

Imageur de Fresnel pour observations à haute Résolution Angulaire et haute dynamique

(L.Koechlin, D.Serre, P.Deba,)

¹Observatoire Midi Pyrénées, Toulouse, France

Ce projet concerne un imageur spatial qui focalisera la lumière par diffraction. Initialement pensé pour l'imagerie d'exoplanètes (1), c'est en fait un instrument d'imagerie à relativement grand champ dont le domaine d'application se rapproche de celui d'un télescope classique, tout en gardant des capacités de haute dynamique pour les objets compacts.

Principe

L'imageur de Fresnel est composé de deux vaisseaux volant en formation. L'optique primaire portée par l'un des deux est une grille de Fresnel qui peut être vue soit comme un réseau d'interféromètres, soit comme un instrument mono-ouverture. Il s'agit d'une grille formée d'un très grand nombre d'ouvertures rectangulaires : plusieurs dizaines ou centaines de milliers. Chaque ouverture peut être considérée comme faisant partie d'un réseau interférométrique, mais le fait qu'elles soient vides (ne contiennent aucun élément optique) et que la focalisation se fasse par diffraction en rapproche le fonctionnement d'un réseau zoné de Fresnel (ou de Soret) (2).

La fonction à une dimension définissant la transmission du réseau est définie de la façon suivante :

$$g(d) = 1 \text{ si } \sqrt{d^2 + f^2} \in \left[\left(\frac{f}{m\lambda} + (k - \text{off}) + \frac{1}{2} \right) m\lambda; \left(\frac{f}{m\lambda} + (k - \text{off}) + 1 \right) m\lambda \right[$$

$$g(d) = 0 \text{ sinon.}$$

d : distance du point d'intérêt à l'axe optique,

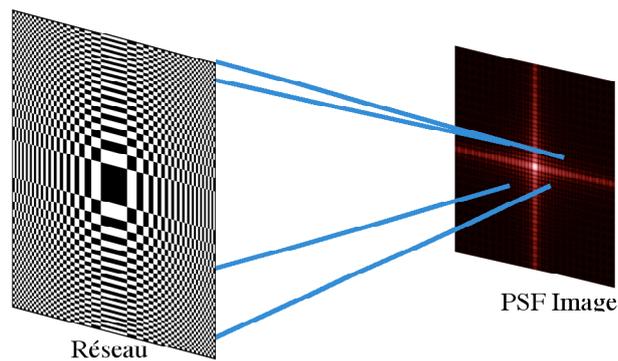
f : distance focale de l'imageur à λ_{ref} ,

m : ordre de diffraction d'intérêt (1 dans notre cas),

k : l'indice de la zone de Fresnel (entier),

off : un offset permettant l'ajustement de la largeur de la zone centrale.

Cette fonction de transmission en tout ou rien est étendue à deux dimensions par produit cartésien et donne un réseau en forme de damier à pas variable, qui crée un front d'onde sphérique à l'ordre 1 et donc focalise une partie (4 à 6%) de la lumière incidente. Le reste de la lumière est soit intercepté par les parties opaques de la grille, soit transmis sans focalisation (ordre 0) soit divergent (ordre -1). La lumière transmise dans les ordres supérieurs de diffraction est négligeable. Pour les objets compacts observés en haute dynamique, leur contribution ainsi que celle des ordres 0 et -1 est bloquée par des masques dans l'optique au foyer. Pour les objets étendus ils ne sont pas bloqués mais seul l'ordre 1 étant focalisé, la contribution des autres ordres de diffraction ne nuit pas aux capacités d'imagerie standard.



L'image a la même résolution angulaire qu'avec une ouverture pleine..

Points communs et différences par rapport aux instruments classiques

-Si l'on considère le réseau primaire comme un interféromètre, les milliers de faisceaux issus des ouvertures individuelles sont recombinaés et forment une image sans nécessiter une optique dédiée pour chacun d'eux. Une seconde optique diffractive (de petites dimensions) travaillant à l'ordre -1 dans un plan pupille, associée à une optique convergente est cependant nécessaire pour corriger le chromatisme au foyer primaire.

-Le nombre élevé d'ouvertures permet l'imagerie à grand champ (3).

-La qualité du front d'onde est peu limitée par la précision de positionnement des ouvertures dans le réseau primaire. La précision requise (indépendante de la longueur d'onde) pour obtenir un front d'onde à $\lambda / 50$ est de l'ordre de quelques dixièmes de millimètres dans le plan du réseau, et quelques centimètres selon l'axe optique.

-La figure de diffraction obtenue au foyer est de même dimension (de même résolution angulaire) que celle d'une ouverture pleine remplissant toute la surface du réseau. Elle est cependant moins lumineuse : 4 à 6% seulement de celle d'une ouverture pleine. Elle est flanquée de quatre aigrettes perpendiculaires, au lieu d'anneaux pour une ouverture circulaire, ce qui permet l'imagerie à haute dynamique d'objets compacts : la lumière parasite n'étant plus répartie dans les anneaux de diffraction mais confinée dans les aigrettes. Ces aigrettes peuvent cependant contribuer à une baisse de la dynamique dans le cas d'objets très étendus angulairement. Ce défaut est partiellement supprimé en appliquant une apodisation : transmission variable du centre vers le bord de la pupille.

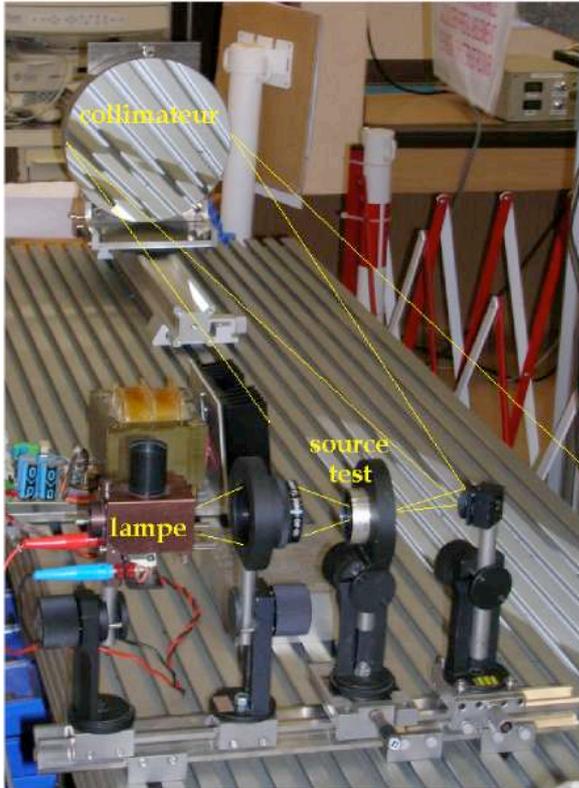
-Pour les grands réseaux les distances focales sont très longues : de quelques centaines de mètres à quelques dizaines de km selon la longueur d'onde et la taille du réseau primaire. Cela implique le vol en formation dans l'espace.

Synthèse

Les réseaux de Fresnel ouvrent la voie à de très grandes ouvertures dans l'espace. La comparaison avec des instruments utilisant de grands miroirs devra se faire à budget égal : malgré sa moindre transmission un réseau de Fresnel de grandes dimensions pourrait donner plus de luminosité, car plus grand et plus facile à construire, qu'un télescope monolithique. A cause de sa grande dimension la résolution angulaire serait meilleure d'un facteur 3 ou 4. Les dimensions proposées seraient de 1 à 3 m pour un système probatoire dans l'espace, de 3 à 30 m ou plus pour un instrument nominal.

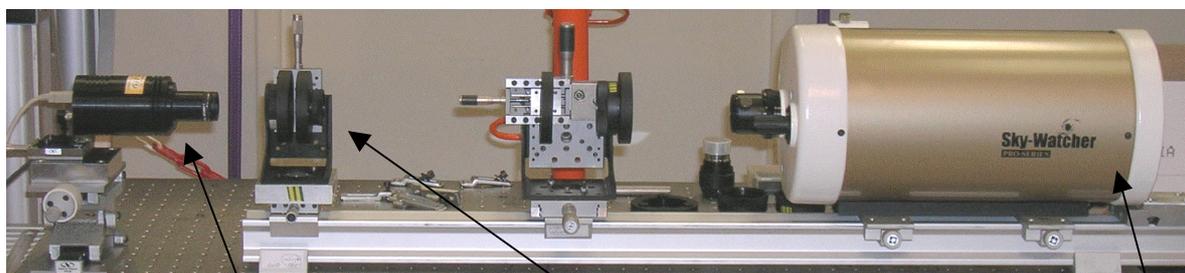
Tests de validation en laboratoire

Nous avons construit un prototype de 8 cm de côté et 22 m de focale pour tester le concept en salle blanche à l'OMP. Son réseau primaire de 26680 ouvertures a été conçu et sa forme calculée dans notre laboratoire. Le temps de découpe dans une feuille d'acier a été de 4 heures sur une machine-outil équipée d'un laser UV industriel. Les sources test imagées sont placées au foyer d'un collimateur qui renvoie le faisceau parallèle sur le réseau primaire.



Réseau primaire carré de 80 mm gravé dans une feuille d'acier de 80 μm servant aux tests optiques.
58 zones de Fresnel, 26 680 ouvertures.

Le réseau secondaire de correction chromatique au plan pupille a été conçu et calculé dans notre équipe, puis gravé par une entreprise sur une lame à faces parallèles en silice fondue.



Camera
au foyer final

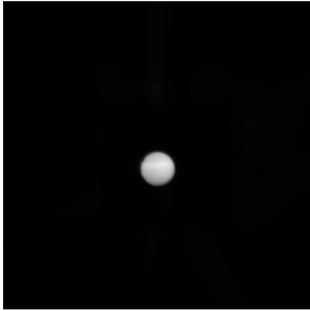
Plan pupille P où sont placées les optiques
d'achromatisation

Optique au foyer

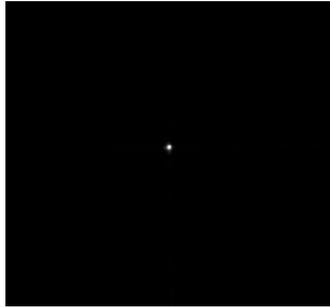
Télescope diaphragmé à 3 cm
servant d'optique de champ
reimageant le réseau primaire
dans un plan pupille P.

Les images obtenues avec une source quasi ponctuelle montrent qu'on atteint la résolution théorique.

Premières images sur des mires



Disque uniforme 32'' d'arc



Source quasi ponctuelle

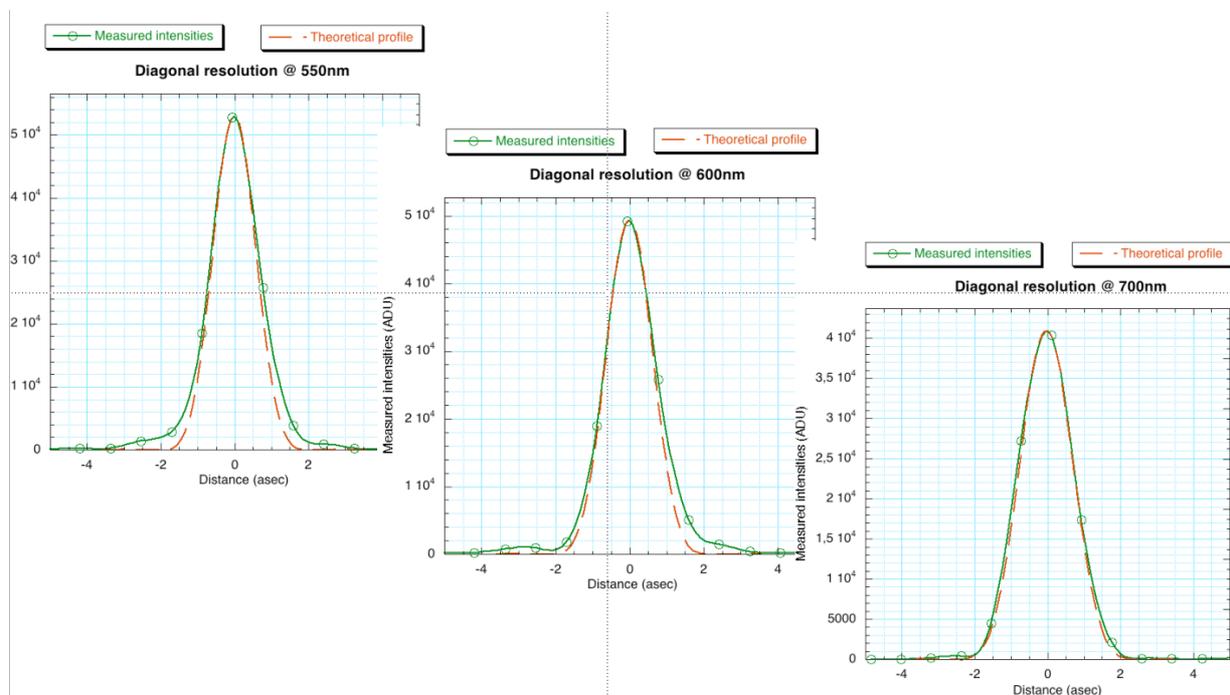


Mire en forme de galaxie
73 '' d'arc

Ces images corrigées du chromatisme sont obtenues à large bande spectrale (source halogène non filtrée) sur des mires découpées dans un film d'acier placées au foyer du collimateur. Une caméra ccd est placée au foyer final de l'ensemble réseau primaire - optique de champ.

Résultats des tests de résolution angulaire

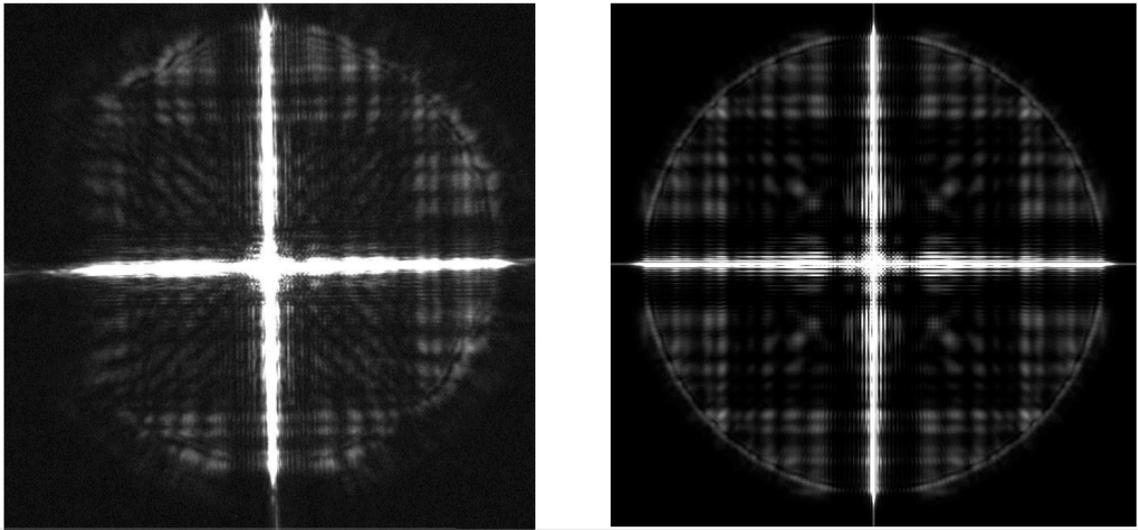
La résolution angulaire de la grille a été testée avec une source résolue de diamètre angulaire suffisamment petit pour être faible devant la rayon de la figure de diffraction : trou de 5 microns donnant une image géométrique de 0,8 secondes d'arc. Les figures suivantes montrent la comparaison à l'image mesurée à différentes longueurs d'onde. Les écarts vus à 600 et surtout 500 nm sont dus à la turbulence de l'air dans la salle blanche où se sont faites les mesures.



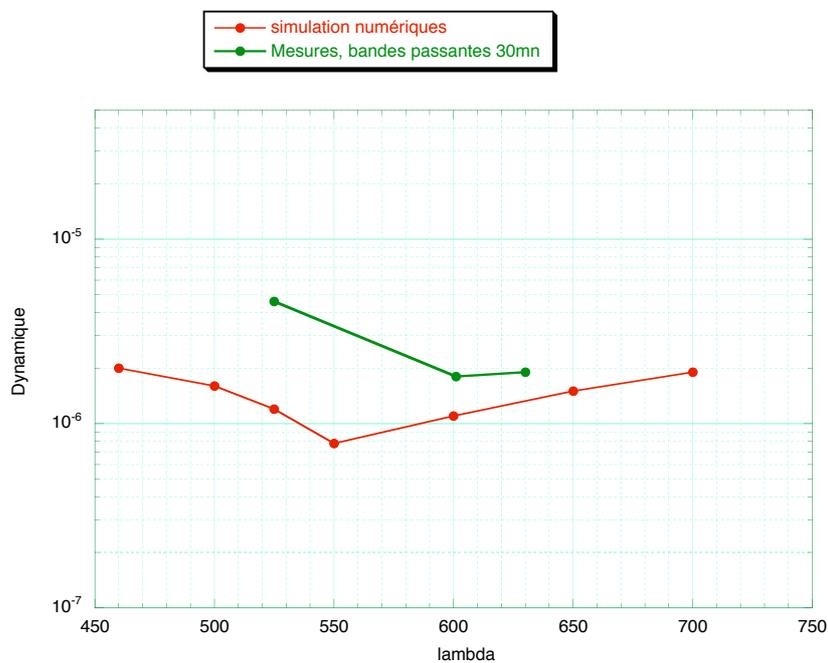
Images d'un disque uniforme de 0,36 secondes d'arc (trou de 5 microns), comparaison à 550, 600 et 700 nm de gauche à droite. On voit que les profils d'image mesurés (traits pleins verts) sont très proches de la résolution théorique calculée par convolution de la PSF avec le disque uniforme (pointillés rouges).

Résultats des tests de dynamique

Le logiciel développé par Denis Serre calcule par propagation de Fresnel l'onde traversant les éléments optiques du prototype : focalisation par diffraction,, optique de champ, masques. La simulation numérique (à droite dans la figure suivante) tient compte de l'étendue spectrale des sources et donne une image très proche de celle enregistrée avec la caméra (à gauche).



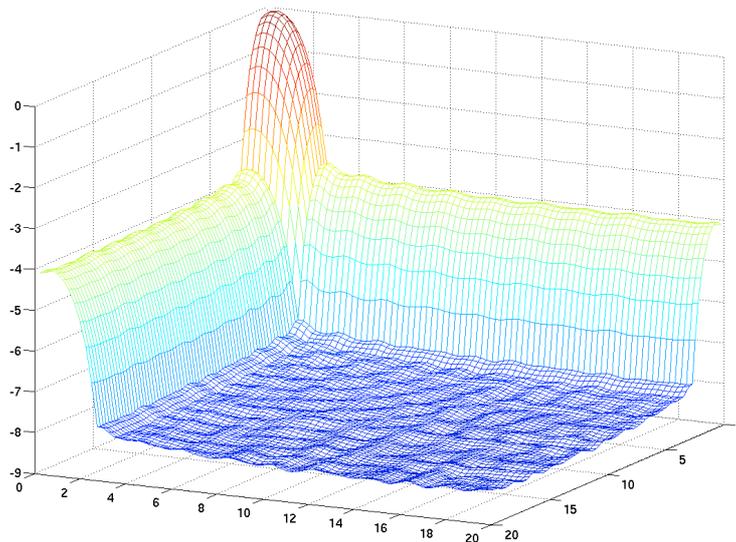
L'image de gauche a été obtenue en multipliant par 1000 le temps de pose nominal de la caméra. La lumière diffusée (hors pic central et aigrettes) est à $2 \cdot 10^{-6}$ de la luminosité du pic central sur les images données par le prototype. L'image de droite est simulée numériquement pour la même optique. La dynamique y est de 10^{-6} .



Comparaison entre les dynamiques obtenues et les valeurs calculées par simulation numérique de propagation de front d'onde

La dynamique correspond ici au rapport entre la valeur moyenne de la lumière diffusée dans le champ en dehors du pic central et des aigrettes de l'image d'un point brillant, et la luminosité au point le plus brillant du pic central.

Le réseau utilisé pour ces premiers tests n'a que 58 zones de Fresnel (soit 26680 ouvertures). Pour les étapes suivantes, nous prévoyons des nombres de Fresnel de 300 à 600 au lieu de 58. Des simulations numériques sont en cours pour évaluer l'accroissement de la dynamique en fonction du nombre de Fresnel, qui, sous réserve de confirmation des résultats pourrait dépasser 10^7 .



Simulation (par D.Serre) de la dynamique pour un quart de champ avec un réseau de Fresnel apodisé Prolate. Le pic central de la PSF est normalisé à 1. En ordonnée le log de la brillance, en abscisses la position dans le champ, en nombres de rayons d'Airy. Afin de ne pas réduire la transmission, l'apodisation devra être réalisée au plan pupille par « Phase-Induced Amplitude Apodization » type Guyon (4).

Action au sein de la communauté astronomique

Le financement futur de ce projet spatial passe obligatoirement par un soutien de la communauté astronomique, dépassant le cadre national. Nous travaillons à la création d'un groupe de collaboration scientifique sur l'imageur de Fresnel, auprès de nos collègues des Observatoires Midi-Pyrénées, Paris Meudon, Marseille et de la Côte d'Azur, entre autres, pour essayer de les convaincre de consacrer une partie de leur temps à un groupe de travail qui définirait les missions d'un tel imageur dans leurs domaines de compétence respectifs. L'échéance de l'appel « Cosmic Vision » de l'ESA est pour nous très importante.

Nous sommes cinq personnes travaillant actuellement sur le projet : trois à l'OMP et deux au CNES. Les collègues que nous avons contactés sont tous favorables et nous soutiennent, mais il y a un pas entre un soutien formel et une collaboration active pour un projet qui n'est pas celui sur lequel on travaille. Nous comprenons cela d'autant mieux que nous réagissons nous-mêmes souvent de la même façon vis-à-vis de nombreuses sollicitations. Comment faire ? Nous ne sommes pas des spécialistes de la « com » ni des adeptes du prosélytisme, nous tentons diverses stratégies dont celle-ci : investiguer nous-mêmes les divers domaines d'applications possibles (imagerie stellaire & circum-stellaire, planéto, exoplanètes, galaxies) et proposer des collaborations pour des observations avec un prototype de deuxième génération, pas encore spatial, mais pouvant déjà pointer le ciel.

La focale d'un instrument démonstrateur réalisable au sol (avec financement CNES) serait de l'ordre de 20 m maximum si l'on veut pouvoir pointer directement le ciel, ce qui limite l'ouverture à 20 cm et ne permettra donc probablement pas de résultat novateur en astrophysique. Nous comptons tout de même tenter des mesures à haute dynamique qui n'ont jamais été faites avec des ouvertures si petites, en attendant les grandes ouvertures dans l'espace.

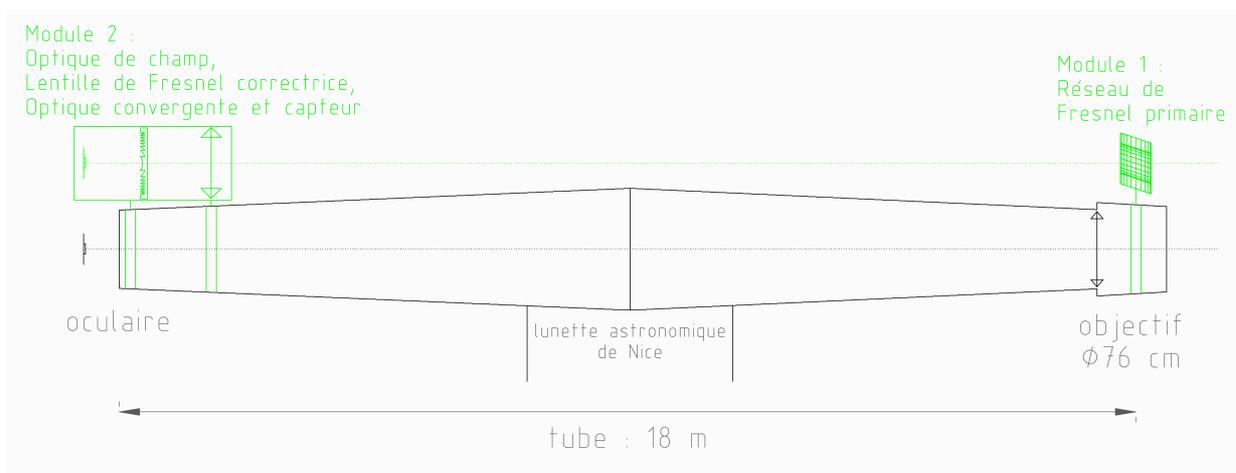
Nous n'avons pas retenu l'option d'un sidérostas car elle paraît trop lourde à mettre en œuvre. En France, seule la grande lunette de l'Observatoire de Nice serait assez longue pour servir de support à un prototype d'Imageur de Fresnel de focale 20 mètres. Les deux modules : réseau primaire et optique focale seraient fixés par des colliers à chaque extrémité du tube. La lunette servant de support pointerait dans la même direction que l'imageur. La fixation des deux modules au-dessus du tube pendant la mission n'en perturbera pas le fonctionnement.

Les flexions et la turbulence rendront nécessaires une partie des automatismes d'un vol en formation, et donc possible le test d'une partie des systèmes de pointage et d'attitude d'une future mission spatiale.

Le but de cette mission d'observation sera principalement de valider l'imageur sur des cibles astrophysiques dans le visible ou proche IR, et de mesurer ses performances dans différents modes : dynamique sur des binaires à grande différence de magnitude, capacités imagerie à grand champ sur des surfaces planétaires et objets extragalactiques brillants, résolution angulaire sur des amas d'étoiles et des petits objets du système solaire. Par exemple : le couple binaire Sirius A-B dont la différence de magnitude est supérieure à 8, et/ou les satellites de Mars, mettraient à l'épreuve les performances en dynamique et résolution angulaire de cet imageur de 20 cm d'ouverture.

Voici un exemple de dimensionnement calculé avec le simulateur développé à l'OMP :

Longueur du côté du réseau primaire (C_{gr})	Nombre de Fresnel (N)	Distance focale de l'imageur (à $\lambda=0,7\mu\text{m}$)	Résolution angulaire	Dynamique visée
200 mm	350	20,4 m	0,7 " d'arc	$> 10^6$



Principe de fixation du nouveau prototype d'imageur de Fresnel (en vert) sur la lunette. Les deux axes optiques, pour la lunette et l'imageur de Fresnel, seraient parallèles afin de pointer le même objet et de comparer les images obtenues.

Conclusion

Ce projet d'imageur en est à ses débuts. L'idée initiale de la grille date de 2004, et a donné lieu à une thèse de doctorat qui s'achève en 2007. Seule une large justification de l'intérêt astrophysique du projet dans le cadre de la détection d'exoplanètes (1) et aussi hors de ce cadre permettra son financement et son développement.

Références

- (1) L.Koechlin, D.Serre, and P.Duchon, "High resolution imaging with Fresnel interferometric arrays: suitability for exoplanet detection" *A&A* **443**, 709-720 (2005)
- (2) Soret, J. L. 1875, *Ann. Phys. Chem.*, **159**
- (3) L.Koechlin, J-P. Perez : "A limit in Field-resolution ratio for interferometric arrays", Wesley A. Traub, Editor *SPIE Proc Vol. 4838* 411-415, "Interferometry for optical astronomy, II" Hawaii, aout 2002
- (4) Guyon, O., Pluzhnik, E., Galicher, L., et al. 2005, *ApJ*, 622, 744