

International Conference on Space Optics—ICSO 1997

Toulouse, France

2–4 December 1997

Edited by George Otrio



Coronographie interférentielle pour la mission spatiale DARWIN: expérience de validation en laboratoire

*Marc Ollivier, Jean-Marie Mariotti, Jacqueline Brunaud,
Guy Michel, et al.*



icso proceedings



International Conference on Space Optics — ICSO 1997, edited by Georges Otrio, Proc. of SPIE Vol. 10570,
105700P · © 1997 ESA and CNES · CCC code: 0277-786X/18/\$18 · doi: 10.1117/12.2326463

CORONOGRAPHIE INTERFÉRENTIELLE POUR LA MISSION SPATIALE DARWIN EXPÉRIENCE DE VALIDATION EN LABORATOIRE

Marc OLLIVIER⁽¹⁾, Jean-Marie MARIOTTI^(2,3), Jacqueline BRUNAUD⁽¹⁾, Guy MICHEL⁽⁴⁾, Patrick BOUCHARÉINE⁽⁴⁾, Alain LÉGER⁽¹⁾, Guy ARTZNER⁽¹⁾, Fabien MALBET⁽⁵⁾, Pascal PUGET⁽⁵⁾, Vincent COUDÉ DU FORESTO⁽³⁾, Bertrand MENNESSON⁽³⁾

⁽¹⁾ IAS Bât 121, Université de Paris-Sud, F 91405 ORSAY

⁽²⁾ now at European Southern Observatory Garching

⁽³⁾ Département de Recherche Spatiale de l'Observatoire de Paris (Meudon)
Institut d'Optique Théorique et Appliquée

⁽⁵⁾ Laboratoire d'Astrophysique de l'Observatoire de Grenoble UMR UJF/CNRS 5571

RÉSUMÉ - La mission DARWIN a pour objet la détection directe de planètes telluriques autour d'étoiles proches, puis leur étude spectroscopique avec l'objectif majeur d'y rechercher d'éventuelles *signatures de Vie* (primitive). La principale difficulté réside dans le formidable contraste de luminosité entre l'étoile et son (ses) éventuelle(s) planète(s) tellurique(s). Le concept de mission repose sur la réjection, par interférométrie en frange noire, de la lumière de l'étoile. C'est ce concept que nous cherchons à valider en laboratoire. Nous voulons démontrer la possibilité de construire un interféromètre en frange noire avec un taux de réjection très élevé (10^6). Nous indiquons les principaux obstacles à vaincre.

ABSTRACT - *The DARWIN mission aims at directly detecting telluric planets around nearby stars, then performing a spectral analysis. Its primary goal is to research possible primitive Life signatures. The major difficulty is the huge luminosity contrast between the star and its possible telluric planet(s). The mission concept is based on the rejection by nulling interferometry of the star light. This concept will to be validated in laboratory experiments. We wish to demonstrate the feasibility of building a high rejection rate (10^6) nulling interferometer. We indicate the major difficulties to be solved.*

1 - INTRODUCTION

Depuis quelque temps, on voit apparaître de nouveaux instruments d'observation astronomique, qui conjuguent haute résolution angulaire et dynamique élevée. Ces instruments tels le coronographe stellaire décrit par Beuzit et al. [Beuz 97] sont particulièrement adaptés à l'étude de l'environnement des objets très brillants (disques circumstellaires par exemple)

La mission DARWIN, pré-sélectionnée par l'Agence Spatiale Européenne (ESA) pour son

programme Horizon 2000+, est un observatoire infrarouge dédié principalement à la recherche et à l'étude des exo-planètes (planètes orbitant autour des étoiles voisines du Soleil). En mesurant le spectre de ces éventuelles exo-planètes dans une gamme de longueurs d'onde allant de 6 à 18 μm , avec une résolution de 20 environ, DARWIN sera en mesure de révéler la présence dans leur atmosphère, de dioxyde de carbone (CO_2 , bande à 15 μm), caractéristique des planètes telluriques, d'eau (H_2O , bande à 6-8 μm), caractéristique des planètes habitables, et d'ozone (O_3 , bande à 9,6 μm) comme indicateur de la présence d'oxygène (O_2) et comme traceur de Vie Primitive [Lége 96]. Darwin est un observatoire interférométrique à ondes multiples (5 à 6 télescopes) fonctionnant en mode coronographique. Ce mode de fonctionnement, appelé également interférométrie en frange noire, est basé sur le concept de coronographe interférométrique à deux ouvertures proposé par Bracewell [Brac 78].

Le coronographe interférométrique de Bracewell est capable de séparer le flux lumineux de deux objets très proches angulairement (typiquement 0.1 seconde d'angle). Le principe d'un tel instrument à deux télescopes est décrit sur la figure 1. Chaque télescope individuellement ne peut séparer, du fait de la diffraction, le couple étoile-planète. Si on les considère maintenant non plus comme des imageurs individuels mais comme des échantillonneurs de front d'onde, on remarque que l'onde en provenance de l'étoile arrive simultanément sur les deux télescopes, tandis que celle en provenance de la planète arrive sur le premier télescope avec un retard appelé différence de marche (exprimée en unité de longueur) qui est égal ici à $D \sin \theta$ où θ est l'angle que forment l'étoile et la planète. Cette différence de marche induit un déphasage de l'onde arrivant sur le premier télescope par rapport à celle arrivant sur le second. En adaptant D , on peut obtenir $D \sin \theta = \pi$, autrement dit, si on recombine de manière cohérente les deux télescopes, on sera en état d'interférences constructives dans la direction de l'étoile (on obtient une frange brillante sur l'interférogramme) et en état d'interférences destructives dans la direction de la planète (on a alors une frange sombre sur l'interférogramme). Si on ajoute un déphasage supplémentaire de π dans l'un des bras de l'interféromètre, on inverse la situation car le déphasage introduit par la position de la planète est compensé par celui introduit dans le bras, tandis qu'il induit un état d'interférences destructives dans la direction de l'étoile. On a ainsi un moyen "d'éteindre" le flux stellaire et d'isoler les photons de la planète, d'où le nom de coronographe interférométrique, par analogie avec le coronographe solaire [Lyot 32].

L'efficacité d'un tel instrument dépend de la qualité de sa frange noire. Elle est quantifiée par une grandeur appelée taux de réjection ρ et définie par la relation:

$$\rho = \frac{I_{max}}{I_{min}} \quad (1)$$

où I_{max} (respectivement I_{min}) est l'intensité de la frange brillante (respectivement sombre) dans l'interférogramme.

Le taux de réjection est lié au facteur de visibilité V des franges par la relation:

$$V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} = \frac{\rho - 1}{\rho + 1} \quad (2)$$

Un interféromètre idéal a un taux de réjection infini. Dans la pratique, ce sont les déformations différentielles induites sur les fronts d'onde par les imperfections de l'instrument (défauts de pointage des télescopes, fluctuations de la différence de marche entre les faisceaux, diffusion et défauts de polissage des optiques) qui limitent le taux de réjection. Ce taux de réjection

pour un instrument donné est une grandeur chromatique puisque l'influence des défauts est elle-même chromatique.

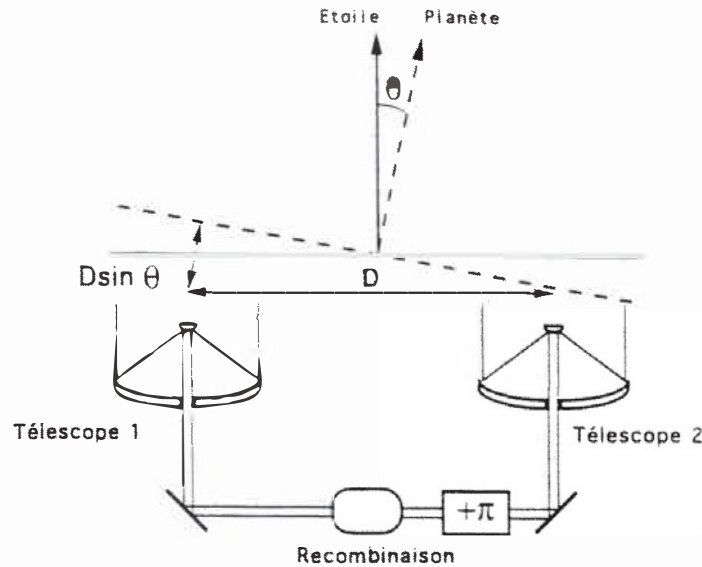


Fig. 1: Principe du coronographe interférométrique de Bracewell à deux télescopes. Les interférences sont destructives dans la direction de l'étoile et constructives dans la direction de la planète.

L'observation des exo-planètes dans l'infrarouge nécessite un instrument dont le taux de réjection (à $10 \mu\text{m}$) est de l'ordre de 10^6 pour pouvoir s'affranchir du contraste étoile-planète (qui est d'environ 10^7 à cette même longueur d'onde)[Ange 89]. Dans le cas d'un interféromètre à deux ondes, un tel taux de réjection ne peut être obtenu que si l'amplitude (respectivement la phase) de chacune des deux ondes en tout point de la lame recombinaison ne diffère pas à plus de 10^{-3} près (respectivement 10^{-3} radian). On peut montrer que de tels contraintes sur la qualité des fronts d'onde peuvent être obtenues si l'on contrôle précisément les défauts de basses fréquences spatiales (qualité du traitement réfléchissant, inclinaison des fronts d'onde, différences de marche...) et si on fait subir aux fronts d'onde un filtrage optique qui élimine les défauts de hautes fréquences spatiales, d'amplitude (diffusion par les poussières) et de phase (défauts de phase des optiques). Le principe du filtrage optique ainsi que des simulations numériques des résultats sur différents types de défauts ont été décrits par Ollivier et Mariotti [Oll 97]. Nous présentons ici le principe et les premiers résultats d'une expérience de laboratoire qui vise à mettre en œuvre ce filtrage optique. Cette expérience de démonstration est préliminaire à l'étude de DARWIN.

2 - PRINCIPE ET DESCRIPTION DE L'EXPÉRIENCE DE DÉMONSTRATION

Le but de cette expérience est de valider le concept de filtrage optique pour DARWIN. Il s'agit de créer deux fronts d'onde distincts et de les recombinaison avec un taux de réjection aussi élevé que possible.

Dans un premier temps, on ne se préoccupe pas des questions de chromaticité du taux de

réjection, ni de sa réalisation sur un large domaine fréquentiel (typiquement 6-18 μm , voire de 5 à 30 μm pour la mission DARWIN). La longueur d'onde de 10.6 μm a été retenue car située environ au milieu de l'intervalle spectral de DARWIN. De plus, des lasers monomodes existent à cette longueur d'onde et peuvent fournir un signal bien supérieur au fond thermique ambiant¹. Un faisceau laser visible rouge ($\lambda \sim 630 \text{ nm}$) est superposé au faisceau laser infrarouge. Nous avons ainsi une étoile modèle constituée d'un rayonnement visible, monochromatique, et infrarouge, monochromatique également. Le rapport 17 qui existe entre les longueurs d'onde visible et infrarouge permet d'augmenter la précision des réglages. Par exemple, égaliser la différence de marche à $\lambda_{IR}/6000$ revient à l'égaliser à $\lambda_{VIS}/350$.

Toutes les optiques utilisées dans cette expérience doivent évidemment permettre la propagation du visible et de l'infrarouge. Pour ce faire, les optiques en transmission (lames séparatrices, fenêtres...) sont en séléniure de zinc (ZnSe) tandis que les miroirs, généralement en Zerodur, sont recouverts d'une monocouche d'or.

L'expérience de démonstration est construite autour d'un interféromètre à division d'amplitude de type Mach-Zehnder dont certains éléments ont été modifiés (Fig. 2).

2.1 Les sources lumineuses:

La source infrarouge est un laser à CO_2 excité par radio-fréquences, polarisé linéairement (on travaille donc sur une seule polarisation), monomode transverse et longitudinal, fournissant 250 mW à 10.59 μm . Ce laser est stable en fréquence à mieux que 10 kHz (pour $T < 10 \mu\text{s}$), et est accordable sur une gamme de $\pm 100 \text{ MHz}$. Il est placé en tête de marbre et son faisceau est agrandi par une optique adaptée. La pupille utilisée est circulaire, a un diamètre de 12 mm et tronque le faisceau gaussien à $1/e^3$. La source visible est un laser à colorant (rhodamine 6G) accordable en fréquence et pompé par un laser à argon continu. Ce laser à colorant est utilisé dans le rouge où il a une puissance de l'ordre de quelques dizaines de milliWatts. Le faisceau visible est amené jusqu'au marbre portant l'expérience par une fibre optique monomode qui l'épure simultanément (le laser à colorant est situé dans une pièce voisine). En sortie de fibre, le faisceau est expansé par une optique de 50 mm de distance focale. Le mélange IR/Visible est fait sur une lame dichroïque avant la lame séparatrice.

2.2 Stabilité mécanique de l'expérience:

L'expérience est montée sur un marbre, de 4.2 m sur 1 m, suspendu et à position asservie de manière active par 3 plots fixes et 3 plots pneumatiques. La hauteur des faisceaux est de 150 mm au dessus du niveau du marbre. Chaque optique est portée par un ensemble barillet/support traditionnel vissé sur une embase en dural de diamètre 36 mm et de longueur 100 mm environ, elle-même vissée sur une plaque en dural. La plaque permet la mise en place de l'optique sur le marbre, et est bridée par l'intermédiaire de cavaliers. Cette configuration permet une bonne stabilité de l'ensemble. Cette stabilité n'a toutefois pas encore été quantifiée. A terme, il est prévu de monter chaque sous-ensemble sur une plaque autonome, qui repose sur le marbre par un dispositif de type point-trait-plan. Ce type de montage est nécessaire pour permettre les dilatations différentielles (marbre et plaques) sans introduction de contraintes. En effet, la température de la pièce fluctue de 1 à 2 degrés au cours de l'année. L'ensemble mécanique devrait cependant être stabilisé en température à quelques dixièmes de degré près, par régulation de la température de l'enceinte expérimentale.

¹Le rayonnement thermique à 300 K est la source principale de signal parasite à 10 μm sur Terre (pour l'expérience de démonstration) ou dans son voisinage immédiat. Ce problème est moins critique pour DARWIN car l'observatoire sera placé dans un environnement à 40 K maximum (voisinage de l'orbite de Jupiter).

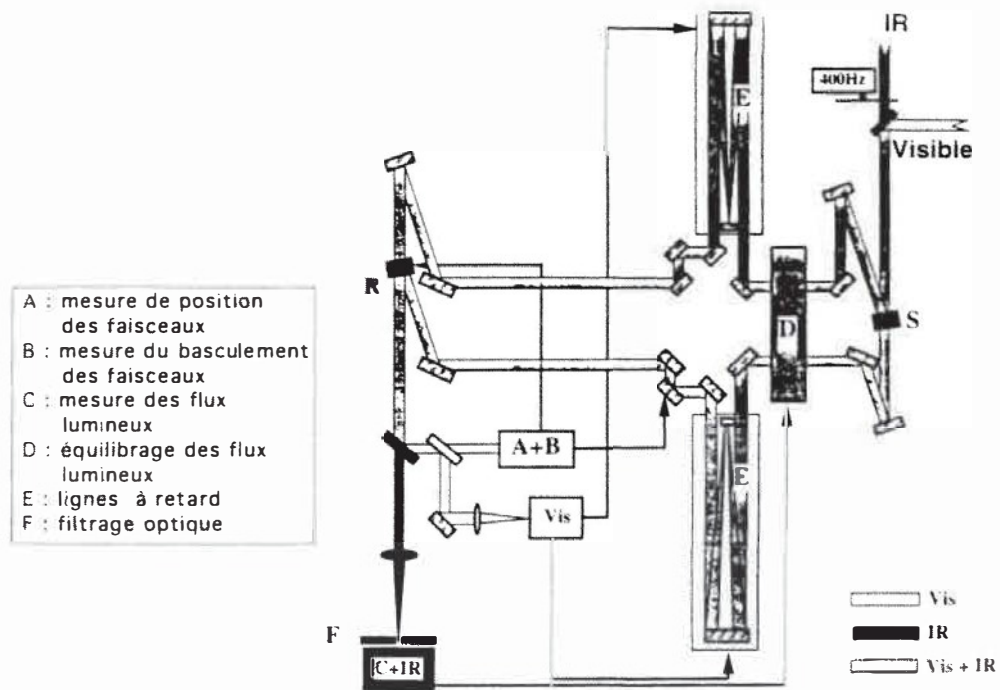


Fig. 2 : Schéma fonctionnel de l'expérience de démonstration. Sur une structure de type Mach-Zehnder classique ont été ajoutés successivement, un dispositif d'égalisation des flux lumineux, des lignes à retard, un dispositif de contrôle de superposition des fronts d'onde et un dispositif de filtrage optique après la recombinaison et avant la détection.

2.3 Séparation et recombinaison des faisceaux:

La lame séparatrice et la lame recombinaison ont été dessinées pour éviter les interférences à ondes multiples (cavité Perot-Fabry) et la superposition des réflexions multiples lors du passage du faisceau dans la lame. Pour ce faire, la classique lame à faces parallèles a été remplacée par un ensemble de deux lames prismatiques mises tête-bêche, et séparées les unes des autres par un intervalle permettant l'échappement des réflexions parasites sans changement de la direction de propagation du faisceau principal. Un angle de 5 degrés sur des lames de 27 mm de diamètre, de 7.5 mm d'épaisseur en leur centre et séparées de 60 mm suffit à contrôler les premières réflexions parasites d'un faisceau de 12 mm de diamètre. Ces lames en ZnSe non traité sont utilisées en incidence proche de la normale (5 degrés). Elles ont été polies à $\lambda/20$ pic à pic ($\lambda = 632.8$ nm). L'efficacité globale d'un tel dispositif, à $10.6 \mu\text{m}$, est d'environ 47% en transmission et 17% en réflexion. Ces écarts de flux introduits lors de la séparation sont compensés à la recombinaison. Toute la difficulté de cette solution est la gestion des réflexions parasites qui doivent être soit utilisées comme signal de contrôle pour les asservissements, soit piégées pour éviter d'interférer avec la voie de mesure car la longueur de cohérence des lasers est bien supérieure aux longueurs mises en œuvre dans le montage.

Après alignement, les seuls degrés de liberté de l'interféromètre de base sont deux degrés de rotation sur la lame séparatrice qui permettent de superposer latéralement les fronts d'onde sur la lame recombinaison et deux degrés de rotation sur la lame recombinaison qui permettent de superposer angulairement les fronts d'onde. Ces degrés de liberté sont des réglages et ne sont pas asservis (cf. dispositif de correction de l'orientation et de la superposition des faisceaux). Tous les autres éléments du montage sont bridés sur le marbre après orientation et alignement.

2.4 Contrôle de la qualité du front d'onde:

Sur le trajet optique, on ajoute différents éléments de contrôle et de nettoyage du front d'onde:

- un dispositif d'égalisation des flux lumineux
- 2 lignes à retard
- des dispositifs de correction de l'orientation et de la superposition des faisceaux
- un dispositif de filtrage optique

• Le dispositif d'égalisation des flux lumineux, en cours de conception, a pour objectif de rétablir l'équilibre énergétique entre les deux faisceaux avant interférences. Il est constitué de deux lames de ZnSe sur lesquelles est déposée une couche d'aluminium d'épaisseur linéairement variable. Ces lames sont placées en opposition de sorte que l'absorption optique soit constante sur la surface commune aux deux lames. L'absorption optique globale est réglable en tradant l'une ou l'autre des lames. Compte tenu de la nature gaussienne des plans d'onde (la source est un laser) il n'est pas possible d'utiliser un dispositif qui modifie la taille de la pupille (afocal variable sur un diaphragme fixe par exemple) car la structure du plan d'onde final se trouverait également modifiée par l'opération. La difficulté majeure de ce dispositif en absorption est de réussir à réaliser un dépôt d'épaisseur linéairement variable sur toute la longueur du substrat, et constante à position fixée sur toute la largeur de ce même substrat. Actuellement, des tests sont en cours de réalisation sur des verres classiques avant la réalisation d'une version sur ZnSe. Le dispositif d'égalisation des flux lumineux sera réglé par une mesure de l'intensité de chacun des faisceaux. Ces mesures sont faites après recombinaison et filtrage mais avant la détection. Elles sont normalisées au flux incident mesuré avant l'injection afin de s'affranchir des fluctuations d'intensité du laser.

• L'ensemble des lignes à retard permet la localisation de la différence de marche zéro et son contrôle avec une précision de l'ordre de 10 nm.

La partie optique d'une ligne à retard comprend un rétroreflécteur du type œil de chat, constitué d'un miroir primaire parabolique (Φ 50 mm, distance focale 150 mm) et d'un miroir secondaire plan (Φ 4 mm). Le miroir secondaire est collé sur un empilement de céramiques piézo-électriques. Il assure les déplacements rapides pour des courses de quelques micromètres.

Le rétroreflécteur est monté sur une table de translation sans frottement, ce qui est nécessaire pour un contrôle dans la gamme des nanomètres. En conséquence, cette table ne met en œuvre que de pures flexions. Les performances sont:

course	4 cm
erreur angulaire	3 secondes d'angle (pic à pic)
déplacement latéral	5 micromètres (pic à pic)

Des moteurs linéaires assurent les translations à basses fréquences (dérives thermiques, fluctuations lentes de la différence de marche) et les céramiques piézo-électriques assurent les petits déplacements à hautes fréquences (vibrations).

Un interféromètre de référence fait partie de cet ensemble lignes à retard. Il utilise comme source un laser hélium-néon et produit un signal proportionnel à la différence de marche avec une résolution meilleure que 10 nm et une large bande passante (50 kHz). Cette large bande passante est mise à profit pour l'amortissement des céramiques piézo-électriques.

L'asservissement en différence de marche comprend deux boucles: une boucle "locale" opérant à partir du signal dérivé du laser He-Ne, et une boucle "verrier" opérant à partir du signal d'erreur dérivé du laser visible à colorant.

Finalement, le système asservi (moteur linéaire et céramiques piézo-électriques) a une bande-passante de 1.3 kHz, ce qui donne une bonne immunité vis à vis des vibrations résiduelles.

Un micro-ordinateur PC centralise sous LABVIEW toutes les commandes pour une gestion souple du système.

- Le dispositif de correction de la superposition des faisceaux est constitué d'un miroir à deux axes de basculement ("tip-tilt") placé loin de la lame recombinaison et qui modifie essentiellement la position latérale d'un faisceau par rapport à l'autre, permettant ainsi leur superposition. Ce miroir introduit cependant un léger basculement des fronts d'onde qui est compensé, en même temps que celui dû aux hétérogénéités des chemins optiques, par un basculement de la lame recombinaison elle-même. Là encore, la rotation de la lame recombinaison n'affecte l'orientation angulaire que d'un seul faisceau qui est ainsi corrigé par rapport à l'autre pris comme référence. Ces mécanismes sont asservis par des signaux d'erreur issus de dispositifs de mesures de la position des pupilles et des images des faisceaux repérant le centrage de ces pupilles et images.

- Le dispositif de filtrage optique est constitué dans un premier temps d'un trou de diamètre égal à celui de la tache d'Airy de la pupille (premier minimum d'intensité de la figure de diffraction) obtenue en focalisant le faisceau issu de l'interféromètre après recombinaison. Le principal défaut de ce type de filtrage est de ne pas être efficace pour les défauts de basses fréquences spatiales tels les défauts géométriques des faisceaux (l'efficacité du filtrage augmente avec la fréquence spatiale des défauts). Une autre solution consiste à utiliser, comme dispositif de filtrage optique, un morceau de quelques centimètres de long de fibre optique monomode. De telles fibres commencent à être disponibles dans le domaine de l'infrarouge, et leur absorption peut être négligée sur une aussi faible longueur. L'avantage de la fibre monomode sur le trou filtrant est de corriger tous les défauts de phase (y compris les défauts de bas ordre tels ceux de type tip-tilt) en les transformant en défauts de couplage dans la fibre (défauts d'intensité) et de différence de marche [Cond 91]. Les fluctuations de différence de marche sont corrigées dans les deux cas par les lignes à retard.

Pour être efficace, le filtrage doit être symétrique sur chacun des chemins optiques de l'interféromètre. Dans l'expérience de démonstration, nous avons choisi de placer le dispositif de filtrage après la lame recombinaison. Les deux faisceaux traversent donc un dispositif unique et commun. Formellement, le résultat est similaire en raison de la linéarité des équations de Maxwell lors de la recombinaison.

2.5 Environnement du laboratoire et turbulence:

- La turbulence dans le laboratoire est nuisible à la qualité des mesures. En effet elle induit des modifications locales de l'indice de l'air sur les trajets optiques ce qui entraîne des fluctuations permanentes de la différence de marche globale (qui peuvent être corrigées par les lignes à retard) mais également des fluctuations spatiales de phase sur la pupille. Rappelons que pour obtenir un taux de rejection de 10^6 les fluctuations de différence de marche ne doivent pas dépasser $\lambda/6000$ à $10 \mu\text{m}$. La turbulence apparaît dès qu'il existe un gradient de température horizontal ou vertical dirigé vers le bas (le bas est plus chaud que le haut). Dans notre cas, il peut exister un écart de température entre le marbre et le dessus de l'enceinte de protection de l'expérience.

Cette turbulence de laboratoire peut être approchée, dans le cas d'un gradient de température vertical par un problème de Rayleigh-Bénard (turbulence plane entre deux parois horizontales) et caractérisé par un nombre (nombre de Rayleigh) qui est en fait le rapport de l'énergie

potentielle et de l'énergie de dissipation visqueuse. Ce nombre est donné par la relation suivante:

$$Ra = \frac{g \cdot \alpha \cdot \Delta T \cdot h^3}{\kappa \cdot \nu} \quad (3)$$

avec:

- g : accélération de la pesanteur
- α : coefficient de dilatation thermique du fluide
- ΔT : différence de température
- h : hauteur de la couche de fluide
- κ : diffusivité de la chaleur dans le fluide
- ν : viscosité cinématique du fluide

Le déclenchement des cellules convectives présente un seuil pour une valeur du nombre de Rayleigh (appelée nombre de Rayleigh critique et notée Ra_c) d'environ 1700 dans le cas où la couche de fluide est confinée entre deux plaques solides horizontales [Draz 81]. Ce seuil correspond au moment où la diffusion de la chaleur dans le gaz s'avère insuffisamment rapide pour équilibrer thermiquement le gaz. Des bulles chaudes, plus légères apparaissent et une circulation s'installe dans l'enceinte.

Dans le cas d'un gradient de température horizontal, des phénomènes de circulation interviennent également. Ils sont d'autant plus gênants qu'il n'y a pas de seuil d'apparition. Il faut donc veiller à introduire les gradients horizontaux de température les plus faibles possibles sur le trajet optique (ie. limiter les dissipations thermiques des instruments).

Pour limiter les effets de la turbulence, l'expérience est placée dans une enceinte étanche posée sur le marbre et purgée à l'hélium. Cet environnement présente deux avantages majeurs sur l'air:

- l'hélium a des fluctuations d'indice 10 fois plus faibles que l'air quand la température varie;
- l'hélium a une conductivité thermique 6 fois plus grande que l'air. Cette propriété permet une homogénéisation plus rapide de la température sur le trajet optique et retarde donc l'apparition de la turbulence (cf. équation 3). A titre de comparaison, la valeur de $Ra_c=1700$ est obtenue avec $h=30\text{cm}$ pour $\Delta T=6.9 \cdot 10^{-4}$ K dans l'air alors que dans l'hélium, $\Delta T=4.5 \cdot 10^{-3}$ K.

Les contraintes sur l'étanchéité de l'enceinte sont voisines de celles adoptées pour un montage sous vide médiocre, à cette grande différence près que la structure n'a pas à supporter la pression atmosphérique et peut donc être réalisée en matériaux polymères, l'intérieur de l'enceinte étant maintenu en légère surpression (~ 1 mbar) par rapport à l'extérieur.

Une autre solution pour éviter le déclenchement de cellules turbulentes (et qui peut être conjuguée à la précédente) est d'imposer un gradient thermique orienté vers le haut (atmosphère plus chaude en haut de l'expérience qu'en bas). Ce gradient peut être obtenu en refroidissant le socle de l'expérience ou plus simplement, en chauffant légèrement ($\Delta T \sim 0.1-0.5^\circ\text{C}$) le dessus de l'enceinte. Dans tous les cas, les problèmes de gradients horizontaux de température ne sont pas résolus.

3 - RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES

Jusqu'à présent, seules la partie séparation et la partie recombinaison ont été montées et alignées sur le marbre (Fig. 3). Nous disposons ainsi d'un Mach-Zehnder classique dont on cherche à mesurer le taux de réjection (dans le visible pour l'instant, puis dans l'infrarouge après ajout du laser à CO_2). Cette estimation servira de base à la quantification des effets des

différents éléments ajoutés successivement sur le trajet optique.



Fig. 3: Photographie de la partie "injection/séparation" de l'expérience de démonstration. On reconnaît le bloc séparateur (cylindre) qui contient les deux lames prismatiques, ainsi que les miroirs de renvoi. La recombinaison est similaire dans son principe à la séparation.

La mesure du taux de réjection est optimale si l'on travaille en teinte plate, car dans ce cas, l'état d'interférence est constant sur tout le champ. On passe d'une teinte plate brillante à une teinte plate sombre en ajoutant une différence de marche de $\lambda/2$ dans l'un des chemins optiques. On peut ainsi utiliser un détecteur de taille classique, sans devoir réduire son champ de vision. La principale difficulté de cette méthode est qu'il faut être capable de stabiliser la teinte plate. Pratiquement, ce n'est possible que si l'on dispose de lignes à retard asservies pour compenser en permanence les différences de marche induites par les fluctuations sur les chemins optiques. On peut toutefois obtenir assez rapidement une estimation de la quantité recherchée en laissant les fluctuations d'indice de l'air modifier l'état d'interférence et donc l'intensité de la teinte plate. La mesure consiste à pointer avec le détecteur une petite région du champ d'interférences, à régler approximativement la teinte plate sombre et à relever la valeur minimale du flux sur le détecteur. Pour la teinte plate brillante, l'opération est identique si ce n'est que l'on mesure cette fois le maximum du flux. Le rapport des deux quantités mène directement au taux de réjection (on ne déplace pas le détecteur). Pour permettre de régler l'intensité de la teinte plate, nous avons ajouté une translation sur un des miroirs de renvoi, de manière à permettre de petites modifications de la différence de marche, dans l'attente des lignes à retard définitives décrites précédemment. Cette translation ne permet pas le réglage de l'interféromètre en lumière blanche car la modification de la différence de marche introduit un décalage latéral des faisceaux, et nécessite donc l'utilisation de lumière spatialement cohérente. On peut toutefois facilement savoir si l'égalité des chemins optiques est globalement réalisée en regardant la teinte plate sombre. Si le champ n'est pas homogène, c'est que les courbures des surfaces d'ondes sont différentes, et donc que les chemins optiques sont

différents (nous n'utilisons actuellement que des optiques planes, et le laser n'est pas collimaté).

Les résultats obtenus avec cette méthode ne sont pas très fiables, et extrêmement liés aux mouvements de l'air sur le marbre. En effet, les fluctuations d'intensité de la teinte plate peuvent être très rapides et très importantes. Toutefois, cette méthode laisse supposer que le taux de réjection est supérieur ou égal à 100.

Pour notre montage simple, on peut utiliser une autre méthode:

On règle la lame séparatrice de manière à former un coin d'air et à obtenir après recombinaison une série de franges (environ 5 franges dans le champ). La visibilité est en principe constante dans le champ. Pour la mesurer, il faut reconstituer l'enveloppe des franges brillantes et l'enveloppe des franges sombres dont le rapport des intensités point à point nous mène à une estimation du taux de réjection². Le montage est éclairé avec un petit laser He-Ne de 2 mW, dont le faisceau est utilisé tel quel, sans collimateur. La mesure peut être effectuée avec une matrice CCD qui image la figure d'interférences. L'enveloppe des franges sombres et brillantes est ensuite obtenue par interpolation de l'image des franges.

Pour reconstituer un profil photométrique en l'absence provisoire de détecteur CCD, nous avons utilisé une méthode photographique. Cette méthode suppose l'utilisation d'un film dont la réponse puisse être étalonnée, ou dont on puisse couvrir toute la dynamique avec des temps de pose différents. Une série de prises de vues à temps de pose fixe, avec une série de densités neutres variables permet de comparer les densités obtenues sur le négatif et reconstruire la courbe de réponse du film.

Cette méthode a été mise en œuvre en deux temps sur un film Kodak TP 6415. Un premier film a permis de tester qualitativement la réponse du film et de choisir les temps de pose. Ce film a été réalisé sans aucune optique intermédiaire. La taille de la figure d'interférences sur le négatif ne permet cependant pas de faire des mesures densitométriques précises avec les instruments dont nous disposons. Dans un deuxième temps et avec les informations issues du premier film, on recommence l'opération avec le même film mais au format 60x60 mm, et une optique de grandissement intermédiaire (distance focale de 80 mm sur soufflet, grandissement final 4) dont on néglige les aberrations dans la partie centrale. On réalise 12 vues avec des temps de pose variant de 1 à 1/1000^e de seconde avec un boîtier Rolleiflex. Pour deux points voisins du centre de l'image (où l'éclairement est à peu près uniforme) appartenant l'un à une frange sombre, l'autre à une frange brillante, les mesures au densitomètre donnent des densités identiques pour des temps de pose qui diffèrent d'un rapport 500 (Fig 4). En supposant la fiabilité de l'obturateur et l'absence d'erreur de réciprocité (ce qui est le cas si l'on se reporte aux caractéristiques du film dans nos conditions expérimentales et de développement) on en déduit un rapport 500 d'éclairement entre la frange brillante et la frange sombre et donc un taux de réjection de l'interféromètre de 500 environ³. Ces résultats sont compatibles avec les simulations numériques effectuées précédemment [Olli 97]. Le taux de réjection mesuré au centre du champ correspond à celui attendu pour des optiques polies à $\lambda/100$ rms, c'est à dire environ $\lambda/20$ pic à pic. Ce sont précisément les caractéristiques de toutes les optiques utilisées dans ce montage préliminaire (miroirs plans et lames en ZnSe). Les défauts du traitement réfléchissant et les poussières ne sont pas suffisants pour influencer à ce niveau le taux de réjection.

Ces mesures nécessitent toutefois confirmation par d'autres méthodes (CCD par exemple) et doivent être reprises prochainement. En effet, il n'est pas possible par cette méthode, de qualifier la stabilité temporelle des franges, et encore moins du taux de réjection.

²En effet, les faisceaux sont gaussiens et l'éclairement n'est pas homogène sur la pupille.

³en négligeant la variation spatiale d'intensité du laser au centre de l'image (au voisinage du maximum du mode gaussien)

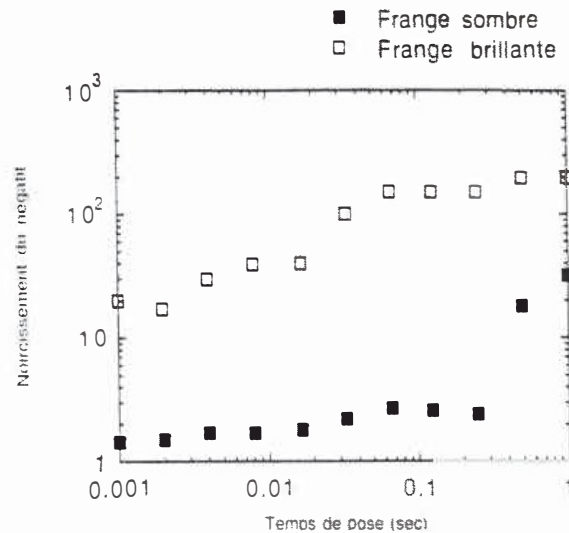


Fig. 4 : Noircissement du film photographique dans la frange sombre (bas) et dans la frange brillante (haut) en fonction du temps d'obturation. Des noircissements semblables à ceux de la frange brillante sont obtenues dans la frange sombre pour des temps de pose 500 fois plus longs.

4 - CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Après avoir mesuré le taux de réjection d'un interféromètre classique, il nous faut maintenant chercher à l'améliorer significativement. Comme indiqué précédemment, les prochaines étapes du développement expérimental sont l'ajout des dispositifs de contrôle et de correction des fronts d'onde.

Après avoir superposé la voie infrarouge, nous allons ajouter les lignes à retard qui permettront de régler et de stabiliser l'interféromètre à la différence de marche nulle. Ce réglage permet au premier ordre d'égaliser la courbure des deux fronts d'onde et d'assurer l'homogénéité de la teinte plate sombre.

La seconde étape consiste à éliminer les déformations différentielles des fronts d'onde, par l'ajout du dispositif d'égalisation des flux lumineux, et le filtrage optique, qui dans un premier temps sera constitué d'un trou. Une fibre optique remplacera ensuite le trou.

Enfin, il faudra stabiliser l'ensemble dans le temps, en asservissant les éléments de correction des fronts d'onde. Cet asservissement utilise la voie visible et, *in fine*, la voie infrarouge.

D'autres points n'ont pas été abordés par cette expérience, et devront être étudiés avant la définition complète de la mission DARWIN. En particulier, l'aspect chromatique de la réjection n'a pas encore été très étudié. Dans notre montage, le déphasage de $\lambda/2$ nécessaire pour se placer en frange noire est obtenu par action sur la différence de marche, ce qui en fait un paramètre évidemment chromatique. Il faudra développer toute une optique achromatique pour la mission finale.

Un autre point important est la spatialisation du dispositif. En effet, les contraintes liées à la satellisation et à l'environnement spatial conduisent à des dispositifs nécessairement robustes, fiables, stables, et autonomes dans leur mise en action et dans leur fonctionnement. Si on ajoute

le fait que l'intervalle spectral est large (6-18 μ m, voir 5-30 μ m à terme), et que la polarisation du rayonnement doit également être contrôlée pour permettre un taux de réjection élevé⁴, on peut légitimement penser que l'observatoire final sera constitué de plusieurs interféromètres optimisés pour des intervalles spectraux limités et des polarisations fixes. L'optique intégrée [Kern 96] apparaît comme très bien adaptée à ces contraintes, à condition que son domaine spectral actuel (limité à 7 μ m [Joss 97]) soit étendu dans l'infrarouge plus lointain. Certains de ces points sont actuellement en cours d'étude.

BIBLIOGRAPHIE :

- [Ange 89] J. R. P. Angel: "Use of a 16 m telescope to detect Earthlike planets", in *The Next Generation Space Telescope*, P. Bely, C. Burrows and G. Illingworth, eds., Space Science Institute, Baltimore, Md., 1989, pp. 81-88
- [Beuz 97] J-L. Beuzit, D. Mouillet, A-M. Lagrange, J. Paufique: "Stellar coronagraph for the COME-ON-PLUS adaptive optics system. I. Description and performances", *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, Vol 125, 1997, pp. 175-182
- [Brac 78] R. N. Bracewell: "Detecting nonsolar planets by spinning IR interferometer", *Nature*, Vol. 274, 1978, pp. 780-781
- [Coud 91] V. Coudé du Foresto, S. Ridgway: "FLUOR: a stellar interferometer using single-mode infrared fibers", in *Proceedings of ESO Meeting on High-Resolution Imaging by Interferometry II*, J. M. Beckers and F. Merkle, eds., European Southern Observatory, Garching bei München, 1991
- [Draz 81] P.G. Drazin, W.H. Reid: *Hydrodynamic stability*, Cambridge University Press, 1981
- [Joss 97] E. Josse: "Guides d'ondes réalisés par échanges d'ions dans des verres de fluorures dopés terres rares, en vue d'applications en optique intégrée active", *thèse de l'Université de Rennes I*, 1997
- [Kern 96] P. Kern, F. Malbet: *Proceedings of Astrofib'96: Integrated optics for astronomical interferometry*, LAOG UJF/CNRS BP53 38041 GRENOBLE cedex 9 - France, 1996
- [Léger 96] J. Aléger, J-M. Mariotti, B. Mennesson, M. Ollivier, J-L. Puget, D. Rouan, J. Schneider: "Could we search for primitive Life on extrasolar planets in the near future? The DARWIN project", *Icarus*, Vol. 123, 1996, pp. 249-255
- [Lyot 32] B. Lyot, *Z. Astrophys.*, Vol. 5, p.73
- [Olli 97] M. Ollivier, J-M. Mariotti: "Improvement of the rejection rate of a nulling interferometer by spatial filtering", *Applied Optics*, Vol. 36, No. 22, 1 August 1997, pp. 5340-5346

⁴dans l'expérience, on travaille sur une polarisation car le laser est polarisé linéairement