la Figure 3.

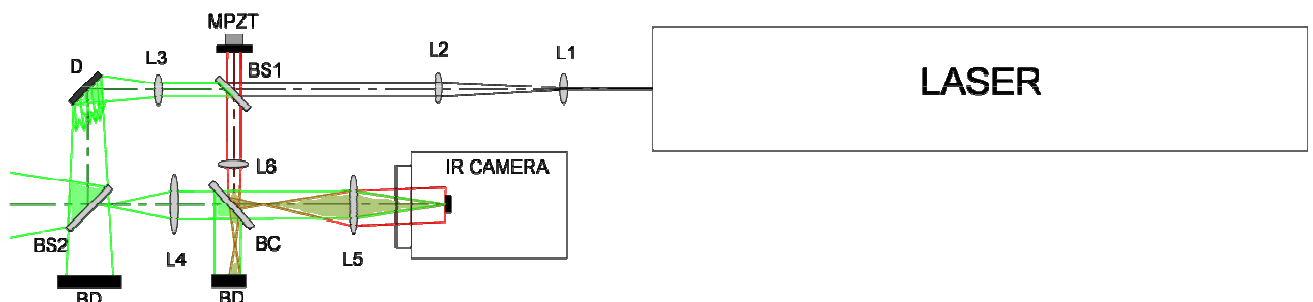
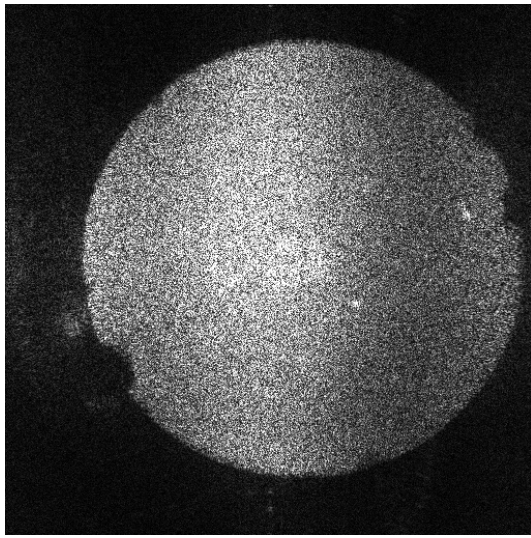
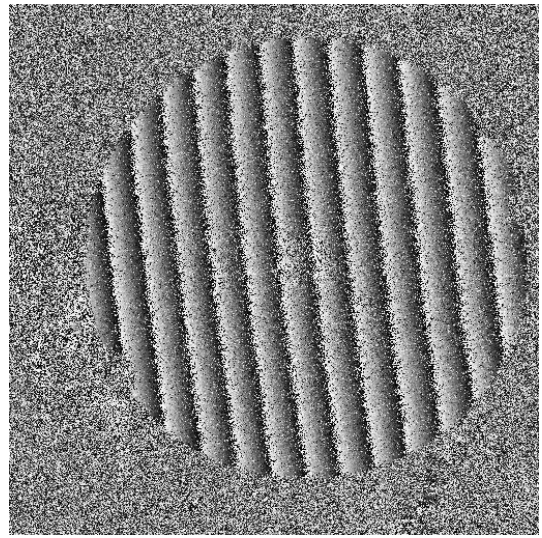


Figure 2 : Montage optique HDIR.



(a)



(b)

Figure 3 : Exemple d'observation réalisé avec la configuration optique de la Figure 2 : (a) reconstruction de l'image du réflecteur en module, (b) différence de phase mesurée pour une rotation du réflecteur.

Afin de confirmer les mesures réalisées par le système HDIR et valider la technique, nous avons mesuré la composante du vecteur sensibilité le long de l'axe optique. Pour cela, le réflecteur a été déplacé le long de l'axe optique et ce déplacement a été mesuré en parallèle par 3 instruments LVDT. Pour la mesure d'objet spéculaire, le vecteur sensibilité est toujours normal à la surface de l'objet, son estimation numérique est donc aisée. À la Figure 4, nous comparons la composante du vecteur sensibilité ainsi mesurée avec le résultat attendu numériquement.

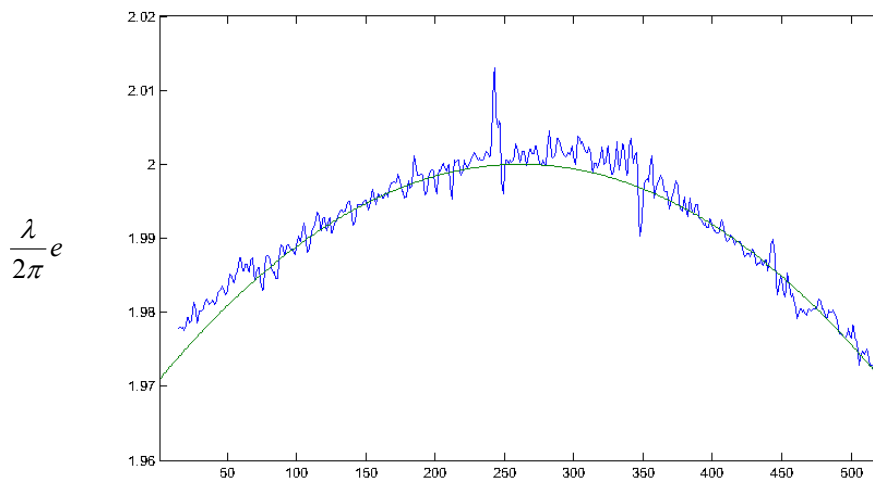


Figure 4 : Comparaison de la composante du vecteur sensibilité le long de l'axe optique telle que mesurée par HDIR (en bleu) avec la valeur attendue, calculée numériquement (en vert).

Ensuite, nous avons estimé la précision de mesure en réalisant une série de rotations, avec une mesure parallèle réalisée au moyen d'un interféromètre visible commercial dont la précision de mesure a été évaluée à $\pm 0,1$ arcsec. Cette précision de mesure nous donne, dans le cas du réflecteur étudié, une précision sur la mesure du déplacement de $\pm 0,5 \mu\text{m}$.

Les résultats obtenus, visible à la Figure 5, montrent que les mesures réalisées par HDIR sont bien similaires aux mesures réalisées avec l'interféromètre commercial pour les angles inférieurs à 40 arcsec. Au-delà, la densité de frange devient trop importante et ne permet plus de réaliser le déroulage de phase de façon satisfaisante. Ces séries de mesures nous ont permis d'estimer que la précision sur la mesure de déplacement réalisée par notre montage HDIR se situe entre $0,5$ et $1 \mu\text{m}$, pour une largeur de frange supérieure à 15 pixels/frange.

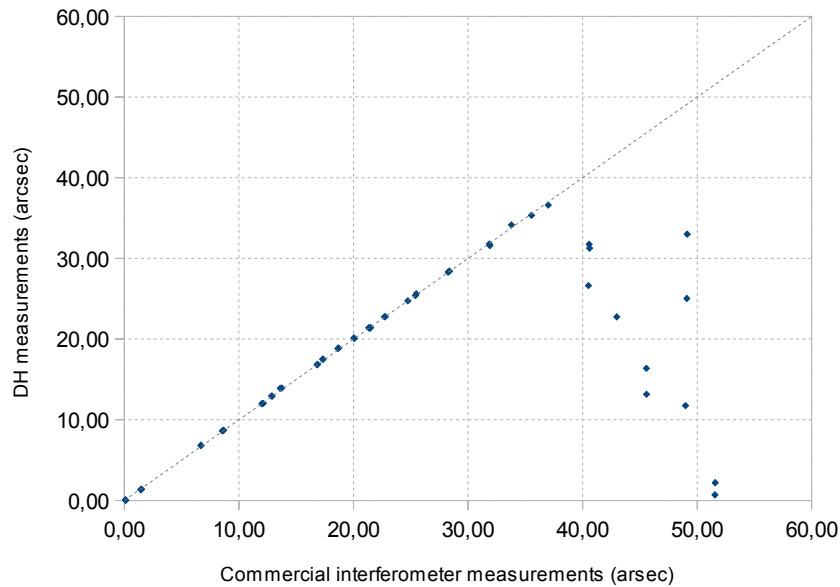


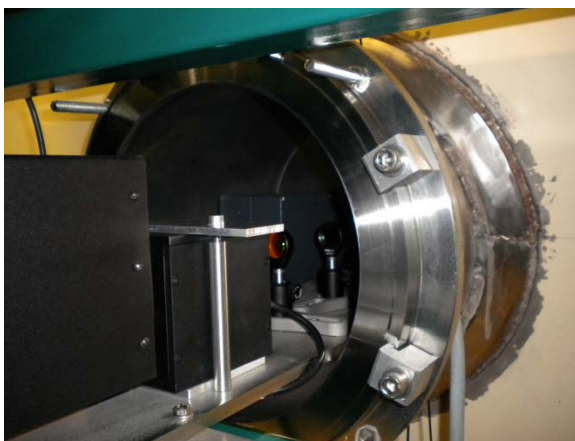
Figure 5 : Comparaison de l'angle de rotation mesuré par holographie digitale infrarouge.

3. Mesure de déformation du réflecteur parabolique à température cryogénique

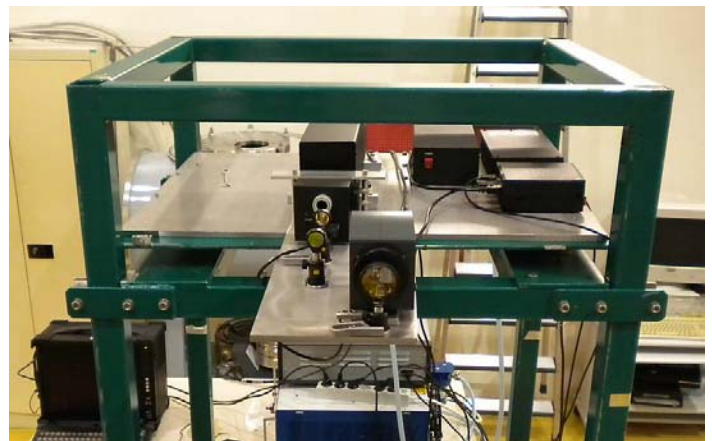
Suite à la validation de la mesure en laboratoire, nous avons implémenté le montage optique dans une cuve à vide du Centre Spatial de Liège (CSL), afin de mesurer la déformation du réflecteur à température cryogénique. Ce test est représentatif des tests de qualification réalisés par l'ESA sur les réflecteurs spatiaux. Cet environnement est connu pour présenter un niveau de vibration important – celui-ci ayant rendu impossible les tentatives précédentes de métrologie en optique visible sur le même réflecteur parabolique.

Le montage optique de la Figure 2 a été séparé en deux parties. Une première partie contenant le laser et la caméra, ne fonctionnant pas sous vide, ainsi que le couple de lentilles L1/L2 et la lentille L5 a été disposé sur une plaque en inox fixée à une tour optique en dehors de l'environnement sous vide (voir Figure 6a et Figure 6b). La plaque en inox dépasse de la tour afin de rentrer dans une bride de la cuve équipée de deux fenêtres en séléniure de zinc (ZnSe). Le faisceau laser est introduit dans la cuve à vide à travers la première fenêtre et l'interférence produite est observée par la caméra à travers la seconde fenêtre.

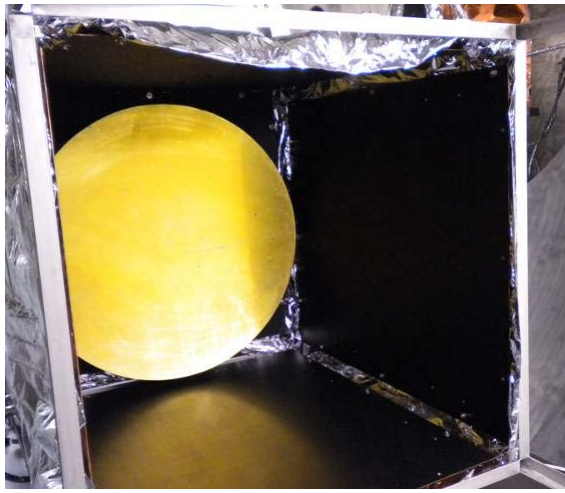
La seconde partie du montage optique est située à l'intérieur de la cuve sur le banc optique en invar. Ce dernier est placé en face de la bride (voir Figure 6d à gauche). De l'autre côté du banc se trouve l'environnement froid (voir Figure 6d à droite) composé de panneaux de refroidissement à l'azote liquide entourant le réflecteur (voir Figure 6c). Ce dernier est observé à travers un trou dans le revêtement multicouche isolant entourant les panneaux (voir Figure 6d à gauche).



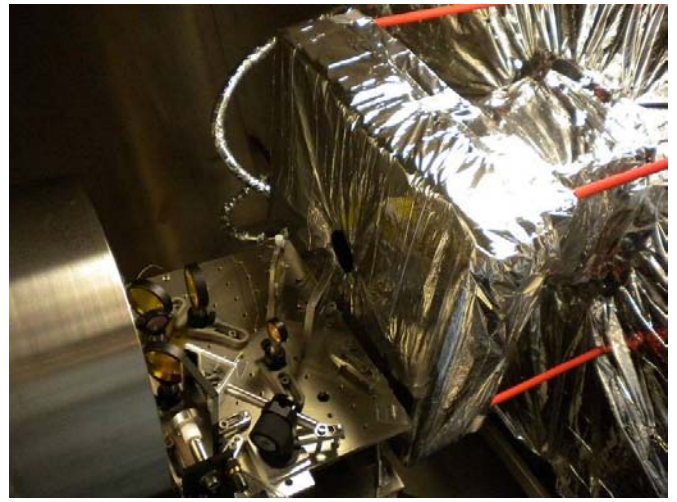
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 6 : Photos du montage optique dans la cuve à vide FOCAL5 du Centre Spatial de Liège. (a) Banc optique en inox, à l'extérieur de la cuve, rentrant dans la bride. (b) Banc optique en inox, à l'extérieur de la cuve, vu de face. (c) Réflecteur entouré des panneaux de refroidissement. (d) Banc optique en invar, à l'intérieur de la cuve, placé entre la bride (à gauche) et l'environnement froid (à droite).

Un exemple de déphasage mesuré au cours du refroidissement du réflecteur, correspondant à un refroidissement de 73 K est montré à la

Figure 7. La mesure de la déformation du réflecteur entre la température ambiante sous vide (295 K) et le point de refroidissement maximal (107 K) est montrée à la Figure 8. Cette dernière a été obtenue en combinant 3 mesures de déphasage successif – ce qui nous donne une précision de mesure située entre 1,5 et 3 μm . Cette mesure a été comparée avec la même mesure réalisée quelques années auparavant avec un interféromètre infrarouge de précision supérieure. Cette comparaison montre un écart de 1,7 μm RMS entre les deux mesures réalisées, ce qui est en accord avec la précision de mesure estimée pour la technique HDIR.

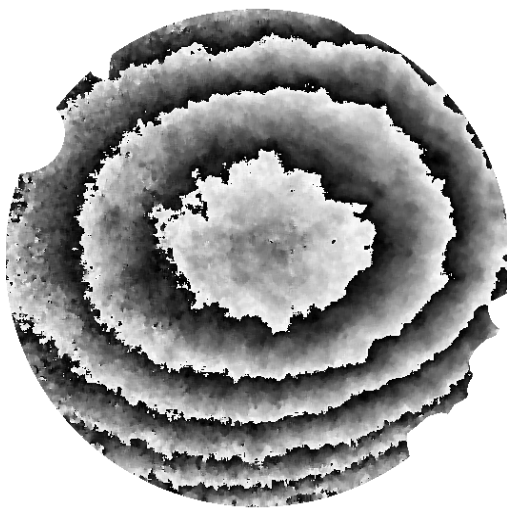


Figure 7 : Déphasage mesuré pour un refroidissement de 73 K.

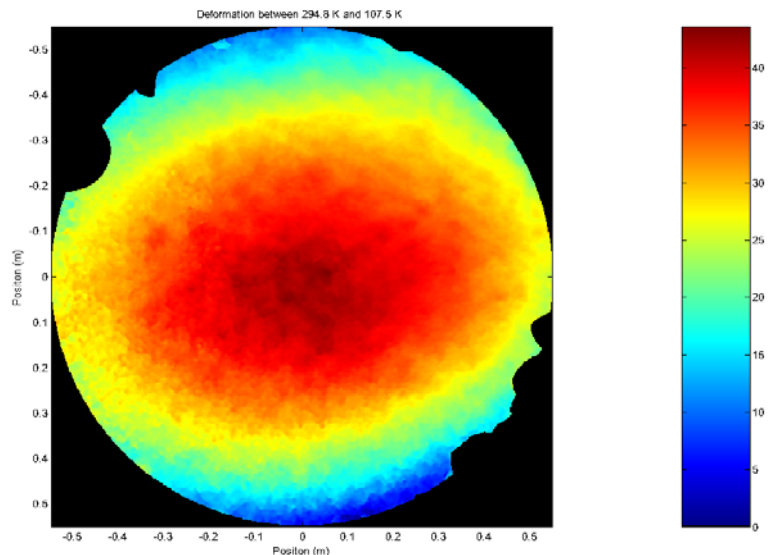


Figure 8 : Déformation du réflecteur (en μm) à 107 K par rapport à sa forme à 295 K, soit un refroidissement de 188 K.

4. Conclusions

Dans cet article, nous avons présenté la technique de l'holographie digitale en infrarouge lointain avec projection de speckle pour l'observation de réflecteurs spatiaux en environnement de vide thermique. Nous avons montré que la technique fonctionnait bien en laboratoire et estimé la précision

des mesures réalisées. Nous avons ensuite réalisé une démonstration représentative d'un test réel de mesure, tel que réalisé par l'ESA, pour la mesure de la déformation d'un réflecteur parabolique de 1,1 m de diamètre en environnement cryogénique. La mesure réalisée a été confirmée comme correcte en la comparant à une mesure identique réalisée au moyen d'un instrument plus précis. L'écart entre les deux mesures étant inférieur à la précision estimée de notre instrument, le test réalisé démontre le bon fonctionnement de l'instrument HDIR développé.

Ce nouvel instrument de mesure vient remplir un besoin exprimé par l'ESA. Il présente l'avantage d'une faible contrainte en stabilité ainsi qu'un montage optique entièrement réalisé au moyen d'éléments optiques standard (COTS) – ce qui le rend moins onéreux qu'un interféromètre infrarouge utilisant une null-lens. L'utilisation d'un diffuseur pour produire le speckle rend également cet instrument beaucoup plus tolérant vis-à-vis des formes de réflecteur envisageable. Il est ainsi possible d'envisager son utilisation pour la mesure de réflecteur de formes complexes, tels qu'utilisés pour les antennes de satellites de télécommunication (comme illustrée à la Figure 9 ci-dessous), ce que ne permet pas un interféromètre classique.

HOLODIR est un projet GSTP ESA réalisé par le Centre Spatial de Liège, en collaboration avec le *Microgravity Research Center* de l'Université de Bruxelles.

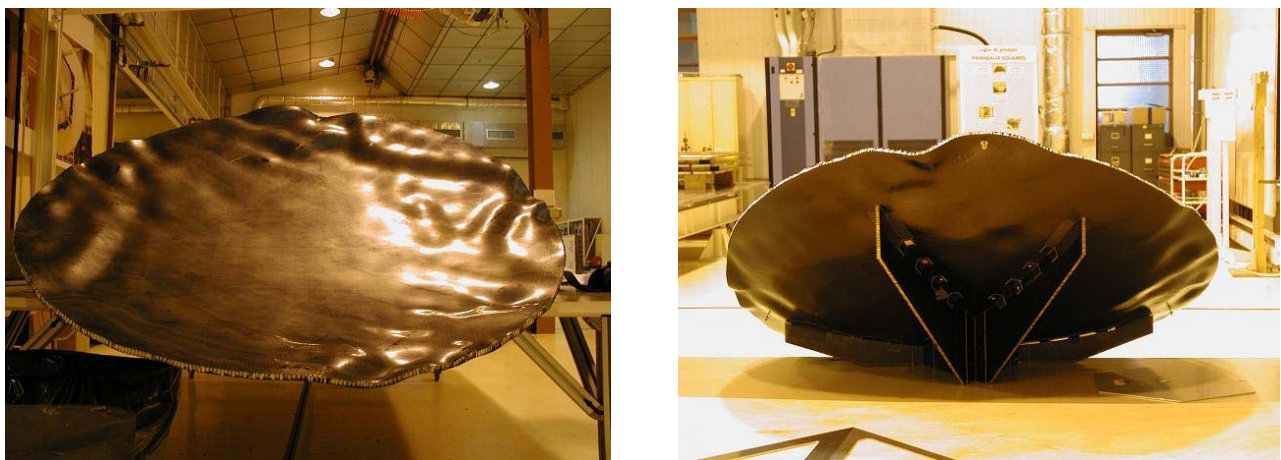


Figure 9 : Antenne en bande-K développée par EADS.

5. Bibliographie

1. P. Picart, J. Leval, "General theoretical formulation of image formation in digital Fresnel holography", *J. Opt. Soc. Am. A* 25, p. 1744-1761 (2008).
2. R.S. Hansen, "A compact ESPI system for displacement measurements of specular reflecting or optical rough surfaces", *Opt. Las. Eng* 41, p. 73-80 (2004)