

**PREPARATION AU TITRE D'INGENIEUR MAITRE  
D' IUP GENIE DES SYSTEMES INDUSTRIELS  
OPTION OPTIQUE, PHOTONIQUE ET TELECOMMUNICATION**

**PROJET 'OHANA**

**Optical Hawaiian Array for Nanoradian Astronomy**



**Intégration des modules d'injection et de la ligne à retard**

**Samir EL KHOULUDI**

**Mars - Juillet 2004**



## REMERCIEMENTS

Mon stage s'est déroulé dans l'équipe Haute Résolution Angulaire en Interférométrie Infrarouge du Laboratoire d'Etudes Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique, département de l'Observatoire de Paris- Meudon.

Je tiens à remercier Guy Perrin, Astronome et Principal Investigator du projet, qui a su me communiquer sa passion pour l'astronomie. J'ai beaucoup apprécié sa patience dans ses explications qui furent nombreuses, surtout en début de stage et cela malgré un emploi du temps très chargé. A ses cotés, j'ai beaucoup appris.

Je tiens aussi à remercier toute l'équipe 'OHANA pour avoir favorisé mon intégration dans le groupe. A commencer par Jean Guérin, coordinateur du projet mais aussi Thierry Goeltzenlichter responsable de l'étude opto- mécanique, Claude Collin de l'atelier mécanique, Pierre Fedou de l'informatique et Takayuki Kotani, en thèse sur ce projet.

## Table des matières

I.	Présentation du projet 'OHANA et de l'équipe.....	P 5
II.	Interférométrie et très haute résolution angulaire.....	P 12
III.	Composantes de 'OHANA.....	P 15
IV.	Caractérisations interférométriques des fibres optiques monomodes en verre fluoré.....	P 22
V.	Montage – réglage des modules d'injection Keck I – Keck II.....	P 29
VI.	Intégration des systèmes opto- mécaniques de la ligne à retard....	P 45
VII.	Conclusion.....	P 72

## I. Présentation du projet 'OHANA et de l'équipe

### a. Introduction

Depuis le début des années soixante-dix, les techniques de haute résolution angulaire pour l'optique et l'infrarouge ont fait des progrès croissants. Le niveau de maturité suffisant de l'interférométrie optique/infrarouge et de l'optique adaptative ont permis d'imaginer les grands interféromètres en cours de réalisation (VLTI et KECK) qui ont récemment obtenu leurs premiers résultats. Dans le même temps, les techniques de fabrication des grands miroirs et de contrôle des grands télescopes ont permis d'imaginer de très grands télescopes surpassant les plus grands d'aujourd'hui qui ont des tailles de 8-10 mètres. Les nouveaux projets parmi ceux qui doivent aboutir le plus rapidement concernent des télescopes de 20-30 mètres (par exemple le projet CELT aux Etats-Unis) offrant une résolution comparable à celle des interféromètres pré-KECK/VLTI dans l'infrarouge et marquant donc potentiellement à court terme la fin de l'intérêt qu'ils présentent. Des projets plus ambitieux de télescope de 100 mètres de diamètre sont d'ores et déjà à l'étude dont le projet européen OWL. L'entrée en service de tels instruments à l'horizon 2015 en fera des compétiteurs très sérieux pour des interféromètres comme le VLTI (Very Large Telescope Interferometer) ou le KECK. D'un point de vue technique, il est donc important de se préparer à la réalisation d'interféromètres apportant un gain d'un ordre de grandeur en résolution par rapport à des télescopes type OWL en explorant la voie des interféromètres de base kilométrique. Ces nouveaux interféromètres présentent un intérêt important pour certains champs de l'astrophysique qui ne peuvent aujourd'hui être étudiés. C'est dans ce cadre que s'inscrit le projet Optical Hawaiian Array for Nanoradian Astronomy dit 'OHANA (cf. annexe 1).

### b. Historique

Le projet naît en 1995 dans une proposition faite à l'ESO (The European Southern Observatory) par le groupe d'interférométrie infrarouge de l'Observatoire de Paris, pour la réalisation d'un "VLTI pas cher", dans laquelle les télescopes de Paranal seraient reliés par des fibres monomodes. Le redémarrage du VLTI en 1996 a rendu caduque cette proposition. L'idée était cependant originale et a été revue dans le contexte tout à fait unique du site du Mauna Kea. Une proposition d'action thématique innovante a été faite au CNRS fin 1999 et une suite favorable a été accordée à cette proposition, qui a permis d'engager la discussion sur la réalisation proprement dite du projet. En particulier, les directeurs des plus grands observatoires (CFH, Gemini, Keck, Subaru, IRTF, UKIRT) apportent leurs aides pour la réalisation des deux premières phases en permettant l'accès à leurs télescopes ainsi qu'en donnant quelques nuits de temps technique ou discrétionnaire pour démontrer la faisabilité du projet.

### c. 'OHANA

'OHANA (Optical Hawaiian Array for Nanoradian Astronomy, cela veut aussi dire famille en Hawaïen) consiste à recombinaison de façon cohérente les plus grands télescopes du site du Mauna Kea à Hawaï. L'intérêt de ce site est que quatre télescopes de classe 8-10 m et trois télescopes de classe 4 m sont équipés d'optique adaptative permettant leur utilisation efficace pour l'interférométrie. Ces télescopes offrent en outre la possibilité de réaliser des bases allant de 160 à 800 m (si l'on exclut l'interféromètre Keck dont la base est de 85 m).

## Caractéristiques de chaque télescope (Diamètre effectif et Système d'optique adaptative)

### **KECK - W. M. Keck Observatory**

Diamètre effectif : 2 x 10 mètres

Keck AO : février 1999 / décembre 2000

Nombre d'actuateurs: 349. Analyseur de surface d'onde: Shack-Hartmann

### **GEMINI - The Gemini North 8-m Observatory**

Diamètre effectif : 8,2 mètres

ALTAIR : juin 2003

Nombre d'actuateurs: 177. Analyseur de surface d'onde: Shack-Hartmann

### **SUBARU - National Astronomical Observatory of Japan**

Diamètre effectif : 8,2 mètres

AO : décembre 2000 (Futur système d'optique adaptative pour 2006 : environ 250 actuateurs)

Nombre d'actuateurs: 36. Analyseur de surface d'onde: Courbure

### **CFTH - Canada France Hawaii Telescope**

Diamètre effectif : 3,6 mètres

PUEO' : septembre 1996

Nombre d'actuateurs: 36. Analyseur de surface d'onde: Courbure

### **IRTF - NASA InfraRed Telescope Facility**

Diamètre effectif : 3 mètres

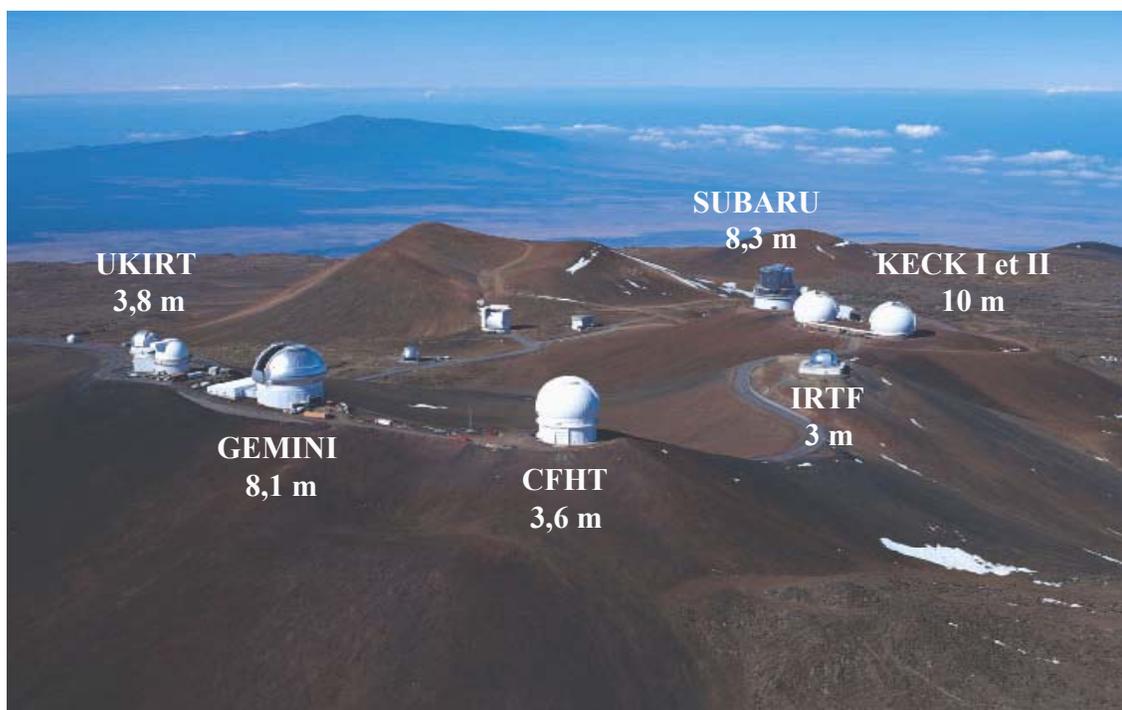
AO : avril 2003

Nombre d'actuateurs: 36. Analyseur de surface d'onde: Courbure

### **UKIRT- United Kingdom InfraRed Telescope**

Diamètre effectif : 3,8 mètres

Optique adaptative au stade de projet



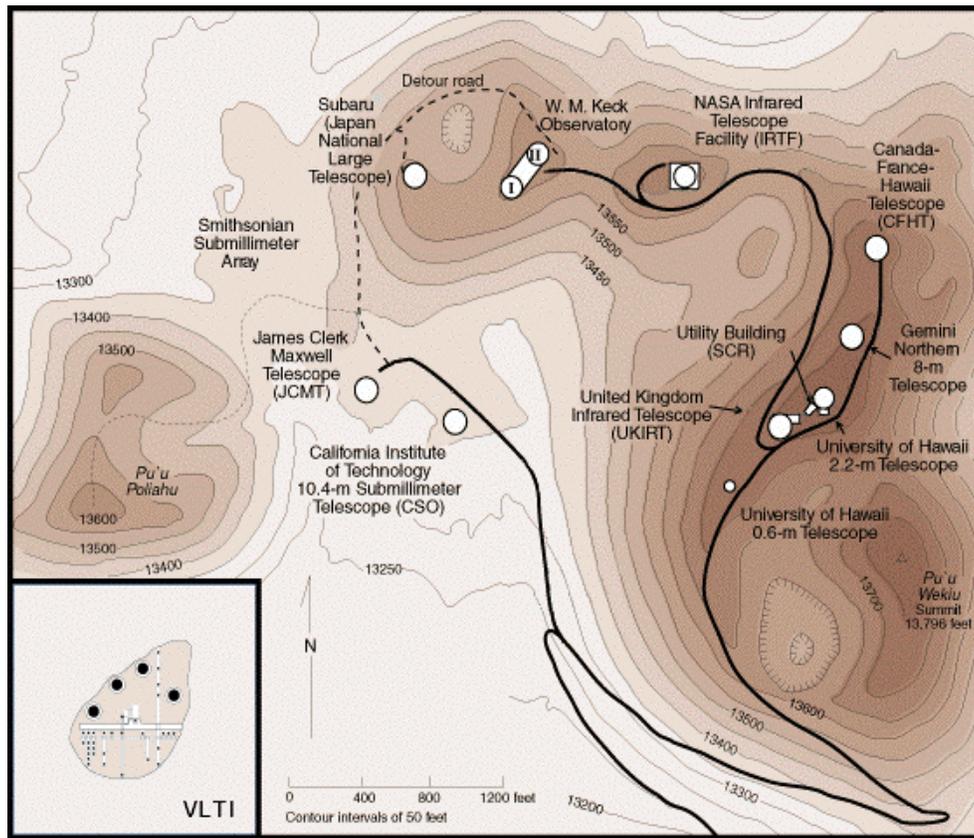
Coordonnées des télescopes du Mauna Kea concernés par le projet 'OHANA

Télescope	Latitude Nord	Longitude Ouest	Élévation (mètres)
CFHT	19°49'30,90648	155°28'07,95258	4204
UKIRT	19°49'20,75334	155°28'13,17630	4198,5
Keck I	19°49'33,40757	155°28'28,98665	4159,6
Keck II	19°49'35,61788	155°28'27,24268	4159,6
Subaru	19°49'31,81425	155°28'33,66719	4163
Gemini	19°49'25,68521	155°28'08,56831	4213,4

Longueur en mètres des lignes de bases formées par les 7 télescopes du projet 'OHANA

	CFHT	IRTF	UKIRT	Keck I	Keck II	Subaru	Gemini
CFHT							
IRTF	346						
UKIRT	349	457					
Keck I	618	286	605				
Keck II	518	237	616	85			
Subaru	750	428	688	145	221		
Gemini	163	412	204	642	626	756	

Comparaison (même échelle) des bases 'OHANA avec celles du VLTI



L'objectif de 'OHANA est donc de mettre en place sur le sommet du Mauna Kea un interféromètre optique à très longue base et de grande sensibilité, utilisant les télescopes déjà présents. La réalisation de cet instrument repose sur deux avancées technologiques :

### **L'optique adaptative**

Elle permet de corriger les fronts d'onde incidents des défauts induits par la turbulence.

Une surface d'onde plane est déformée par son passage à travers l'atmosphère ce qui engendre une perte de résolution spatiale ou de cohérence spatiale. L'optique adaptative permet de réduire ces pertes en corrigeant en temps réel les défauts de la surface d'onde. L'interféromètre peut alors utiliser pleinement les grandes pupilles disponibles (4 à 10 mètres pour les télescopes actuellement au sommet).

### **Les fibres optiques monomodes**

Le transport cohérent de la lumière des télescopes à un laboratoire de recombinaison peut désormais être fait en utilisant des fibres monomodes. La mise en place d'infrastructures lourdes pour accueillir des trains de miroirs optiques classiques pour le transport des faisceaux n'est plus nécessaire. Elle pourrait également s'avérer une alternative valable du point de vue de la sensibilité globale de l'interféromètre.

L'instrument se situe dans la catégorie de très grands interféromètres optiques sensibles avec celui du Keck et celui du VLTI. Avec une résolution supérieure, 'OHANA complète parfaitement les performances de ces deux observatoires.

Sur un horizon de vingt ans, 'OHANA n'a pas de concurrent. Il est le seul projet permettant d'espérer atteindre une résolution d'une fraction de milliseconde d'angle aux longueurs d'onde optiques. L'arrivée des télescopes de 30-50-100 mètres ne remettra pas en cause la viabilité et l'unicité du projet. Au contraire, les interféromètres type Keck et VLTI seront directement concurrencés par un 100 mètres. 'OHANA permet d'atteindre des résolutions inaccessibles à ces très grands télescopes.

#### **d. Phase du projet**

Le projet se décompose en trois phases distinctes :

#### **Phase I : Injection**

Dans cette première phase, il s'agit de réaliser et de qualifier le couplage entre les faisceaux corrigés par optique adaptative des différents télescopes et les fibres optiques monomodes. Cet objectif a déjà été atteint. Un système opto-mécanique, le module d'injection, permet d'interfacier les fibres optiques monomodes aux foyers corrigés par optique adaptative des différents télescopes. Cette phase, décisive sur le plan technique, a fait également office de prise de contact entre l'équipe de Meudon et les différents télescopes. Elle permet, dans le cadre du projet de mettre en place les liens "humains" qu'il nécessite (cf. Annexe 2).

#### **Phase II : Démonstrations interférométriques**

Une fois l'injection maîtrisée, le projet va de l'avant avec pour objectif de démontrer qu'il est possible de faire de l'interférométrie sur des bases allant jusqu'à 450 mètres (Subaru – IRTF) et de conduire des observations scientifiques de qualité. Cette étape nécessite trois nouveaux types

de développements: des fibres optiques monomodes pour les bandes J, H et K permettant d'atteindre des bases jusqu'à 450 mètres, une ligne à retard qui sera installée sur le CFH et enfin un instrument focal appelé recombineur, permettant de compléter l'interféromètre.

### Phase III : Observations régulières

Cette phase correspond à un instrument nouveau tant dans ses capacités d'observation que dans son mode de fonctionnement incluant l'ensemble des télescopes du réseau 'OHANA, Un recombineur à 7 télescopes pourrait voir le jour. L'exploitation de l'instrument en Phase III nécessitera un projet international.

#### e. Performances

##### Longueur d'onde

Trois bandes astronomiques sont envisagées pour le fonctionnement de l'interféromètre: les bandes J, H et K. Elles correspondent à un compromis entre de nombreuses contraintes portant sur:

- . **La qualité de correction des optiques adaptatives**, modeste dans le visible mais optimum dans le proche infrarouge.
- . **L'existence de fibres monomodes** disponibles en silice dans le visible et en verre fluoré dans l'infrarouge proche, mais non disponibles après la bande L, sur des longueurs kilométriques.
- . **Le besoin de haute résolution**, plus la longueur d'onde est courte et plus la résolution est élevée.
- . **La présence de signatures spectrales intéressantes**, le visible et le proche infrarouge sont en général plus riches en signatures spectrales que l'infrarouge thermique.

##### Résolution angulaire (en phase II)

L'atout principal de 'OHANA se trouve dans la gamme de résolution angulaire offerte. La plus petite nouvelle base (on ne compte pas la base entre Keck I et Keck II exploitée par l'interféromètre du Keck) entre Gemini et CFHT, d'environ 160 mètres, est déjà supérieure aux bases fournies par les deux autres installations de même catégorie, le Keck et le VLTI (avec des télescopes de tailles équivalentes).

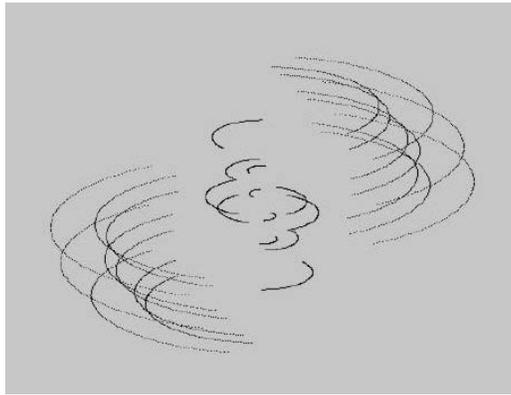
'OHANA se positionne comme une extension nécessaire de ces deux installations.

Base	Longueur de base (m)	Résolution (mas)		
		J	H	K
Keck I - Subaru	147	1,75	2,32	3,09
Keck II - Subaru	222	1,16	1,53	2,05
IRTF - Keck II	237	1,09	1,43	1,91
IRTF - Keck I	287	0,9	1,19	1,58
IRTF - Subaru	430	0,6	0,79	1,06
CFHT - IRTF	344	0,75	0,99	1,32
CFHT - Gemini	162	1,59	2,1	2,8
UKIRT - Gemini	202	1,28	1,68	2,25
CFHT - UKIRT	347	0,74	0,98	1,31

La résolution d'un interféromètre est donnée par  $\lambda / B$  où B est la base entre les 2 télescopes.

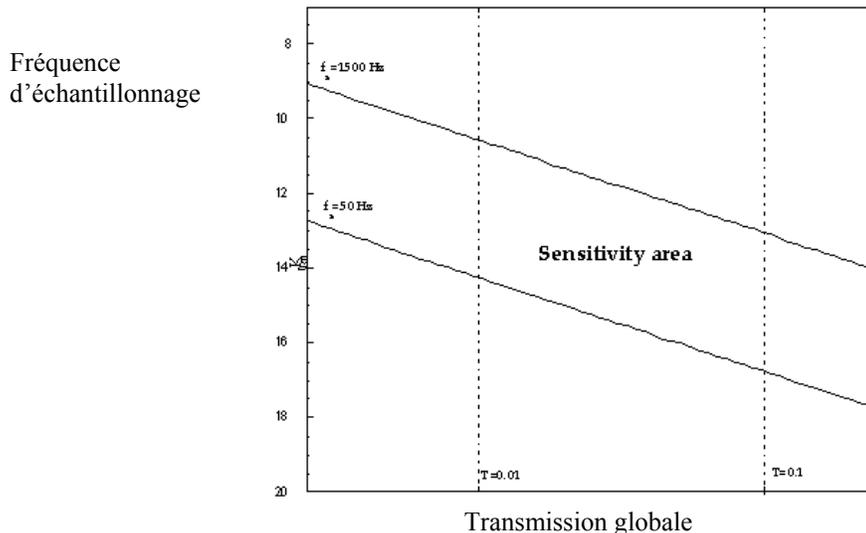
## Couverture de plan (u,v)

Le plan (u,v) est le plan des fréquences spatiales, conjugué du plan du ciel. L'emplacement des télescopes sur le sommet a l'avantage de produire une excellente couverture du plan (u,v). Les bases jusqu'à 400 mètres sont particulièrement bien représentées au sein de deux groupes de télescopes complémentaires orientés selon deux axes perpendiculaires. Un premier groupe situé sur la crête Est du site est orienté selon un axe Nord-Sud et comprend les télescopes CFHT, Gemini et UKIRT. Un second groupe sur la face Nord du sommet s'oriente selon un axe Est-Ouest. Des bases reliant ces deux groupes donnent accès à des fréquences spatiales plus élevées, avec une base maximale de 800 mètres entre les télescopes Gemini et Subaru. Cette bonne couverture du plan (u,v) permettra en phase III la reconstruction d'images de qualité.



## Sensibilité

Le calcul de la sensibilité d'un interféromètre est toujours périlleux car il dépend d'un nombre important de paramètres qui ne sont pas tous exactement connus. Pour cette raison, le calcul a été déterminé pour une zone de sensibilité en fonction des paramètres les plus incertains contenant très probablement la sensibilité réelle d' OHANA (cf. annexe 1). La sensibilité moyenne en bandes J, H et K est de magnitude 13 (échelle logarithmique utilisé par les astronomes). Il s'agit de la sensibilité sans stabilisation de la différence de marche nulle et donc sans possibilité d'intégration. Avec un système suiveur de frange sur source brillante hors axe permettant des poses longues, la sensibilité d' OHANA peut être accrue de 5 magnitudes environ (ce qui correspond à un facteur 100).



## f. Equipe 'OHANA

Durant ce projet, j'ai travaillé dans le Laboratoire d'Etudes Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique (LESIA). J'ai dû m'intégrer dans un groupe qui travaille sur ce projet depuis plusieurs années. Ce groupe, dont mon maître de stage est le responsable scientifique est constitué d'une quinzaine de personnes dont :

- . Des ingénieurs en mécanique dont le rôle est de concevoir des systèmes à partir des spécifications données.
- . Un mécanicien qui usine les pièces une fois celle-ci sortie du bureau d'études.
- . Des ingénieurs en électronique et un technicien en câblage.
- . Des ingénieurs et techniciens en informatique pour un fonctionnement des systèmes automatisés.
- . Le coordinateur du projet
- . Un étudiant en thèse d'astrophysique.

Je me suis joint à ce groupe en tant qu'élève - ingénieur en optique. Mon travail arrive en fin de chaîne et consiste à optimiser les systèmes conçus afin de rendre leurs utilisations fiables et efficaces. Cependant, mon travail ne s'est pas que limité à la partie optique des systèmes : mon maître de stage me laissant une prise d'initiative totale, j'ai donc optimisé le plus possible l'avancement du projet en travaillant par exemple sur la mécanique de précision, indispensable au bon fonctionnement des systèmes ou encore l'exploitation des programmes destinés à automatiser les systèmes.

J'ai aussi travaillé avec d'autres équipes qui participent au projet aux côtés du LESIA dont :

- . GEPI (Galaxies Etoiles Physique et Instrumentation) dont une partie de la mécanique de la ligne à retard a été confié
- . IRCOM (Institut de Recherche en Communication Optiques et Micro-ondes) qui travaille sur la caractérisation des fibres monomodes en bandes J et H
- . DT/INSU (Division Technique de l'Institut National des Sciences de l'Univers) qui a participé à une partie de la conception des modules d'injection et de la ligne à retard. Son hall d'intégration est utilisé pour intégrer la ligne à retard 'OHANA. C'est dans ce même hall qu'a été intégré NAOS (optique adaptative du VLT)
- . Les télescopes CFHT, Keck et Gemini, qui proposent des nuits d'observations pour la démonstration et la faisabilité du projet.

## II. Interférométrie et très haute résolution angulaire

L'interférométrie longue base consiste à utiliser au moins deux télescopes indépendants dont on recombine de façon cohérente les faisceaux pour les faire interférer. C'est le principe utilisé pour obtenir une haute résolution angulaire, supérieure à la limite de diffraction de pupilles uniques (car la résolution devient fonction de la base et non du diamètre des télescopes). La compréhension des notions de cohérences spatiale et temporelle du rayonnement et de leurs conséquences permettent de mieux appréhender ce qu'on appellera l'observable interférométrique, c'est-à-dire la visibilité des franges. Mais l'observation interférométrique est bien évidemment limitée par la turbulence atmosphérique, qui dégrade la cohérence entre les fronts d'onde collectés par les différents télescopes et altère la qualité des données.

### 1. Cohérence spatiale

Considérons le cas d'une source spatialement étendue. La lumière émise par chaque point de celle-ci va passer par les ouvertures des deux télescopes et produire son propre système d'interférences. La superposition de chacune des contributions produit un système de franges dont le contraste est atténué puisque chaque point du champ donne naissance à un système de franges dont la phase dépend de sa position dans le champ (cf. figure 2.1).

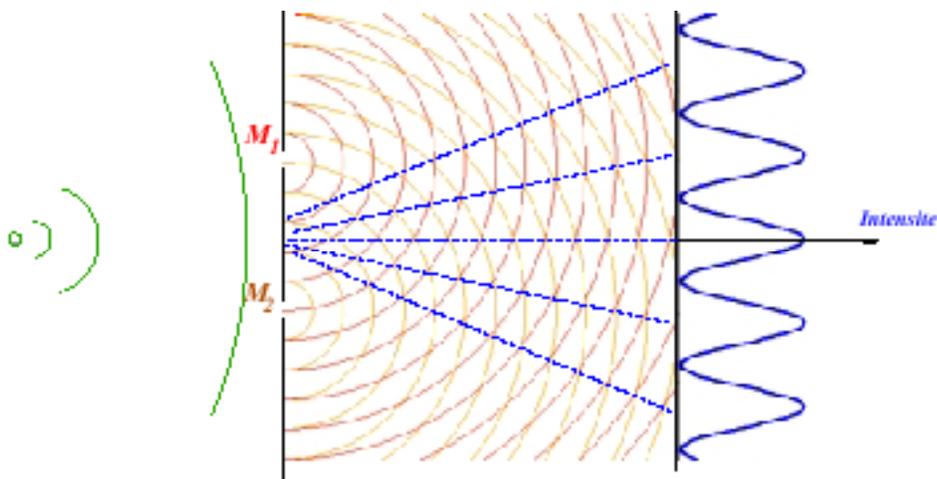


Figure 2.1 : Expérience des trous de Young

Le niveau d'interférences obtenues est donc lié à la répartition spatiale d'intensité de la source.

### 2. Cohérence temporelle

La notion de cohérence temporelle intervient lorsque l'on observe des sources de lumière non monochromatiques. Dans ce cas, le contraste des franges que l'on obtient diminue sur l'écran pour les positions de part et d'autre de la différence de marche nulle. Les franges sont alors visibles sur une étendue que l'on appelle longueur de cohérence temporelle et qui vaut:

$$l_c = \Delta \text{ opd} = \lambda^2 / \Delta\lambda \text{ avec } \Delta\lambda \text{ la largeur de bande de la source}$$

Le nombre de franges est donné par la relation :

$$\text{Nbre de franges} = l_c / \lambda = \lambda / \Delta\lambda$$

Dans le cas des interférences monochromatiques, on observe un système de franges dont la période est fixée par la longueur d'onde. En bande spectrale finie, les diverses contributions monochromatiques deviennent incohérentes entre elles aux grands ordres d'interférences et les interférences disparaissent (cf. figure 2.2).

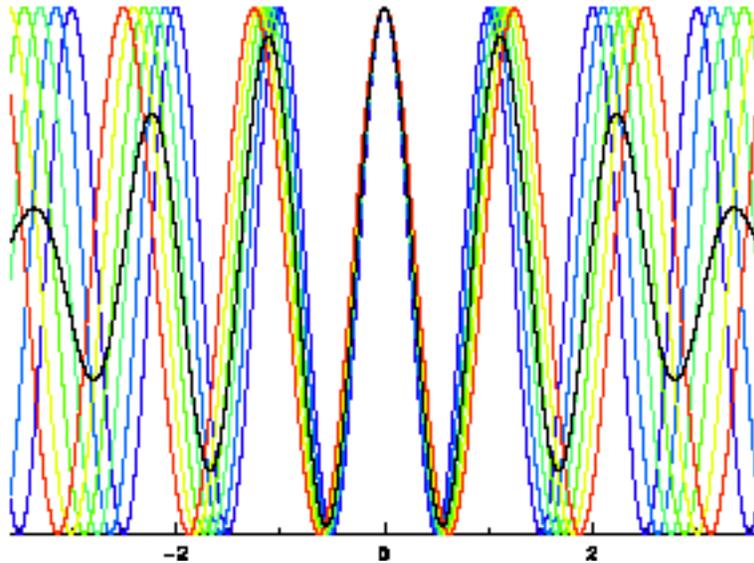


Figure2.2 : Franges polychromatiques dans un interféromètre de Michelson

Une largeur de cohérence temporelle finie a donc pour conséquence de moduler le signal des franges par une enveloppe décroissante.

### 3. L'observable interférométrique

L'observable en interférométrie, la visibilité (définie par le classique  $V = I_{\max} - I_{\min} / I_{\max} + I_{\min}$ ), donne accès à un point du spectre spatial de l'objet observé à la fréquence déterminée par la base de l'interféromètre projetée dans le plan normal à la direction de l'étoile B et par la longueur d'onde  $\lambda$ .

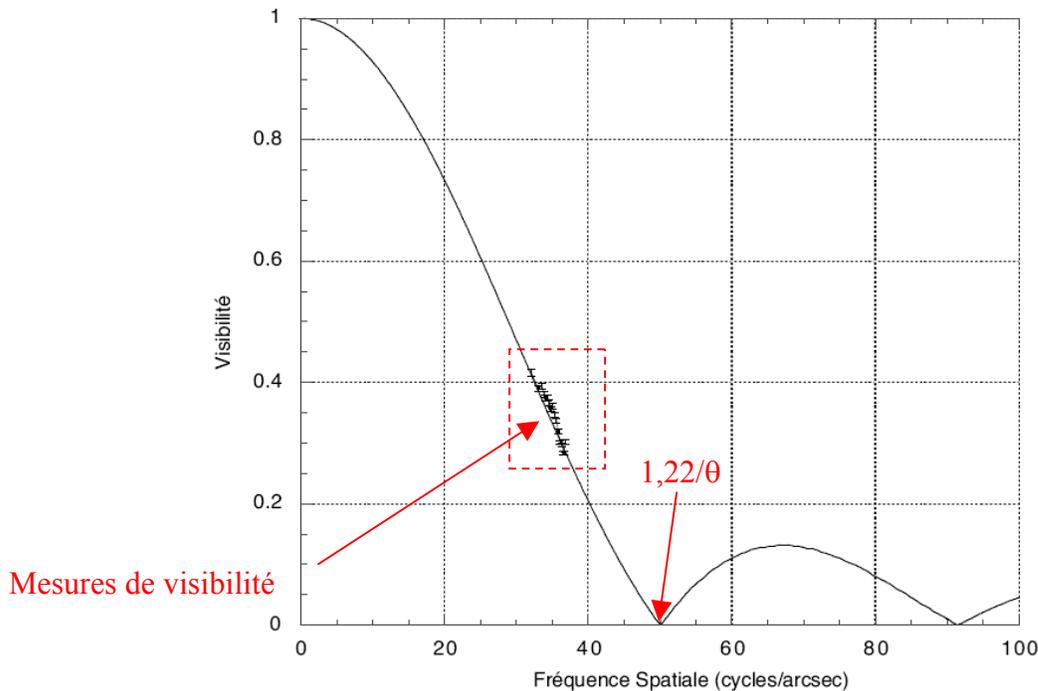
$$\mathbf{u} = \mathbf{B} / \lambda$$

On appellera le plan des fréquences angulaires le plan (u,v). Pour chaque point du plan (u,v), l'interférométriste se chargera d'en déduire une phase et un module appelé aussi visibilité complexe.

Prenons l'exemple d'une source modélisée par un disque uniforme. On mesure sa visibilité (la Transformée de Fourier du disque uniforme) qui est liée à une fonction de Bessel par:

$$V(\mathbf{u}) = 2J_1(\pi\theta\mathbf{u}) / (\pi\theta\mathbf{u})$$

$\vec{u}$  est la fréquence spatiale, coordonnée conjuguée dans l'espace de Fourier de la position angulaire  $\vec{\alpha}$  de la source,  $\theta$  étant le diamètre angulaire de l'objet.



**Figure 2.3 : Mesures de visibilité prises pour différentes bases avec les barres d'erreur associées**

Dans le cas du disque uniforme, il existe une relation linéaire entre le diamètre du disque et le premier zéro de la fonction de visibilité :

$$u = 1,22/\theta$$

Cette relation était utilisée par Michelson au 19<sup>ème</sup> siècle pour déterminer le diamètre des étoiles (ses franges n'étant pas exploitables, il ne relevait que la valeur ou le contraste des franges s'annulent).

L'objectif de l'observation en interférométrie à deux télescopes est donc d'observer des objets à différentes bases, c'est-à-dire à différentes fréquences spatiales. On peut ainsi échantillonner le signal qui contient l'information spatiale de la source. Sans reconstituer une image de l'objet observé, l'interférométrie permet d'obtenir une contrainte forte sur la forme de la courbe de visibilité, donc sur la répartition spatiale de la source à grande échelle (ou basses fréquences) ainsi qu'aux petites échelles (ou hautes fréquences). L'obtention d'images nécessite au moins 3 télescopes.

Qu'espérer apprendre de plus avec ce type d'instrument? Mesurer le diamètre des étoiles reste un objectif majeur de l'interférométrie. Bien qu'apparemment modeste, le diamètre d'une étoile est une information fondamentale pour les astronomes. Elle permet, en fonction du flux de lumière reçu sur Terre, de déterminer sa température et a posteriori, de préciser sa structure et d'affiner les modèles d'évolutions des étoiles en général. En combinant les observations à des longueurs d'onde différentes, on peut analyser les couches superficielles des étoiles et déduire comment varie leur composition chimique en fonction de la profondeur dans l'astre. Autre sujet d'intérêt pour la physique stellaire, la mesure des orbites des étoiles doubles: couplée à des mesures spectroscopiques, elle permettra de déterminer précisément leur masse. Pour des étoiles dites variables, l'interférométrie offre aussi un puissant moyen de voir leur photosphère gonfler et dégonfler.

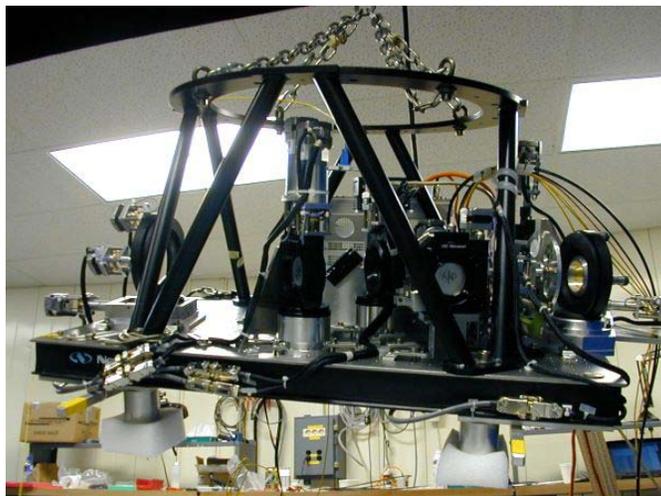
### III. Composantes de 'OHANA

Le projet complet comprend :

1. Des modules d'injection, destinés à injecter la lumière provenant des télescopes corrigés par optique adaptative dans la fibre optique;
2. Des fibres optiques monomodes dans l'infrarouge, pour conduire la lumière jusqu'au module de recombinaison;
3. La ligne à retard pour assurer une différence de marche nulle entre les deux faisceaux;
4. Le module de recombinaison proprement dit, ou recombineur.

#### 1. Module d'injection

Ce système est composé d'un jeu de miroirs et d'un embout de fibre optique placé au foyer de l'optique adaptative du télescope (cf. annexe 2). La fonction optique principale du module d'injection est de réaliser le grandissement optimum pour la tache d'Airy du télescope. Celui-ci sera plus détaillé dans le chapitre V.



**Figure 3.1.1 : Module d'injection lors des tests de flexion au CFHT**

Cependant, l'optique adaptative, déjà présente sur certains télescopes, à un rôle non négligeable dans ce domaine.

Avant de parler de l'injection proprement dite, je vais donc vous expliquer pourquoi on utilise une optique adaptative et son principe de fonctionnement.

## Optique adaptative

### a. Contexte

La résolution théorique d'un instrument est directement proportionnelle au diamètre de son collecteur de lumière. Pour un télescope à pupille circulaire de diamètre  $D$ , la séparation minimale  $\theta$  (en radian) qu'il permet de distinguer entre deux objets à la longueur d'onde  $\lambda$  ou pouvoir de résolution est:

$$\theta = \lambda / D$$

Si la progression vers des instruments plus gros s'est faite sans trop de problèmes, il en est différemment de celle des instruments à fort pouvoir résolvant. Et pour une raison simple : l'atmosphère empêche de voir des détails de plus en plus fins en perturbant les rayons lumineux qui nous proviennent de ces objets aussi éloignés qu'ils nous sont inconnus.

En effet, l'atmosphère n'est pas un milieu homogène : les mouvements de convection entraînent, par le mélange de couches d'air de températures différentes, des variations d'indice de réfraction qui modifient de manière rapide et aléatoire le trajet des ondes optiques. Il en résulte des fluctuations de phase et d'intensité (effet de scintillation dû aux effets de la diffraction par les plus hautes couches de l'atmosphère).

Si la théorie de diffraction des rayons lumineux prédit que plus l'ouverture est grande et plus le pouvoir résolvant est important, la résolution maximale, à cause de la turbulence atmosphérique, atteint une limite de l'ordre de la seconde d'angle.

En réduisant le diamètre des pupilles (20cm), on n'est plus limité par la turbulence atmosphérique. C'est donc pour cela que les interféromètres avaient de petites pupilles. De plus, les premiers interféromètres fonctionnaient aux ondes radio car plus la longueur d'onde est petite et plus l'on est sensible à la turbulence.

Une technique maintenant éprouvée, l'optique adaptative, permet de s'affranchir de cette limitation naturelle et de retrouver la résolution théorique des télescopes.

Le rapport de Strehl donne la qualité image, c'est-à-dire le rapport entre le maximum observé sur l'étoile et la théorie donnée par un télescope au système optique parfait et sans turbulence. Ce rapport est compris entre 0 et 1 : le système est parfait lorsqu'il atteint un rapport de Strehl de 1, ce qui est impossible dans la réalité. Le but de l'optique adaptative est d'obtenir un rapport de Strehl correspondant à la limite de diffraction du télescope.

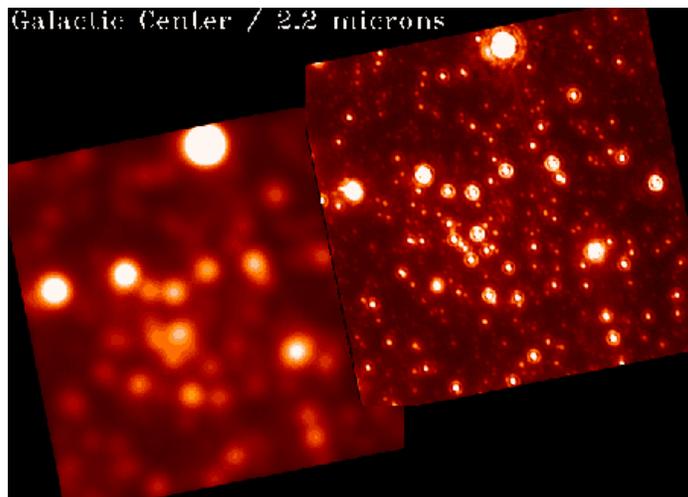


Figure 3.1.2 : A droite : Image sans optique adaptative – A gauche : Image avec optique adaptative 16

## b. Principe de fonctionnement

L'élément actif d'une optique adaptative est un miroir dit déformable. Il permet à l'optique adaptative d'épouser les défauts de phase introduits par la turbulence atmosphérique et donc de les corriger. La commande à appliquer à ce miroir déformable est obtenue par un ordinateur rapide. Le système travaille en boucle fermée (cf. figure 3.1.2).

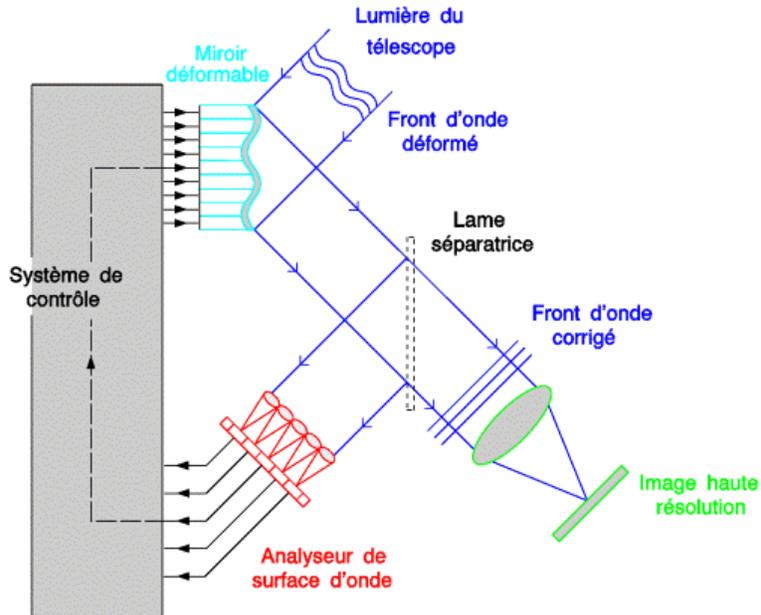


Figure 3.1.2 : Principe de fonctionnement d'une optique adaptative

Cependant, l'optique adaptative ne peut pas corriger la totalité des défauts introduits par l'atmosphère (il faut aussi prendre en compte les erreurs de commande du ordinateur et le bruit de l'analyseur de surface d'onde). Il reste toujours une phase résiduelle après correction.

Sans optique adaptative, l'énergie couplée dans une fibre monomode est très faible. Elle devient supérieure à 10% avec optique adaptative.

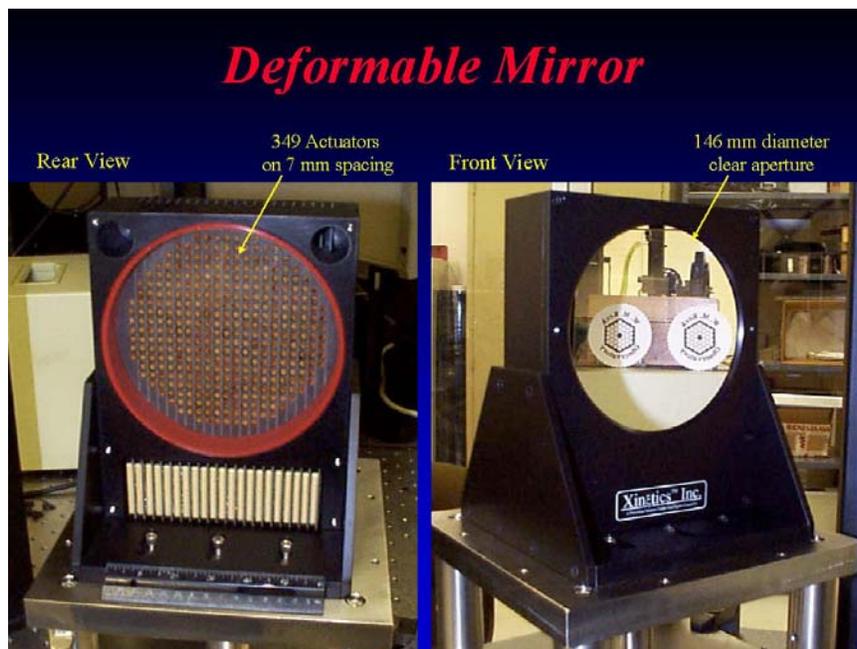


Figure 3.1.3 : Miroir déformable du Keck - Face arrière : Actuateurs piezo (349) Face avant : Face réfléchissante

Un système opto-mécanique, le module d'injection, permet d'interfacer les fibres optiques monomodes aux foyers corrigés par optique adaptative des différents télescopes. Pour une pupille de télescope circulaire classique, le champ obtenu au foyer est celui d'une tache d'Airy. Il ne peut donc pas y avoir injection parfaite dans la fibre (cf. figure 3.1.4).

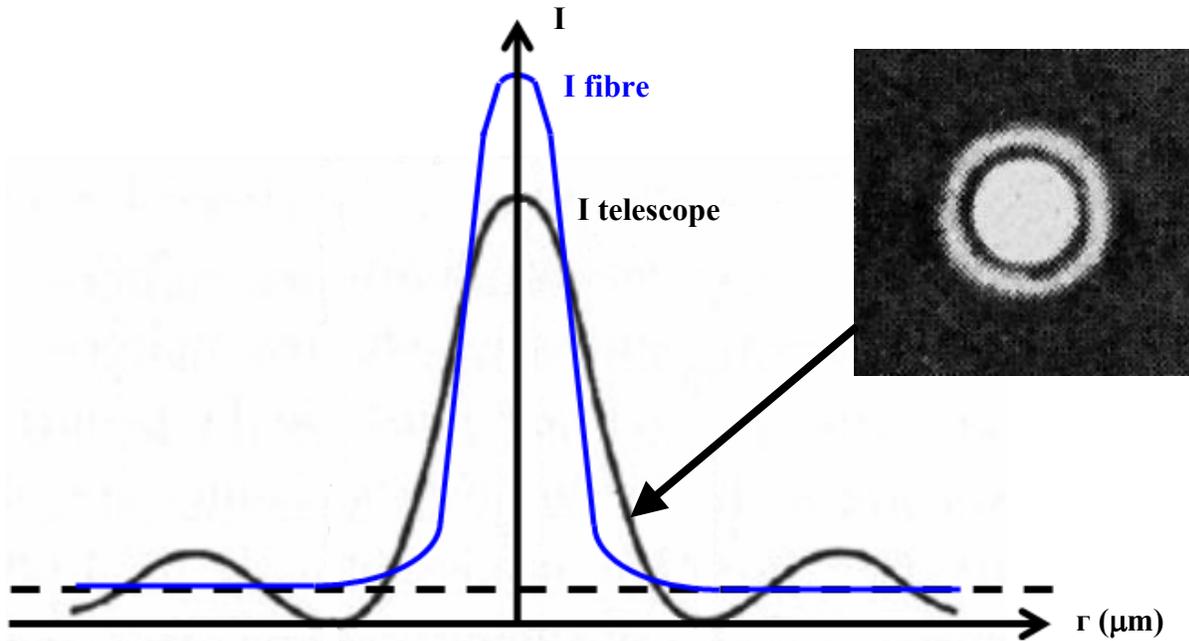


Figure 3.1.4: Inadéquation entre le champ du mode fondamental de la fibre et le champ de la tache d'Airy

Cette inadéquation est également présente en plan pupille ; il existe donc un taux d'injection maximum associé à chaque pupille. Le tableau 3.1.5 présente ce taux maximal pour la classe importante des pupilles circulaires à obstruction centrale.

Télescopes	J (1,25 µm)	H (1,6 µm)	K (2,2 µm)
CFHT	44%	51%	47%
Keck	64%	70%	60%
Gemini	75%	77%	61%

Tableau 3.1.5 : Taux d'injection théorique maximale pour différents télescopes

Cependant, cette démarche a été effectuée sans prendre en compte l'effet de la turbulence. Des tests réalisés dans le cadre de la phase I du projet en condition réelle sur les télescopes CFHT Gemini et KECK donnent les résultats fournis tableau 3.1.6:

Télescopes	Performance des optiques adaptatives			Taux d'injection		
	J	H	K	J	H	K
CFHT	~ 12%	~ 27%	~ 50%	~ 6%	~ 14%	~ 24%
Keck	~ 14%	~ 30%	~ 53%	~ 9%	~ 21%	~ 32%
Gemini	~ 21%	~ 38%	~ 60%	~ 16%	~ 29%	~ 37%

Tableau 3.1.6 : Performance des optiques adaptatives (rapport de Strehl) et taux d'injection moyen en attendus pour différents télescopes

## 2. Fibres optiques monomodes

Les fibres optiques classiques ne sont pas a priori monomodes. L'onde lumineuse qui s'y propage peut-être composée de nombreux modes, de phases différentes et aléatoires, qui se superposent et donnent globalement une forme gaussienne à l'étalement de l'intensité en sortie. Une fibre devient monomode lorsque la longueur d'onde de la lumière véhiculée devient du même ordre de grandeur ou supérieur au diamètre de la fibre. Ce mode de fonctionnement implique en pratique que le diamètre des fibres soit très petit (de l'ordre de quelques microns).

Le matériau utilisé est du verre fluoré, pour réaliser la transmission de la lumière dans l'infrarouge. Il s'agit là d'une technologie de pointe.

En interférométrie, l'intérêt d'une fibre monomode se situe dans le fait que le mode fondamental, seul propagé, a un profil imposé et une phase constante dans une section de la fibre. La structure transversale du champ est conservée au cours du transport du faisceau. On obtient alors un filtre spatiale parfait : la cohérence spatiale est donc maximale.

De plus, les fibres monomodes apportent une solution efficace au problème crucial de la calibration des visibilités en interférométrie stellaire. En forçant la cohérence spatiale transverse de l'onde, elles transforment les fluctuations de phase sur la pupille en fluctuations d'intensité de la lumière, qui peuvent facilement être mesurées et servir de signaux de calibration pour corriger la visibilité des interférogrammes des effets de la turbulence atmosphérique.

Les fibres utilisées sont en bandes spectrales J [1,1;1,4 $\mu\text{m}$ ], H [1,4;1,8 $\mu\text{m}$ ] et K [2,2;4 $\mu\text{m}$ ]. Elles correspondent aux bandes spectrales utilisées en astronomie et tout particulièrement sur le projet 'OHANA. Nous travaillons à ces longueurs d'onde car ce sont les bandes de transmissions, l'atmosphère étant constituée d'eau qui absorbe une partie du spectre. Les fibres en bandes J et H sont en silice alors que la bande K est en verre fluoré.

En effet, les fibres en silice, largement utilisées dans le monde des télécommunications, ont une très bonne transmission dans le visible et très proche infrarouge (<1,9  $\mu\text{m}$ ). Leur transmission commence à chuter au-delà de 1,9  $\mu\text{m}$ . Seuls les verres fluorés permettent la fabrication de fibres monomode en bande K à forte transmission.

L'utilisation des fibres optiques pour effectuer la liaison des télescopes permet de s'affranchir des contraintes géographiques locales. Le transport des faisceaux par un système optique classique nécessiterait la réalisation de longs tunnels et ferait usage d'un nombre important d'optiques réfléchives. Cette solution rendrait l'instrument complexe, coûteux et nuirait à sa sensibilité (réflexions, diffraction).

Ce procédé de transmission par éléments optiques est utilisé par le Keck et le VLTI (Very Large Telescope Interferometer). Quinze miroirs sont utilisés avant sortie du télescope puis quinze autres pour transmettre le faisceau à la salle de contrôle ce qui est énorme (une simple poussière provoque des pertes dues à la diffusion). En général, le signal obtenu est de quelques pourcent du signal d'entrée.

Dans l'interféromètre 'OHANA, les fibres monomodes en verre fluoré ont une perte de 3db sur 300m ce qui représente une transmission de 50% (et 80% pour les fibres en silice).

Bien sûr, on ne peut pas utiliser un amplificateur contrairement aux applications télécoms car on perd la cohérence de nos photons. Le paquet de franges ne pourra donc pas être obtenu dans ces conditions.

Enfin, niveau coût, l'utilisation de fibres optiques reviendrait moins cher que la construction d'un tunnel et les éléments optiques nécessaire pour la transmission du signal (même si une paire de fibres en verre fluoré de 300m en bande K coûte 166 k€).

### 3. Ligne à retard

Les rayons issus d'un objet astronomique et passant par deux télescopes distincts sont en général de longueur différente sauf lorsque l'objet passe au méridien de la base. La ligne à retard a donc pour fonction de retarder ou d'avancer la lumière de façon à égaliser les chemins optiques dans les deux bras de l'interféromètre.

Elle se compose de plusieurs miroirs se déplaçant sur des chariots dont on doit pouvoir contrôler la position à une fraction de longueur d'onde. L'objet astronomique étant en mouvement apparent du fait de la rotation terrestre, la ligne à retard doit également permettre de maintenir la différence de marche nulle en suivant le déplacement du paquet de franges à mesure que la source observée traverse le ciel.

Mon principal travail a consisté à intégrer la ligne à retard Gemini – CFHT (cf. annexe 3). Son principe de fonctionnement ainsi que les composantes qui la constituent seront détaillés dans le chapitre VI.

### 4. Recombinateur

Il existe deux méthodes afin de moduler la différence de marche pour générer les franges dans un interféromètre. La première consiste à varier le délai entre les deux faisceaux en translatant un miroir ou un rétro-rélecteur. Cette méthode est utilisée dans les interféromètres coaxiaux où deux faisceaux parallèles sont superposés par une lame séparatrice comme dans un interféromètre type Michelson. La modulation des franges est temporelle dans ce cas-là. Dans la seconde méthode, les franges sont générées de façon spatiale en focalisant deux faisceaux séparés avec une même lentille. Dans un interféromètre à fibres monomodes, une partie de l'énergie des deux faisceaux est prélevée avant la recombinaison pour mesurer la photométrie. Ainsi, cela permet de corriger l'interférogramme a posteriori pour la perte de contraste des franges due à la différence de flux entre les deux faisceaux. Cependant, la correction photométrique nécessite qu'une fraction des photons incidents soit supprimée des faisceaux interférométriques, ce qui a pour effet une perte de sensibilité et nécessite également de détecter deux canaux supplémentaires (cf. figure 3.4.1).

Le recombineur 'OHANA propose de combiner les deux modulations, temporelle et spatiale, afin de coder à la fois la figure d'interférence et les signaux photométriques. Pour cela, le recombineur va effectuer deux recombinaisons successives, la première réalisée par un coupleur à fibres et la seconde en focalisant les deux faisceaux provenant du coupleur. À partir de la figure d'interférence obtenue, il est possible de remonter à la fois à l'information photométrique et au contraste des franges. La figure 3.4.2 présente le principe de ce recombineur (partie spatiale).

Ce recombineur a été testé pour la première fois avec succès en juillet 2003 sur l'interféromètre IOTA (Infrared and Optical Telescope Array situé en Arizona).

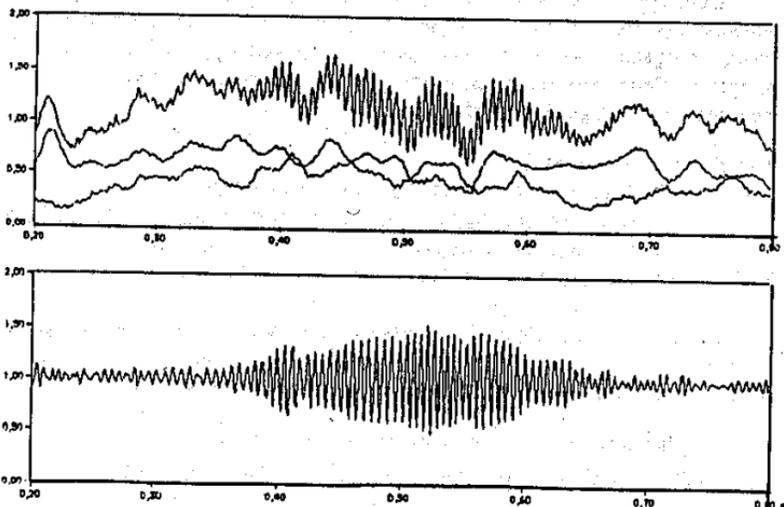


Figure 3.4.1 : Haut : Interférogramme brut et ses 2 signaux de calibration - Bas : Interférogramme corrigé

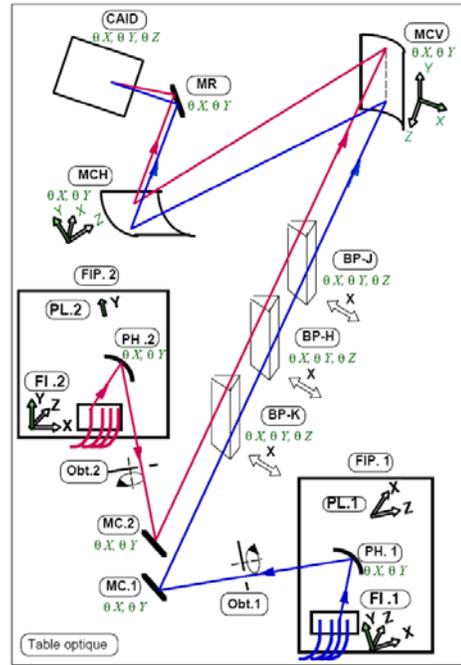
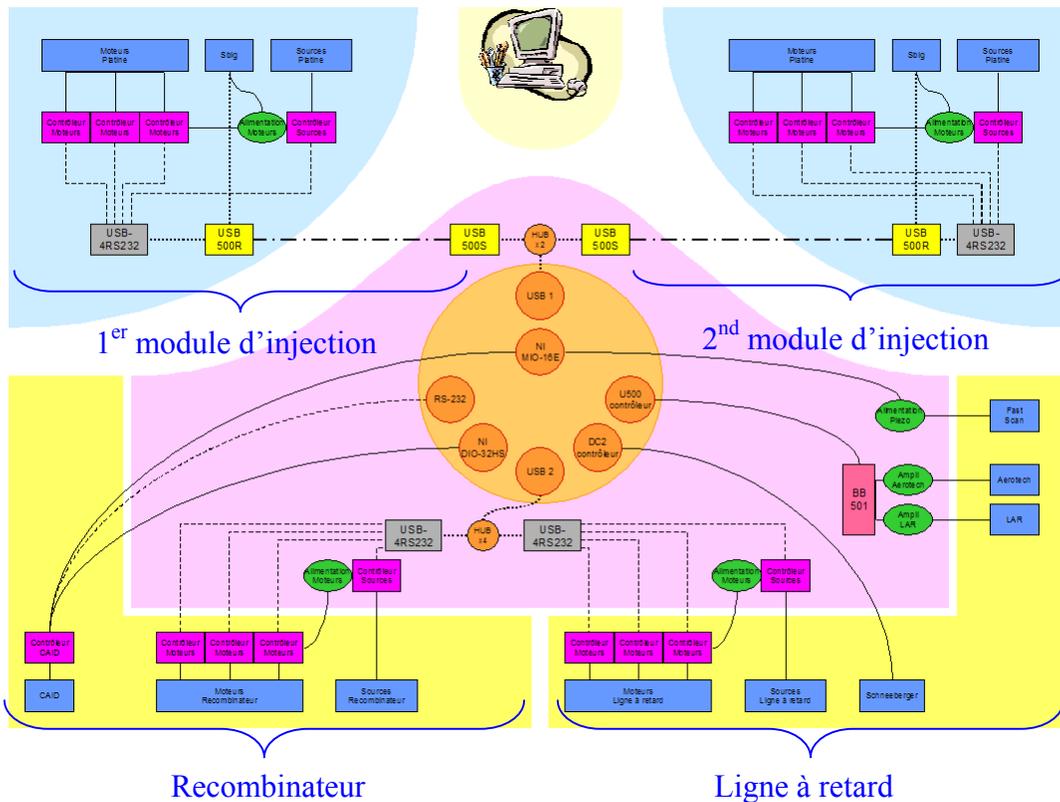


Figure 3.4.2 : Schéma du recombineur (partie spatiale)

## 5. Contrôle

L'ensemble des ces 4 systèmes sera relié à un PC par fibres optiques. Un seul PC commandera tous les moteurs OHANA (2 platines d'injection, la ligne à retard et le recombineur soit 48 moteurs au total).

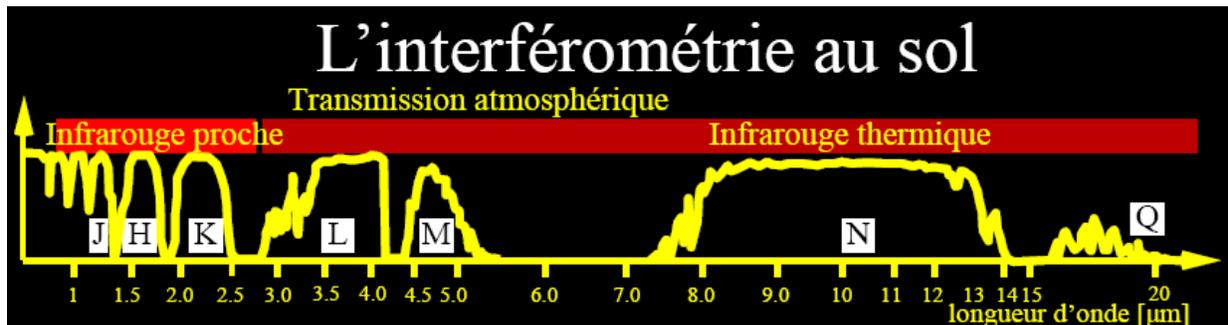


## IV. Caractérisations interférométriques des fibres optiques monomodes en verre fluoré

### 1. Présentation

Trois différents types de fibres sont utilisées pour les bandes spectrales J [1,1;1,4 $\mu\text{m}$ ], H [1,5;1,8 $\mu\text{m}$ ] et K [2;2,4 $\mu\text{m}$ ].

Ces bandes sont les bandes de transmission de l'atmosphère utilisées par 'OHANA et qui réalisent le compromis entre résolution spatiale et performance des systèmes d'optique adaptative.



Les fibres en bandes J et H sont en silice alors que celles de la bande K sont en verre fluoré.

En effet, les fibres en silice, largement utilisées dans le monde des télécommunications, ont une très bonne transmission dans le visible et très proche infrarouge (<1,9  $\mu\text{m}$ ). Leur transmission commence à chuter au-delà de 1,9  $\mu\text{m}$ . Seuls les verres fluorés permettent la fabrication de fibres monomode en bande K à forte transmission. Ces fibres sont fabriquées par une entreprise de la banlieue de Rennes au nom de circonstance : Le Verre Fluoré.

Mon sujet de stage est l'intégration de la ligne à retard. Cependant, durant les premières semaines, les supports mécaniques n'étant pas sortis d'usine mais surtout dans le but de m'intégrer plus facilement à l'équipe et au monde de l'astronomie, j'ai travaillé avec un étudiant en thèse d'astronomie, Takayuki KOTANI, sur son montage- interféromètre qui permet de tester les fibres 'OHANA.

Cet interféromètre est de type Mach Zehnder, dont les bras sont les fibres à tester (cf. figure 4.1). Ce montage a pour but de tester les performances des fibres afin de voir l'influence de certains paramètres à prendre en compte en condition réelle.

Il doit simuler les franges d'interférences obtenues par deux télescopes. On utilise donc une source blanche naturelle pour se mettre en condition réelle.

Nous ne travaillons qu'en bande K, les fibres des bandes J et H (cf. annexe 4) étant caractérisées par l'IRCOM (Institut de Recherche en Communication Optiques et Micro-ondes).

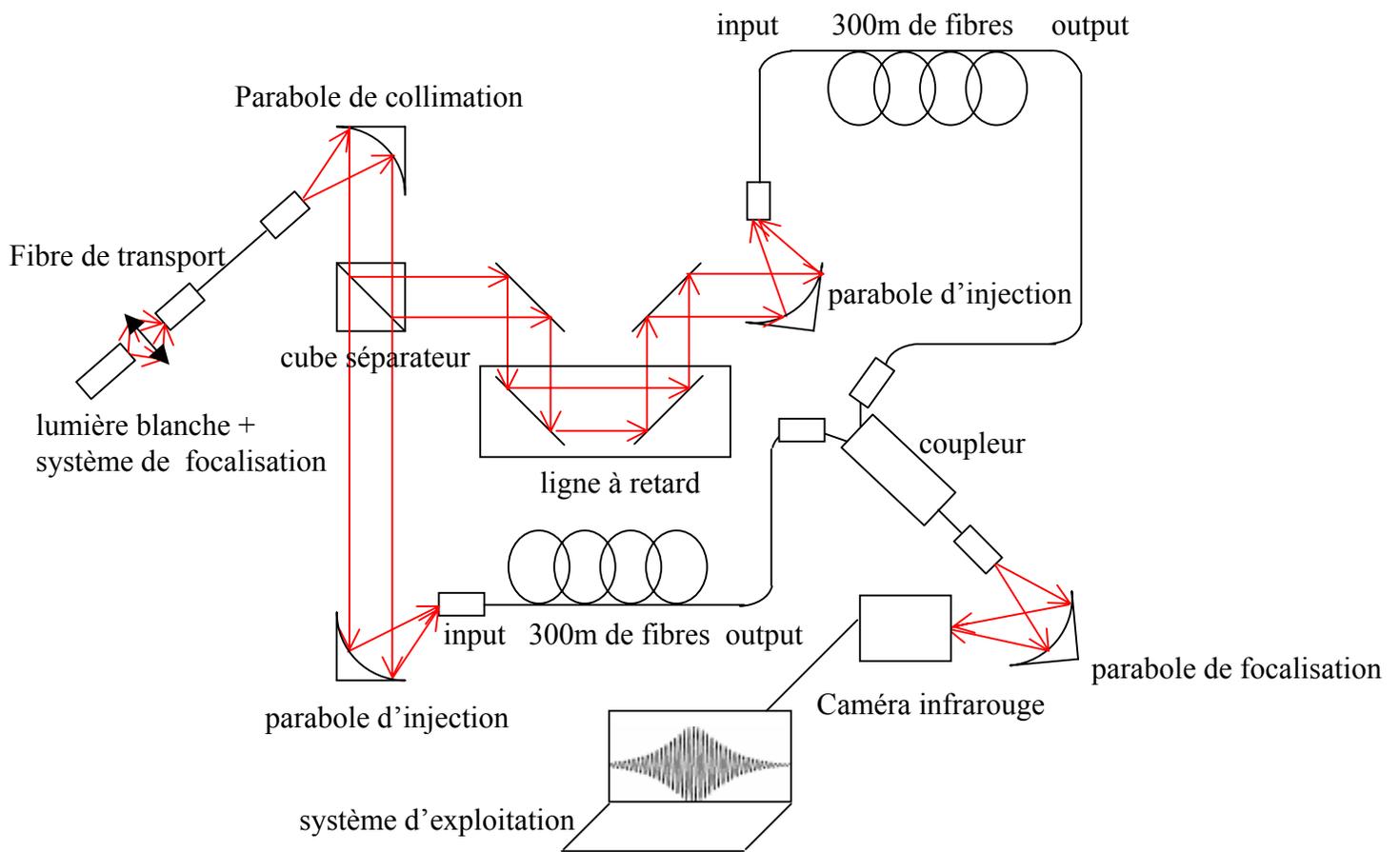


Figure 4.1 : Schéma de l'interféromètre

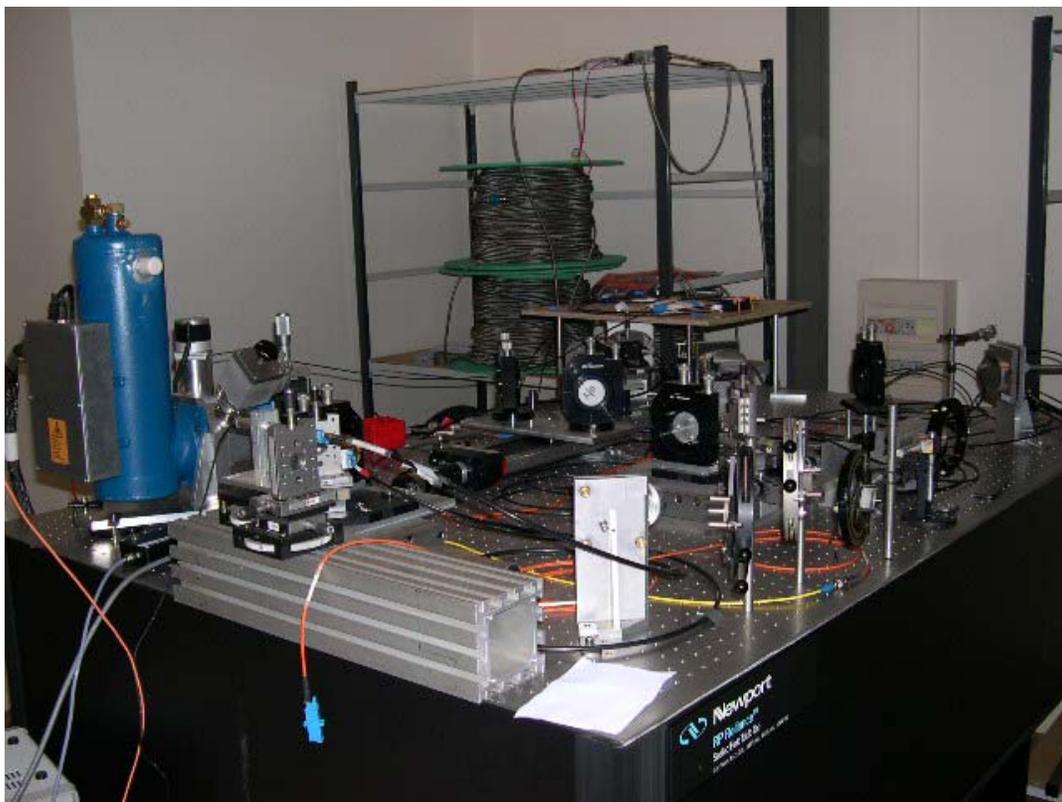


Figure 4.2 : Photo de l'interféromètre

Les paraboles de collimation et de focalisation sont des paraboles hors axe de distance focale 50,8 mm (2 pouces). Elles permettent de rendre le faisceau en sortie de fibre afocal (de diamètre 50,8 mm) ou inversement, d'injecter le faisceau afocal dans les fibres.

La dernière parabole est placée de manière à focaliser le faisceau de sortie sur un pixel du détecteur et joue le rôle d'objectif pour celui-ci.

Le cube séparateur permet d'obtenir 2 faisceaux émergents à l'aide d'un faisceau incident (50%-50%).

La ligne à retard, qui est une table de translation Schneeberger, (course de 20 cm et pas de 0,2  $\mu\text{m}$ ) permet d'obtenir une différence de marche nulle entre les 2 bras de l'interféromètre. Une variation de quelques microns de la différence de marche permet de dessiner le paquet de franges. Pendant la période où j'ai travaillé sur ce montage, seules les fibres en bandes K ont été utilisées.

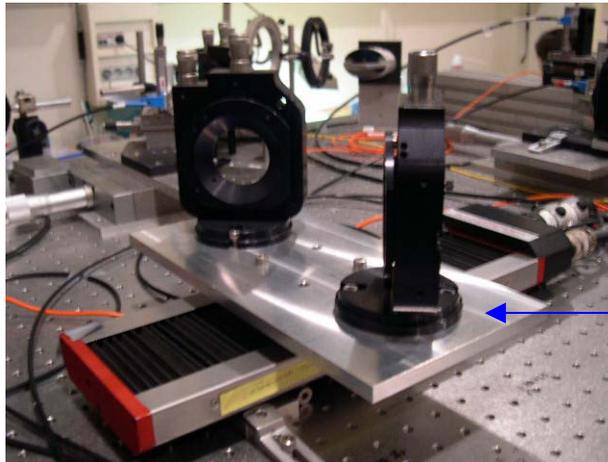
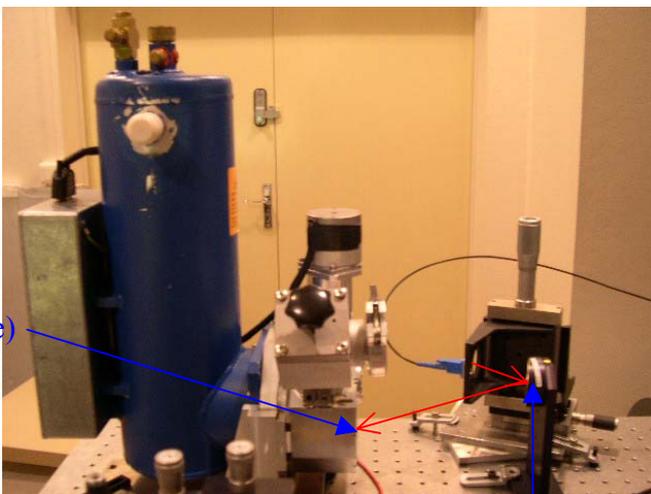


Table Schneeberger servant de ligne à retard

Les interférences obtenues sont de très faible intensité. Pour les détecter on utilise un détecteur NICMOS (Near Infrared Camera and Multi-Object Spectrometer). Ce détecteur est très sensible : on est donc obligé de travailler avec une intensité de source réduite.

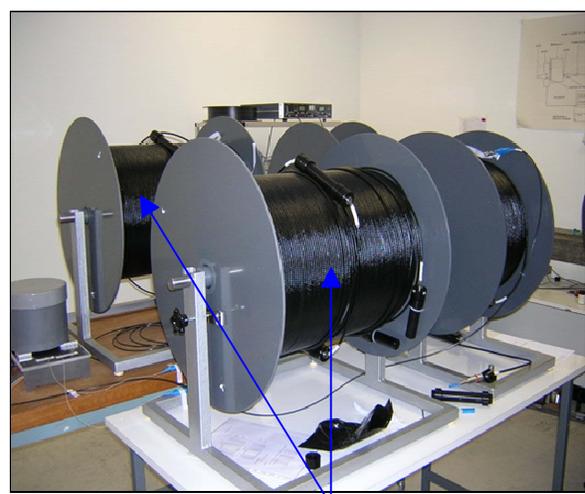
Celui-ci dispose d'un système de lecture à cadence rapide ( $> 1\text{kHz}$ ) pour pouvoir réaliser des acquisitions plus rapidement que le temps d'évolution de la turbulence. Cette fréquence de trame de plusieurs centaines de Hertz est obtenue en ne lisant que la partie utile du détecteur (on focalise sur 1 pixel).

Le détecteur dispose d'un système de refroidissement permettant de réduire le fond thermique du détecteur (refroidi à l'azote liquide / 77 Kelvins).



NICMOS (Hg Cd Te)

parabole de focalisation



2 x 300m de fibre en bande K

En effet, en astronomie, on a besoin d'une grande sensibilité mais on ne récolte que très peu de photon! Cependant, on ne peut utiliser un photomultiplicateur car ces systèmes fonctionnent dans le visible et non dans l'infrarouge.

Le détecteur comporte une roue à filtre motorisée permettant de sélectionner le filtre approprié (12 positions) contenant les 3 bandes astronomiques J, H et K. Les résultats du détecteur sont exploités à l'aide du logiciel LabVIEW.

LabVIEW est un langage de programmation graphique comportant de nombreux avantages pour son utilisation dans le projet 'OHANA. Ce langage permet de contrôler de nombreuses cartes d'interface, de gérer des échanges entre plusieurs postes de contrôles et surtout, de faire efficacement des modifications du logiciel lorsque le besoin s'impose. Pour dessiner les franges, la petite variation de la différence de marche (de l'ordre de  $100 \mu\text{m}$ ) à l'aide la ligne à retard est effectuée à l'aide de ce même logiciel.

L'ordinateur placé à côté du montage sert donc de système de commande et de système d'exploitation.

## 2. Dispersion différentielle des fibres

La dispersion chromatique résulte de la variation de l'indice de réfraction de la fibre en fonction de la longueur d'onde et donc, plus on a de dispersion chromatique et plus le paquet de franges s'élargit. Or, si le paquet de franges s'élargit, l'information principale, la visibilité, diminue. Il faut donc avoir le moins de dispersion chromatique (différentielle) afin d'avoir le paquet de franges le plus étroit possible.

Une solution astucieuse a été trouvée par Le Verre Fluoré pour équilibrer en dispersion les 300 mètres de fibres nécessaires pour la liaison Gemini- CFHT. Elle consiste en un assemblage astucieux de différents tronçons aux caractéristiques de dispersion variables d'un tronçon à l'autre. Le résultat de cette méthode d'équilibrage est tout à fait satisfaisant. La dispersion de la paire de 300 mètres n'est pas beaucoup plus élevée que celle obtenue sur un couple de quelques mètres (cf. figure 4.3).

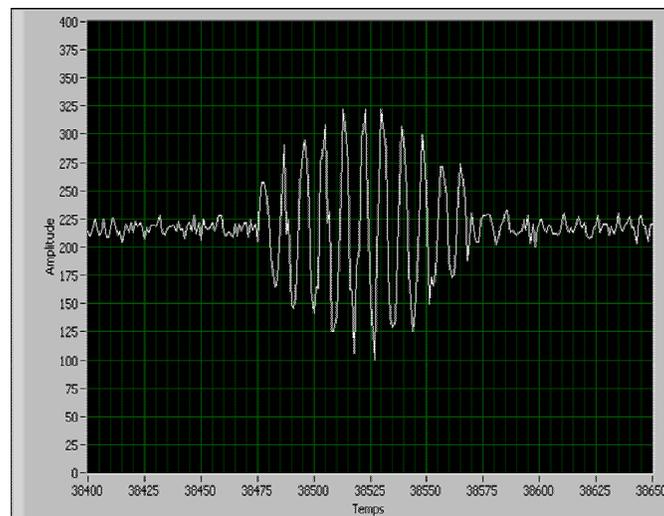


Figure 4.3 : Interférogramme en bandes K pour les fibres de 300 mètres

### 3. Polarisation

Une perte importante du contraste peut provenir de la modification de l'état de polarisation des deux faisceaux par l'instrument. La lumière émise par une source stellaire est la somme des radiations aléatoire émises par les atomes qui la constituent. Elle est en général non polarisée, on parle alors de lumière thermique ou naturelle.

Cependant, lors de la recombinaison des faisceaux, si les 2 états de polarisation ne sont pas exactement les mêmes, on aura une perte de contraste.

Une fibre est dite biréfringente lorsqu'il y'a une différence d'indice effectif pour les deux polarisations du mode de la fibre : les deux polarisations ne parcourent pas la fibre à la même vitesse. Une fibre à maintien de polarisation est une fibre où la biréfringence est forcée de façon à ce que les vitesses de propagation des deux polarisations soient suffisamment différentes pour qu'elles se comportent de façon indépendantes.

Dans le cas des fibres en verre fluoré, aucune biréfringence n'a été constatée sur les distances courtes utilisées jusqu'à présent dans les coupleurs. Des tests plus approfondis ont été entrepris sur de longues distances. Les résultats confirment cette absence de biréfringence. Le seul effet introduit par ces fibres sera celui d'une rotation des polarisations. La compensation de cette rotation peut se faire d'une façon identique à celle pratiquée sur l'instrument FLUOR (Fiber Linked Unit for Optical Recombinaison, instrument utilisé sur l'interféromètre IOTA en Arizona), c'est-à-dire au moyen des boucles de Lefèvre (« oreilles de Mickey »). Des contrastes supérieurs à 95% ont ainsi été obtenus sur le ciel avec FLUOR. Pour les fibres en Verre Fluoré de 'OHANA, des contrastes supérieurs à 90% ont été obtenus.

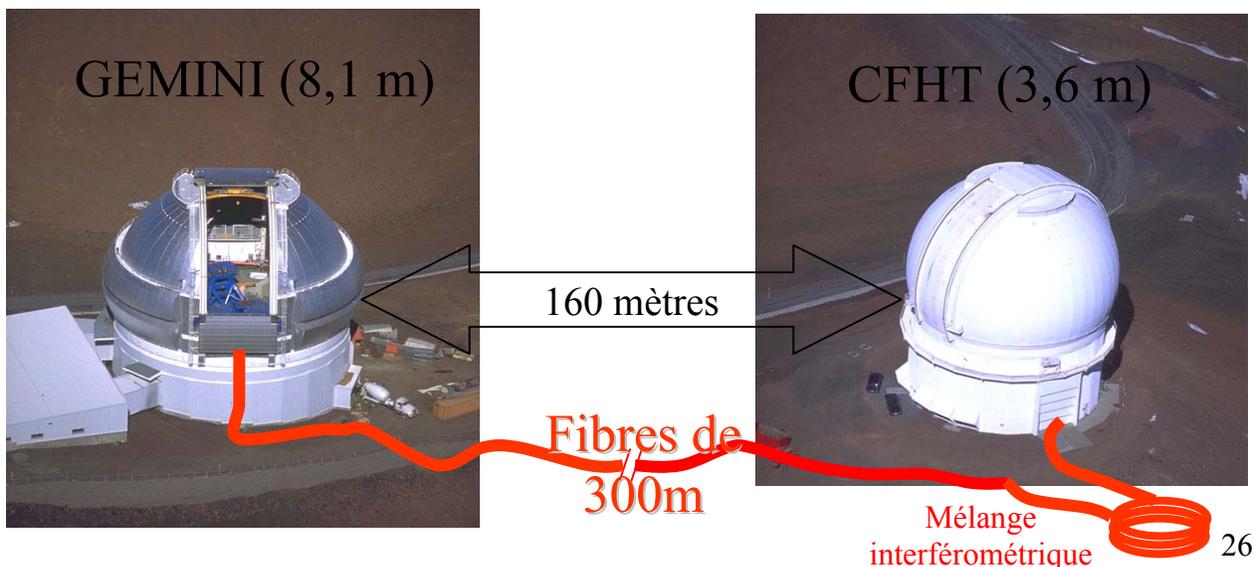
A noter que les fibres en silice sont à maintien de polarisation et qu'il n'y a donc pas de problème de rotation de polarisation en bandes J et H. Cependant, on doit filtrer un des axes de polarisation à cause de la forte biréfringence des fibres (cf. annexe 4).

### 4. Influence d'une variation de température

Les 2 tronçons de 300 mètres de fibres équilibrés en dispersion vont permettre de réaliser la base Gemini –CFHT pour ce qui sera la seconde recombinaison à 2 télescopes en phase II.

La ligne à retard étant installée sur le télescope CFHT, le tronçon de fibre provenant du télescope Gemini sera exposé à l'extérieur sur une distance d'environ 150 mètres.

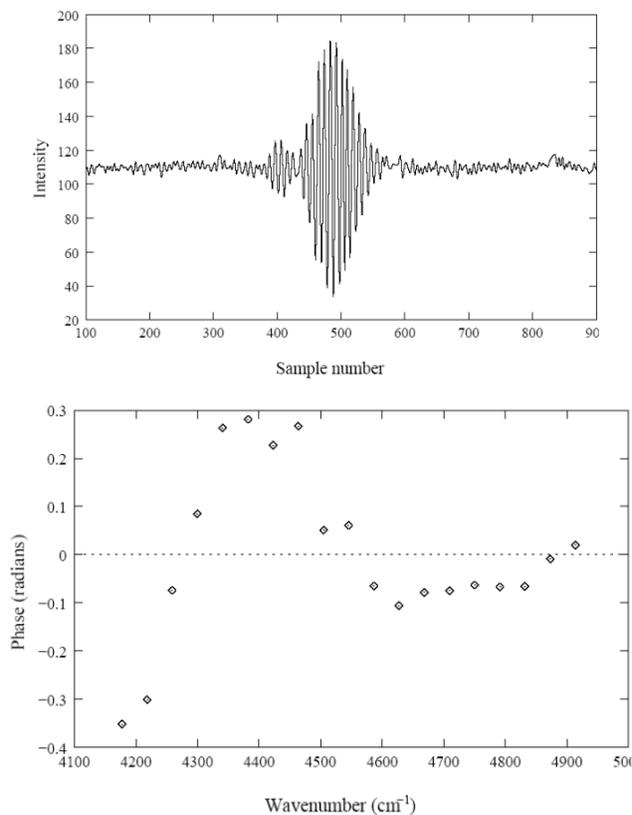
Nous savons que les fibres sont très sensibles à la température. Nous allons donc caractériser l'effet d'une variation de température (qui pourrait se produire durant une observation) sur la dispersion différentielle des fibres et la position des franges.



Pour cela, nous disposons d'un climatiseur (cf. figure 4.4) dans lequel nous installons les 150 mètres de fibres correspondant aux fibres qui seront disposées à l'extérieur des télescopes, entre le télescope Gemini et CFHT. La variation de température se fera sur une plage de 5 °C.

En interférométrie, la quantité importante est la différence de phase entre les deux bras de l'interféromètre. La dérivée première de la phase est associée à la notion de position de l'interférogramme tandis que la dérivée seconde est associée à la notion d'étalement de l'interférogramme (dispersion).

La figure ci-dessous montre l'interférogramme obtenu en laboratoire. La courbure de phase (dérivée seconde de la phase) est de 2  $\mu\text{rad}\cdot\text{cm}^2$  ce qui correspond à une dispersion différentielle quasiment nulle (cf. figure 4.4)



**Figure 4.4 : À gauche : Interférogramme avec sa courbure de phase - À droite : Photo du climatiseur**

Le laboratoire accueillant les fibres est à une température constante de 20°C. Nous faisons varier la température entre 20 et 25°C sur les 150 mètres de fibres. Pour chaque variation de 1°C, nous attendons environ 20 minutes afin que le climatiseur soit stabilisé en température.

La différence de température entre les 2 bras de l'interféromètre provoque une modification de la position centrale des franges de 2.3 mm /°C. Pour une variation de température de 5°C, l'interférogramme s'est alors déplacé de 12 mm (cf. figure 4.5).

Cette même différence de température entre les 2 fibres induit de la dispersion différentielle, de l'ordre de 12  $\mu\text{rad}\cdot\text{cm}^2/\text{degré}$  (cf. figure 4.5).

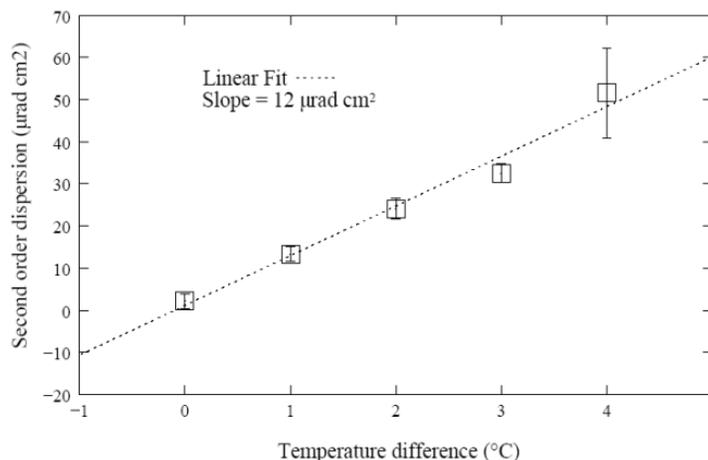
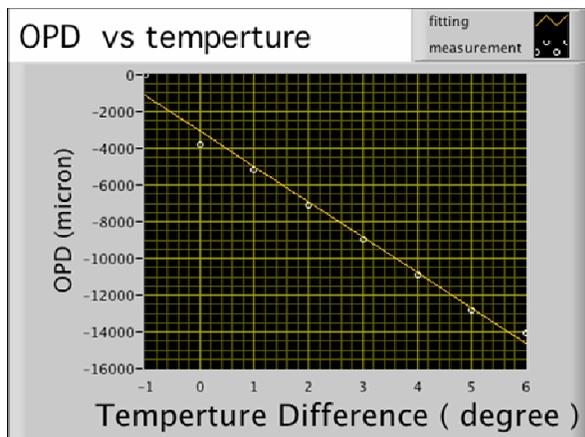


Figure 4.5 : À gauche : Variation de la différence de marche en fonction de la température  
 À droite : Dispersion différentielle en fonction de la température

La figure 4.6 montre l'influence de la dispersion différentielle due à la variation de température sur la qualité du paquet de franges. L'interférogramme est étalé et l'information principale, le contraste, ne peut être exploitée.

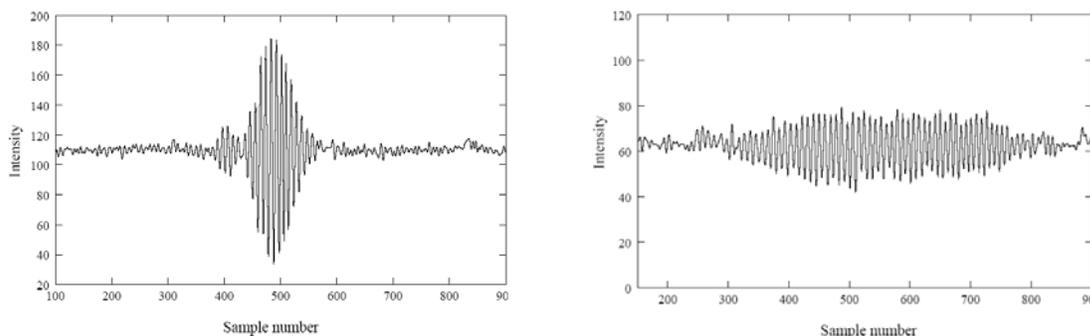
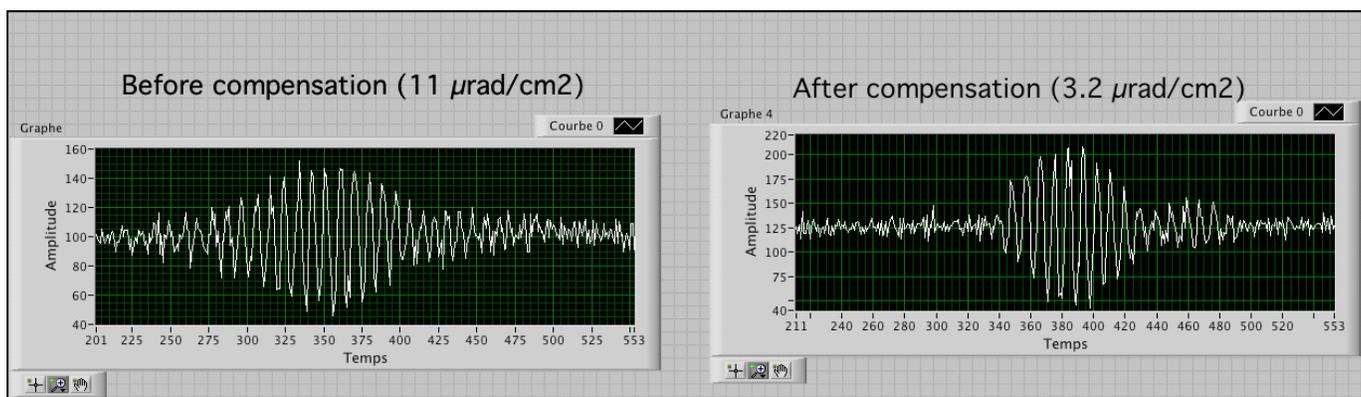


Figure 4.6 : Interférogramme sans variation de température (à gauche) et avec une variation (à droite) de température de 4°C

Cette dispersion différentielle a été compensée par ajout d'une épaisseur variable de CaF2 (composition très proche de celle du Verre Fluoré) pour retarder le bras le plus court (c'est-à-dire le bras dont les fibres n'ont subi aucune variation de température).



Ce travail a donné lieu à un article qui a été présenté à la conférence SPIE (The International Society for Optical Engineering) à Glasgow en juin 2004 et à un second qui sera soumis à une revue d'optique à la rentrée.

## V. Montage – réglage des modules d'injection Keck 1 – Keck 2

Le module d'injection, placé au foyer de l'optique adaptative du télescope, permet l'injection du faisceau dans les fibres monomodes. Il a déjà été testé aux foyers de CFHT, de Keck I et de Gemini.

La prochaine étape majeure du projet est la recombinaison des télescopes CFHT et Gemini en installant les fibres optiques et la ligne à retard dans la Coudé Room du CFHT. Il s'agit d'une étape importante mais potentiellement risquée compte tenu de la différence importante entre les deux télescopes et de la difficulté de connaître leur rotation de champ, leur polarisation ou la longueur de base exacte entre les deux télescopes.

Le risque est que si cette première expérience n'est pas un succès, la faute soit attribuée à la technique de recombinaison par fibres optiques, alors que le problème pourrait venir du manque de temps pour éliminer tous les nouveaux problèmes.

Il a donc été décidé de procéder à une étape intermédiaire afin de réduire les risques. Cette étape consiste à recombinaison pour la première fois les deux télescopes Keck par fibres optiques en utilisant les installations de l'interféromètre Keck (ligne à retard et recombinateur).

### 1. Interface entre l'Optique Adaptative Keck et la platine d'injection 'OHANA

#### a. Système d'Optique Adaptative Keck

Le miroir primaire des deux télescopes Keck est constitué de 36 segments hexagonaux de 1.8 mètres de diamètre coin à coin. La surface collectrice du miroir est équivalente à un miroir de 10 mètres de diamètre.

Le système d'optique adaptative est alimenté par un miroir secondaire ouvert à  $f/15$  (le faisceau d'ouverture est à  $f/15$  car dans cette configuration, la distance focale du télescope est de 150 mètres avec un miroir primaire de 10 mètres) et un miroir plan tertiaire qui renvoie le faisceau sur la plate- forme Nasmyth selon l'axe d'altitude des montures alt-azimutales.

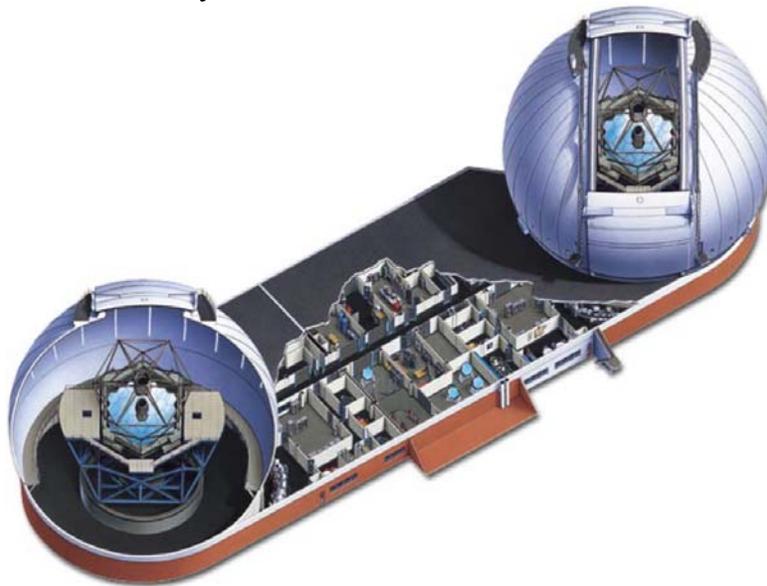


Figure 5.1.1 : Les 2 télescopes Keck et leurs installations

Le banc de l'optique adaptative Keck est présenté en figure 5.1.2. Le parcours du faisceau scientifique consiste en un rotateur d'image (3 miroirs plans), un miroir tip-tilt (miroir déformable), une parabole hors-axe pour collimater le faisceau et ré-imager le miroir primaire sur un miroir déformable à 349 actuateurs. Une seconde parabole hors-axe identique à la première qui refocalise le faisceau avec le même rapport d'ouverture et la même position de pupille que pour le faisceau incident du télescope. Enfin, une lame dichroïque transmet l'infrarouge et réfléchit le visible vers l'analyseur de surfaces d'onde.

Un miroir de renvoi peut être inséré sur un support motorisé afin de réfléchir le faisceau à travers une seconde position d'instrument avec NIRSPEC (pour Keck II). Ce foyer est nominalelement situé à 897 nm après le miroir de renvoi.

Les Field Steering Mirrors (FSMs) permettent au champ scientifique d'être centré sur la caméra scientifique (ou sur la fibre dans le cas d'OHANA) en utilisant une étoile guide naturelle dans un rayon d'environ 40 secondes d'angle. Les FSMs peuvent être positionnés avec une précision meilleure que 10 millisecondes d'angle.

Les systèmes d'optique adaptative de Keck I et Keck II sont parfaitement identiques excepté le fait que le banc optique de Keck I ne dispose pas du miroir de renvoi. En effet, l'optique adaptative de Keck I est uniquement utilisée pour l'interférométrie tandis que deux instruments (NIRSPEC et NIRC 2) sont installés aux foyers de l'optique adaptative de Keck I.

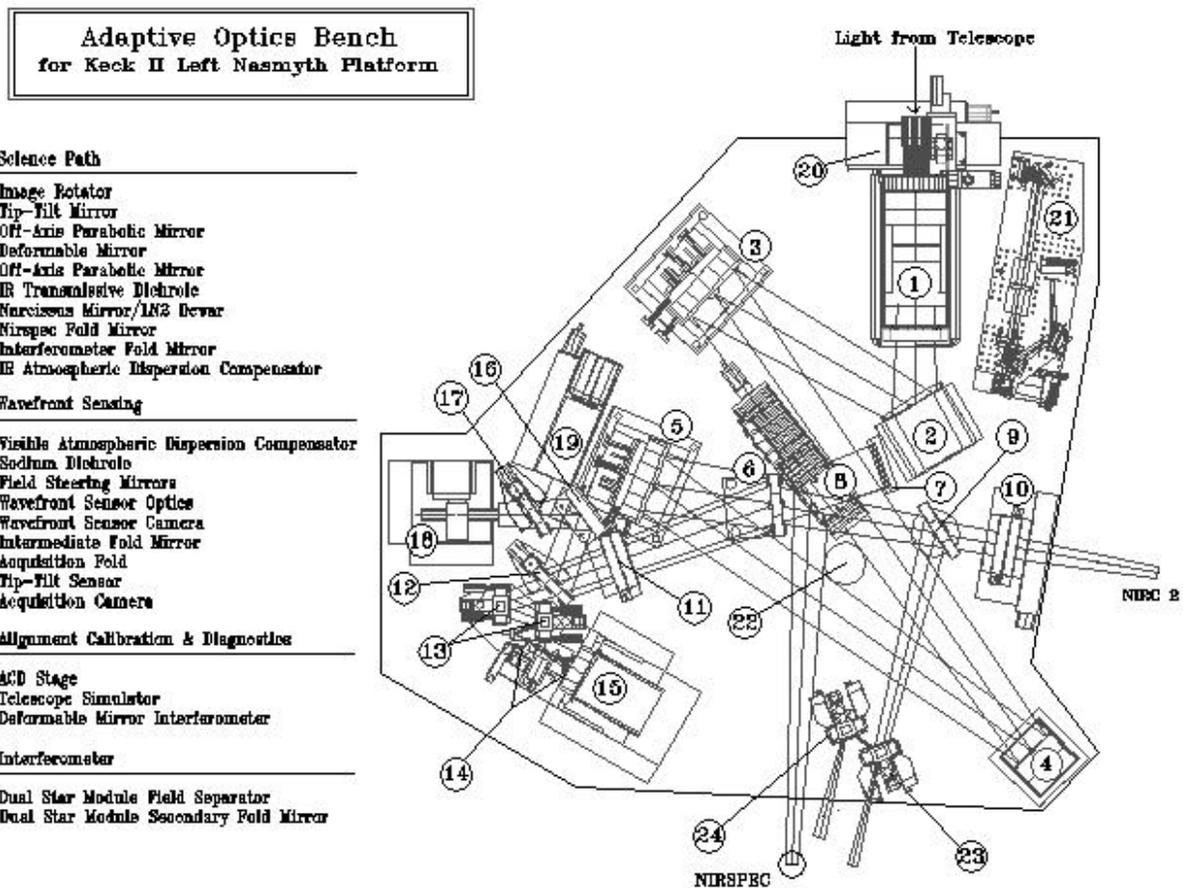


Figure 5.1.2 : Banc de l'optique adaptative

## b. Emplacement de la platine d'injection sur le banc d' OA Keck

Lors du premier test d'injection réalisé sur Keck I en janvier 2003, la platine d'injection 'OHANA était installée au même foyer que l'instrument NIRC 2 sur Keck II (cet emplacement n'étant pas occupé sur Keck I). Mais ce foyer est occupé sur Keck II par l'instrument NIRC 2 ; il ne sera donc pas possible d'installer la platine au même emplacement pour la recombinaison des deux Keck. L'instrument NIRSPEC étant installé uniquement sur Keck II, nous allons utiliser ce même emplacement pour y installer les 2 platines d'injection. L'instrument NIRSPEC est disposé sur une table montée sur une monture type trait- point- plan, elle peut donc facilement être montée et démontée sans problème d'alignement.

La platine étant montée directement sur le banc d'optique adaptative, le support est bien protégé des vibrations. Cela ne constituera donc pas une limitation pour l'injection dans les fibres. De plus, depuis les tests de 2002, des accéléromètres ont été installés sur le banc et permettront d'analyser les éventuelles vibrations résiduelles.

## 2. Intégration des modules d'injection

### a. Présentation des modules

Mon rôle a été d'intégrer la nouvelle version du module d'injection. En effet, tous les éléments du système doivent être montés dans un emplacement correspondant à la table de l'instrument NIRSPEC et donc, beaucoup plus réduit. Le plan de la nouvelle table avec l'emplacement des optiques est spécifié figure 5.2.1. Une fois les éléments placés, je dois réaliser tous les réglages nécessaires afin de simuler une injection provenant de l'optique adaptative dans le cœur d'une fibre optique monomode de diamètre 6.5  $\mu\text{m}$ .

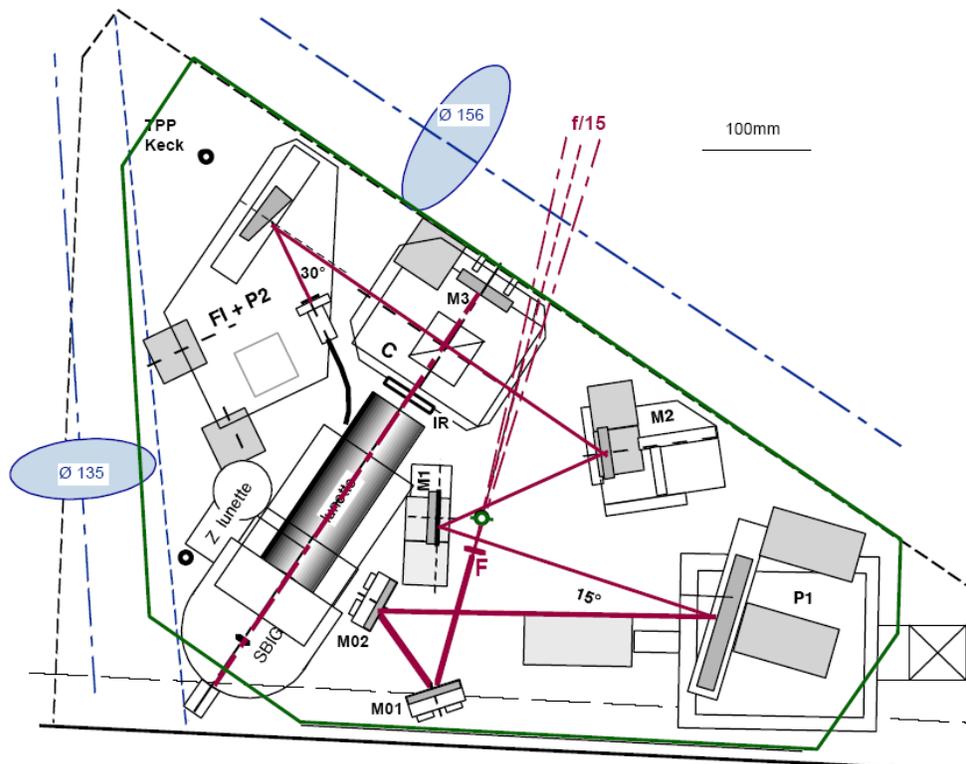


Figure 5.2.1 : Plan de la nouvelle version du module d'injection

## b. Le principe de fonctionnement

Le faisceau provenant de l'optique adaptative arrive avec une ouverture à  $f/15$  et une hauteur de 100 mm. Toutes les optiques étant placées à une hauteur de 120 mm, les 2 miroirs plans M01 et M02 permettent de relever le faisceau en le faisant passer de 100 mm à 120 mm.

La parabole P1, de distance focale 508 mm permet d'obtenir d'un faisceau divergent provenant de l'optique adaptative un faisceau afocal. Les 2 miroirs plans M1 et M2 sont des miroirs de renvoi qui permettent de diriger le faisceau afocal sur le centre de la parabole P2. Celle-ci a pour rôle de focaliser le faisceau dans la fibre monomode de diamètre de cœur  $6,5 \mu\text{m}$ .

Le système lunette autocollimatrice - Sbig – cube - M3 sert de système de contrôle. La Sbig est une caméra CCD  $765 \times 510$  pixels (1 pixel =  $9 \mu\text{m}$ ). La distance focale de l'objectif de la lunette est de 300 mm avec un grandissement  $\gamma = 3$ .

En condition d'observation, le cube est baissé. Cependant, en laboratoire, celui-ci est en position haute. Il permettra de vérifier que l'injection du faisceau provenant de l'optique adaptative est optimale.

Un laser fibré est positionné à la place de la position de focalisation de la lumière provenant de l'optique adaptative du télescope et un diaphragme est placé devant le laser fibré afin d'adapter le diamètre du faisceau laser aux conditions réelles (une ouverture à  $f/15$  correspond à un faisceau afocal en sortie de P1 de 26 mm de diamètre).

Afin de réaliser l'optimisation de la lumière provenant de l'optique adaptative, on ajoute un second laser fibré à la place de la fibre monomode. Ainsi, on obtient sur la caméra CCD via la lunette autocollimatrice les 2 images permettant de juger des qualités image des paraboles P1 et P2. L'optimisation de ces 2 paraboles est l'opération la plus critique du montage.

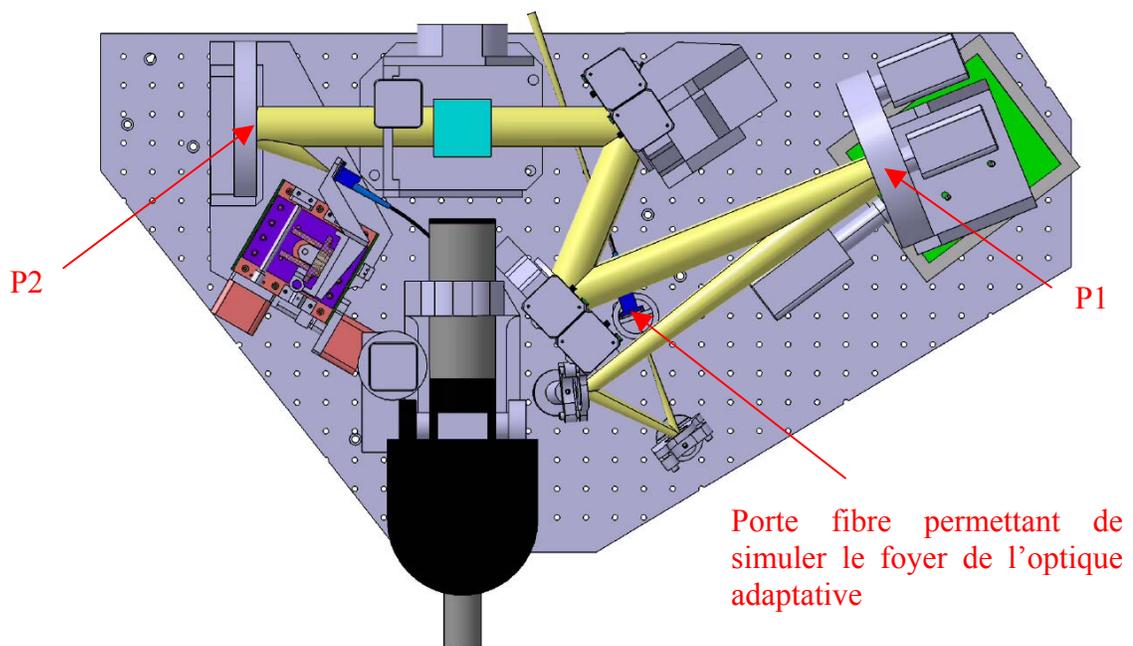


Figure 5.2.2 : Vue de dessus du module d'injection avec le trajet du faisceau

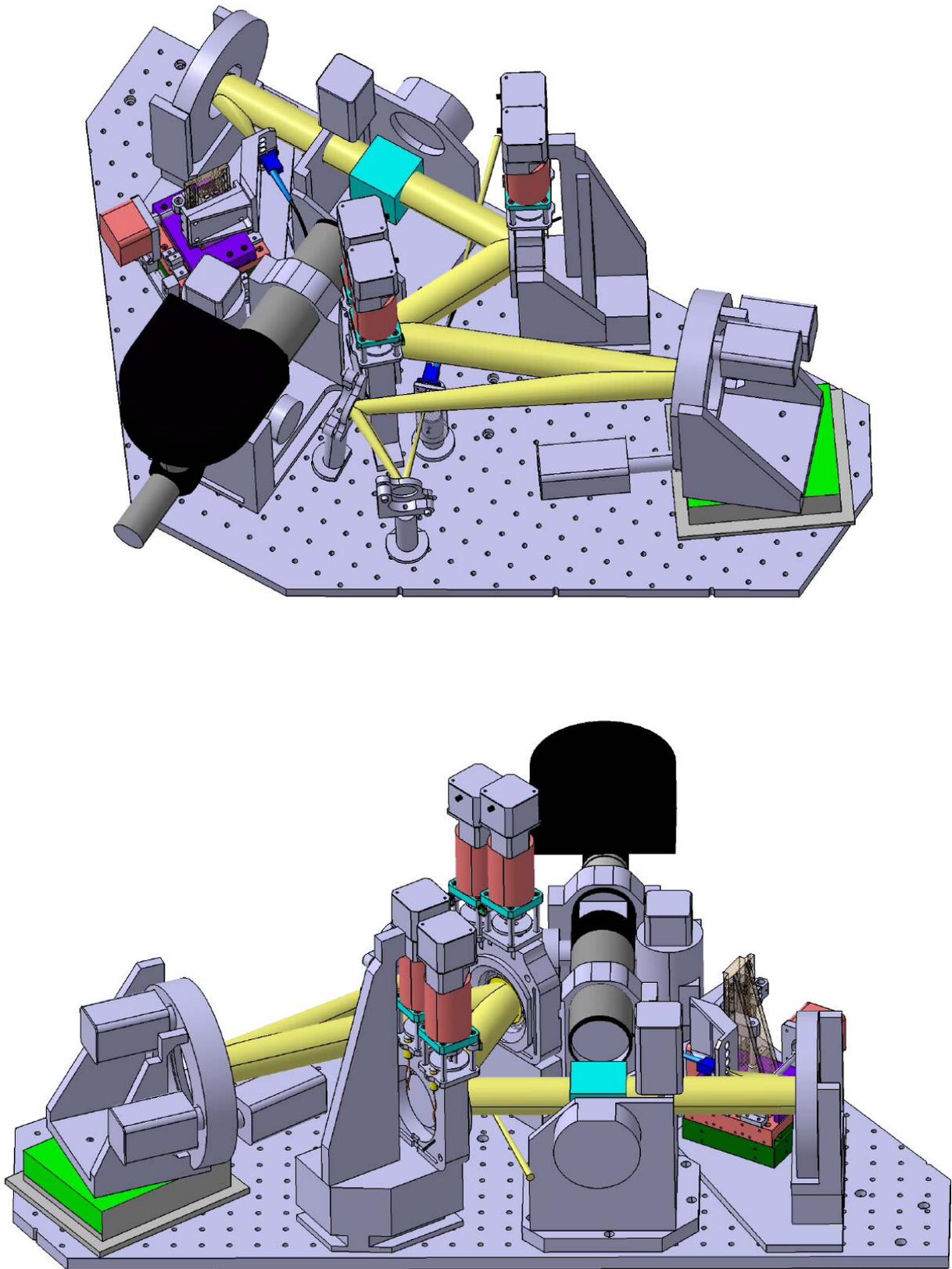


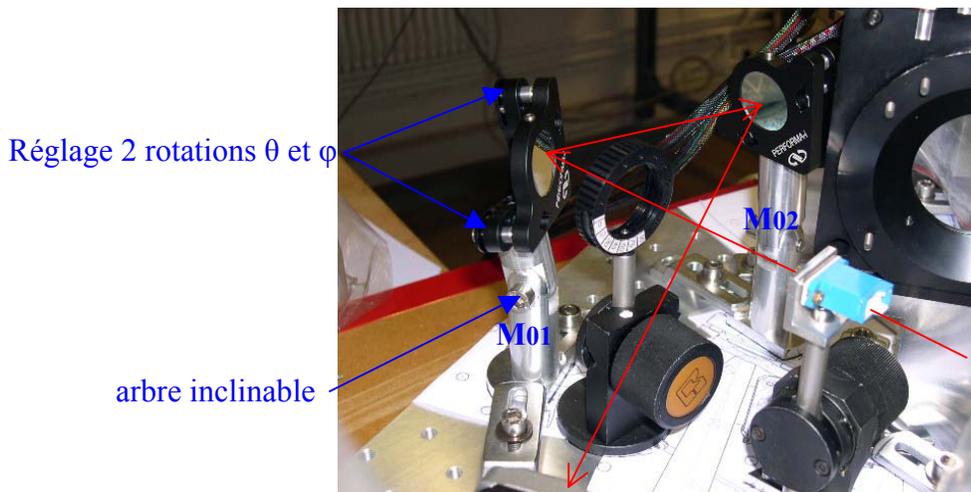
Figure 5.2.3 : Différentes vues du module d'injection avec le trajet du faisceau

Tout d'abord, un premier positionnement de tous les sous systèmes est effectué par rapport au dessin de définition à l'échelle 1 :1 qui est placé sur la table. Ensuite, nous disposons de caches en papier avec la position suivant laquelle le faisceau laser doit se situer, que l'on place sur les optiques.

Avec une diode laser préalablement réglé à une hauteur de 100mm, nous positionnons tous les éléments à l'aide des caches en papier que nous plaçons sur les optiques avec les positions suivant lesquelles le faisceau laser doit se situer.

Cela commence par le réglage des miroirs M01 et M02 qui permettent de rehausser le faisceau de 100 mm à 120 mm de hauteur et de le diriger sur le centre de la parabole P1.

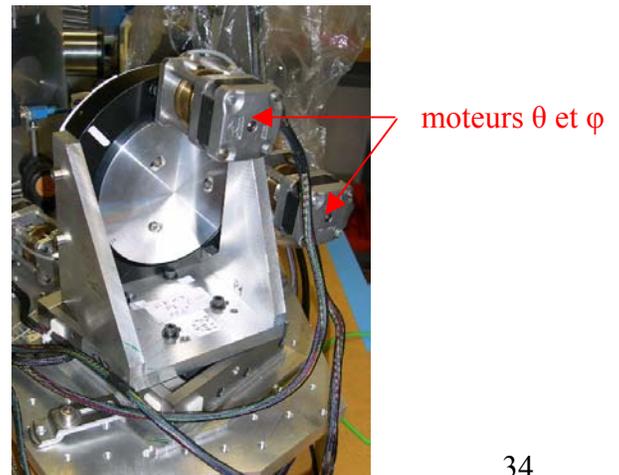
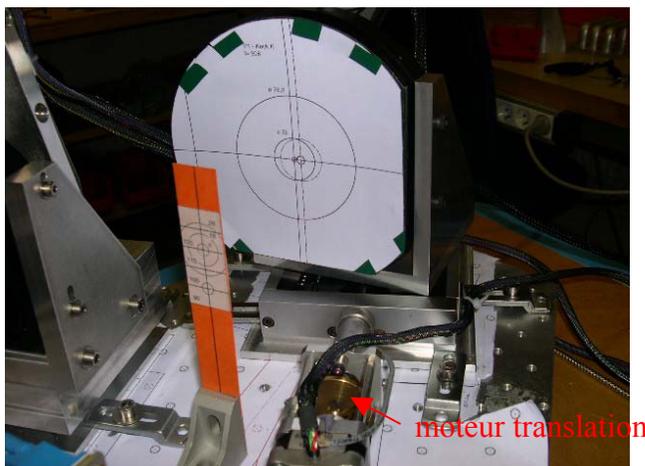
Ces 2 miroirs sont disposés sur une monture Newport qui permet un réglage des 2 rotations. Cette monture est posée sur un arbre inclinable.



L'arbre de M01 est incliné de manière à ce que le faisceau soit centré sur M02 et à une hauteur de 120 mm. Enfin, on incline M02 afin que le faisceau garde la même hauteur en sortie.

Le réglage des 2 rotations est réalisé de la manière suivante : on ajuste avec les vis de M02 pour centrer le faisceau sur l'axe sur une distance lointaine (devant la parabole) et on fait de même pour M01 sur une distance plus courte (après M02). Cette opération est itérée jusqu'à ce que le faisceau de sortie passe par les 2 points définis.

Ensuite, nous réglons la parabole de manière à ce que le faisceau émergent suive la direction désirée. Pour cela, la parabole est réglable en position, à l'aide de 3 moteurs pas à pas, en 2 rotations ( $\theta$  et  $\varphi$ ) et une translation (qui permettra plus tard d'optimiser la distance entre le foyer de l'optique adaptative et le centre de la parabole).

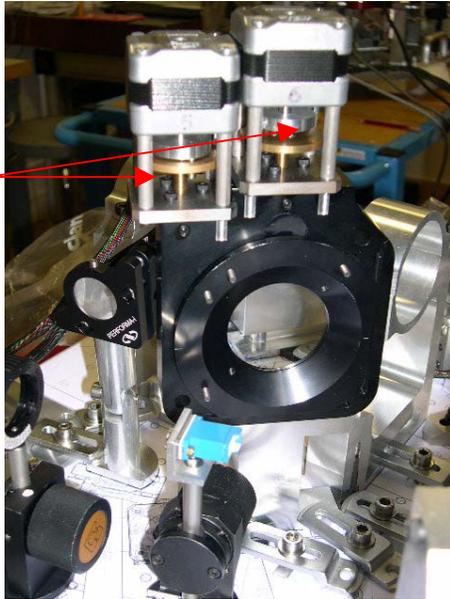


Les 2 miroirs M1 et M2 sont des miroirs de renvoi qui permettent d'avoir en sortie de ces 2 miroirs un faisceau émergent centré sur la parabole P1.

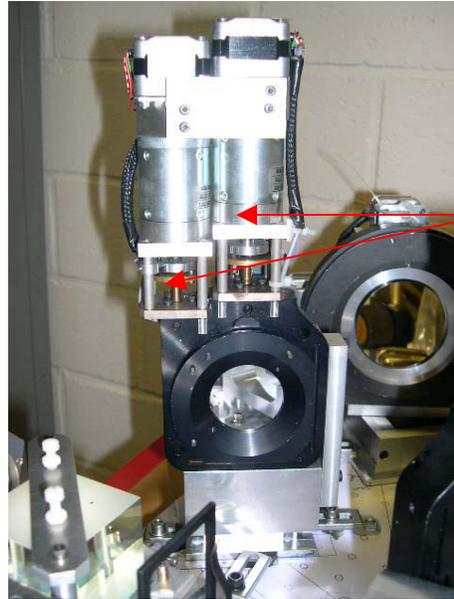
Les miroir M1 et M2 sont montés avec 2 moteurs  $\theta / \varphi$ . Cependant, les 2 moteurs de M2 ont un réducteur qui permet de diviser le pas par 32 (on verra par la suite que l'on joue sur ce miroir pour optimiser l'injection dans la fibre). Les moteurs du miroir M1 ne disposent pas de réducteur.

Les moteurs pas-à-pas utilisés pour les corrections font originellement 200 pas par tour au pas de 500  $\mu\text{m}$  pour la vis entraînée. Ceux munis d'un réducteur x16 permettent d'avoir un pas logiciel qui correspond à un déplacement de vis de 0.3  $\mu\text{m}$ .

moteur M1  
sans réducteur

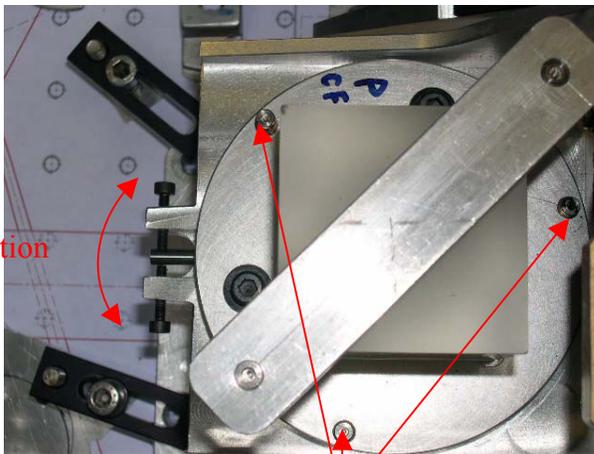


moteur M2  
avec réducteur

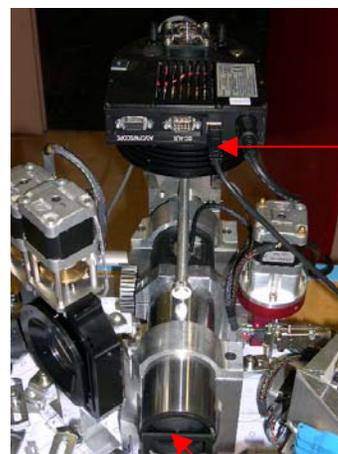


Avant que le faisceau n'arrive au centre de P1 celui-ci traverse un cube séparateur qui permet d'obtenir d'un faisceau incident 2 faisceaux émergents. Le cube (placé sur une monture trait – point - plan et réglable en rotation) est réglé de manière à ce que le faisceau dirigé vers la lunette soit en sortie centré sur le réticule de celle-ci. La caméra CCD, qui est montée sur la lunette, permet cette observation.

réglage rotation



monture trait – point - plan



lunette autocollimatrice

Ensuite nous enlevons la diode laser qui a servi de pré- réglage et nous plaçons un laser fibré exactement au foyer de l'optique adaptative et un diaphragme que l'on place en sortie de la source afin de simuler l'ouverture à f/15 de l'optique adaptative du Keck (c'est-à-dire un faisceau afocal de 26 mm après la parabole P1). Cela nous permet de vérifier s'il n'y a pas de vignettage sur les optiques.

Le réglage de la parabole P1 est la partie la plus critique du montage. En effet, contrairement à la parabole P2 dont la qualité image a déjà été testée sur l'ancienne version du module d'injection, P1 est une nouvelle optique et nous ne connaissons pas la qualité image de cette parabole. Lors de la focalisation, on constate souvent un astigmatisme. Or pour une focalisation optimale, il faut injecter le maximum de flux dans une fibre monomode de diamètre de cœur 6.5  $\mu\text{m}$ . Il est donc nécessaire d'avoir une parabole de bonne qualité mais aussi de jouer sur le réglage en translation et en rotation afin d'avoir une qualité image optimale c'est-à-dire perdre le moins de flux lors de l'injection dans la fibre.

Les moteurs de la parabole P2 sont commandés depuis le PC de contrôle à l'aide d'un programme en LabVIEW (figure 5.2.4). Nous sommes en condition réelle c'est-à-dire que la platine est reliée au pc de contrôle par fibre optique ; le pc n'étant pas à proximité de la platine en condition réelle.

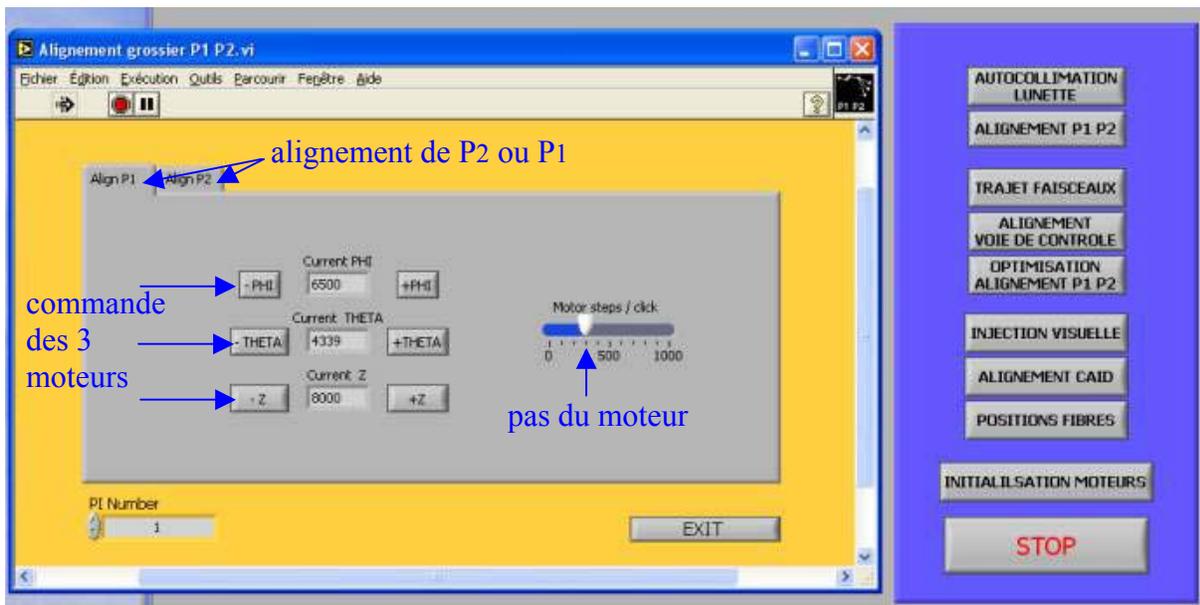


Figure 5.2.4 : Contrôle des moteurs de P1 et P2

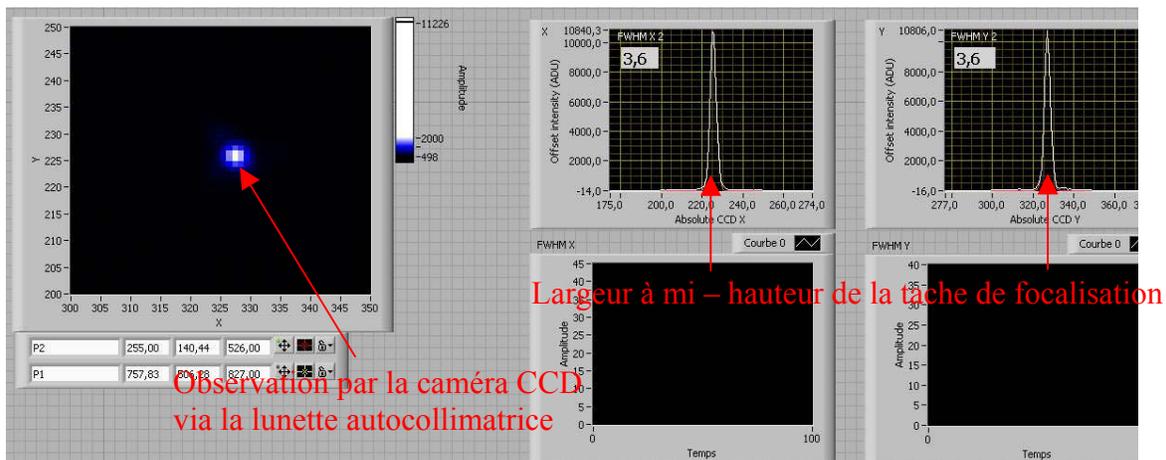


Figure 5.2.5 : Visualisation de la qualité image de P1 sur la 1<sup>ère</sup> platine

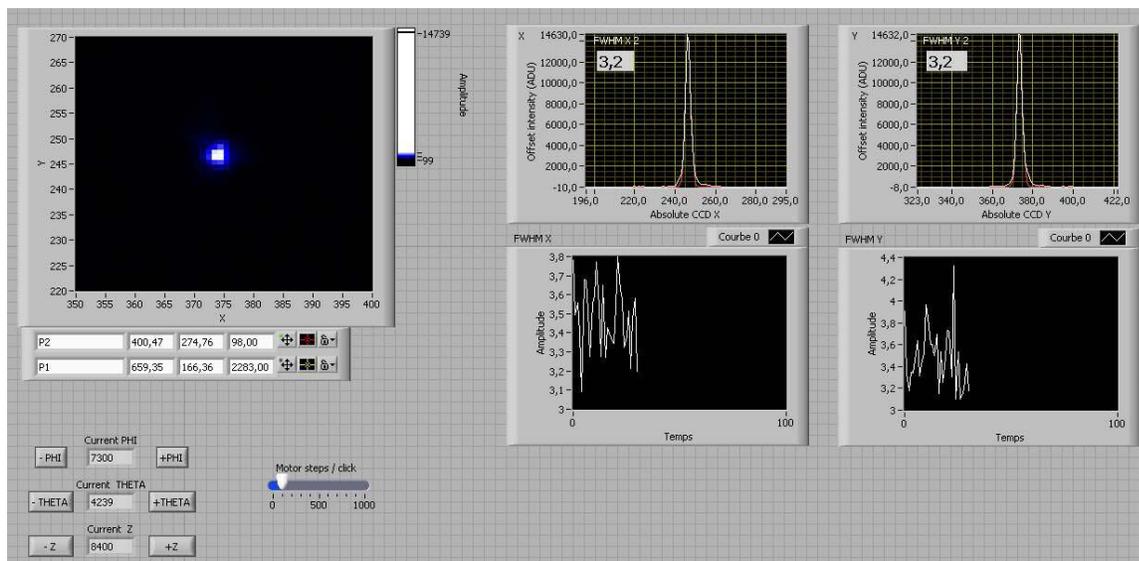


Figure 5.2.6 : Visualisation de la qualité image de P1 sur la 2<sup>me</sup> platine

Une fois cette opération réalisée, il faut procéder de même pour P1. Pour cela on joue sur les moteurs des 3 axes en translation (déplacement à 1  $\mu\text{m}$ ) du porte fibre ainsi que sur les manuelles 2 rotations de P2. En injectant en entrée et en sortie du système, on obtient alors simultanément sur l'écran de la caméra CCD la qualité image des paraboles P1 et P2.

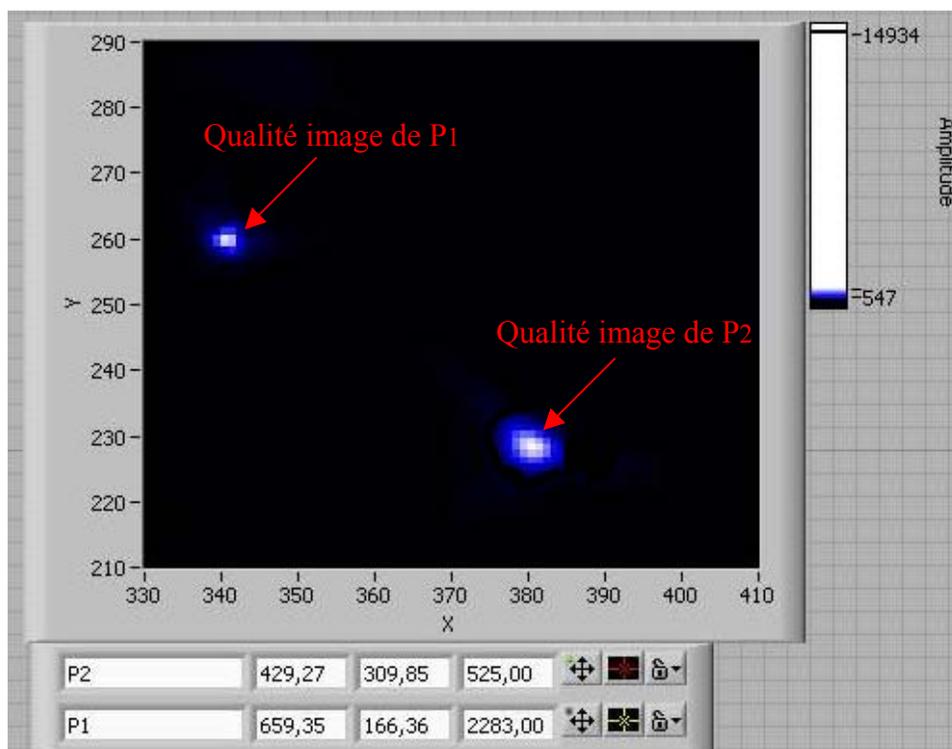


Figure 5.2.7 : Qualité image de P1 et P2

Cependant, le grandissement n'étant pas le même en entrée et sortie de platine, on aura une perte conséquente à l'injection, ce qui n'est bien sûr pas le cas au foyer de l'optique adaptative

Une fois la qualité image des paraboles optimisée, nous allons maintenant optimiser l'injection du faisceau provenant de l'optique adaptative simulée.

Pour cela, nous plaçons d'abord sur le porte fibre une fibre multimode puis monomode. On observe en sortie de la fibre monomode, à l'œil, que l'injection est bien réalisée. Afin d'optimiser cette injection, on place la sortie de fibre sur le détecteur NICMOS (le même que celui utilisé sur le banc interférométrique) et on balaye le faisceau d'une extrémité à l'autre du cœur de la fibre monomode. Ainsi, on peut alors retrouver la position centrale du cœur de la fibre. Pour cela nous utilisons le miroir M2 (cf. figure 5.2.8). Avec le moteur réducteur monté sur M2, la précision de déplacement du faisceau atteint  $0.3 \mu\text{m}$ .

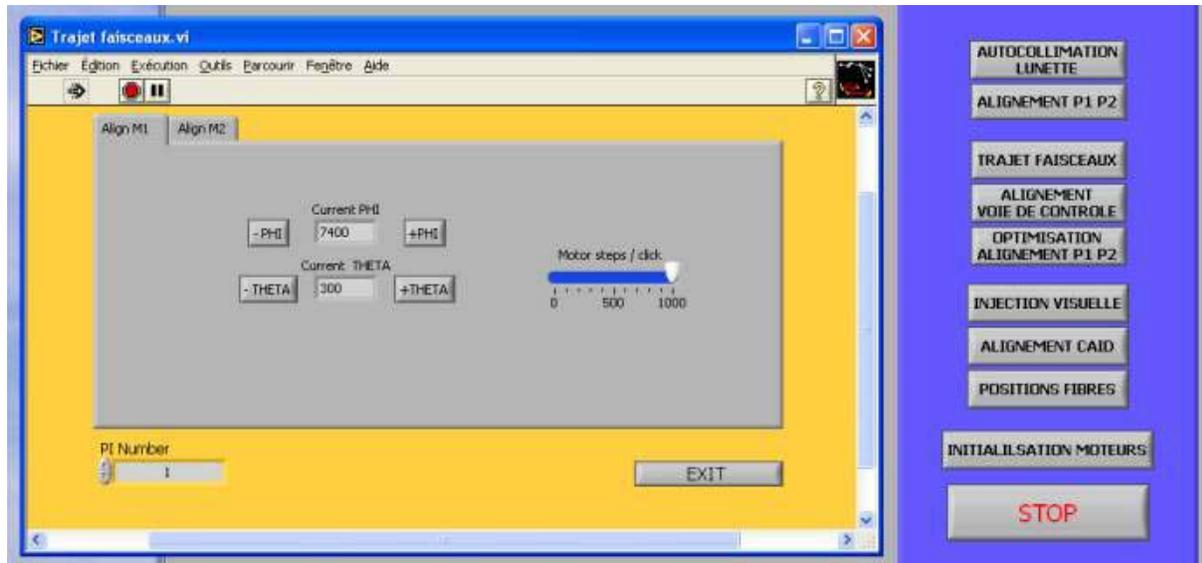


Figure 5.2.8 : Contrôle des moteurs de M1 et M2

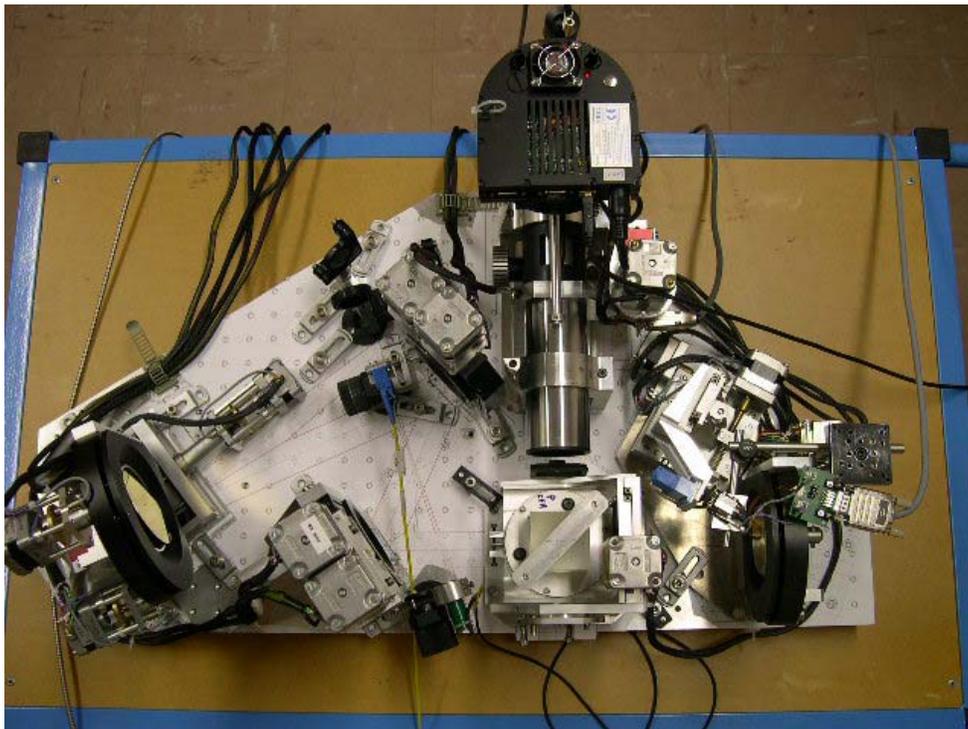
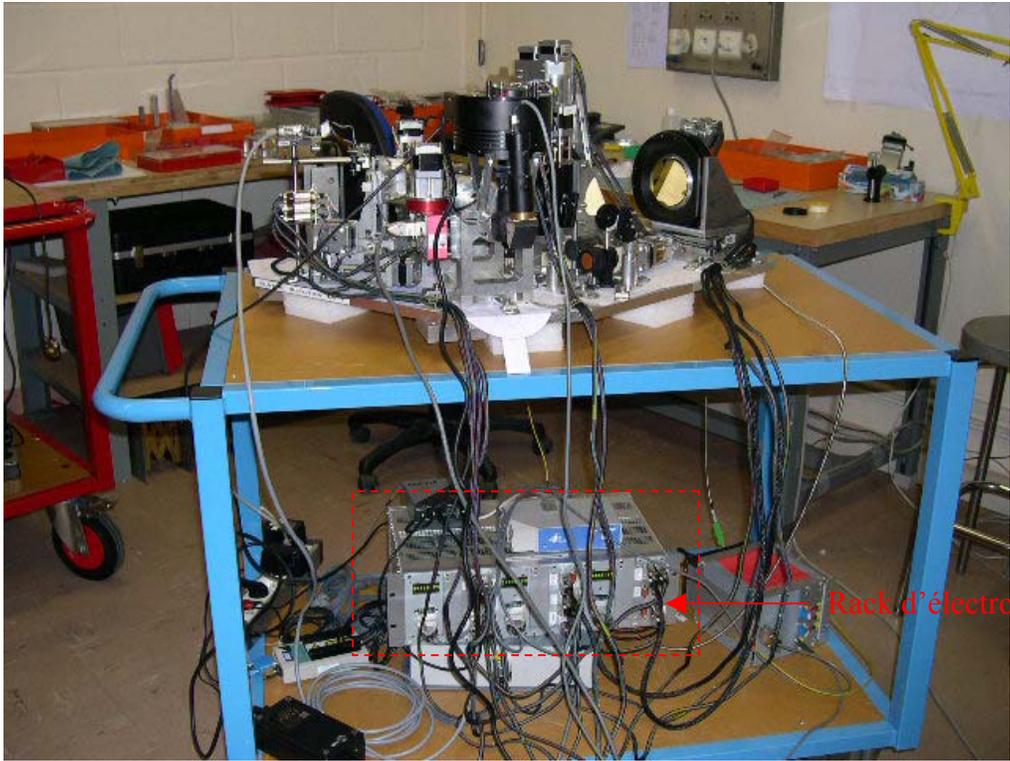
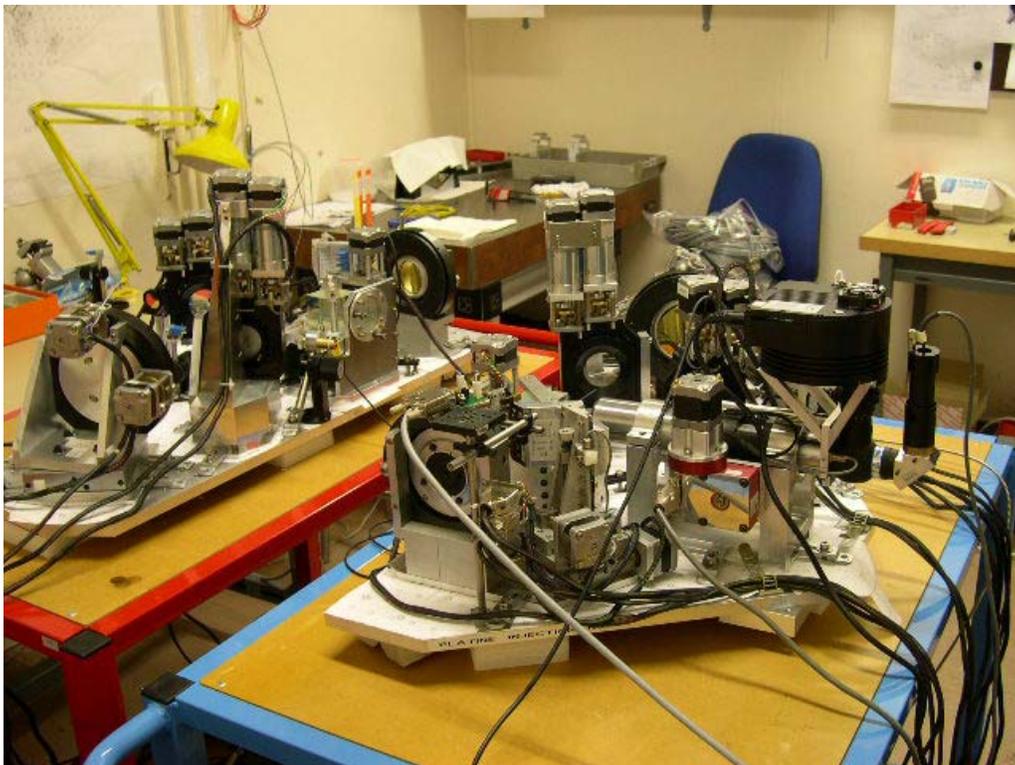


Figure 5.2.9 : Photo en vue de dessus de la platine d'injection



**Figure 5.2.10 : Photo de la platine d'injection avec son rack d'électronique**



**Figure 5.2.11 : Photo des 2 platines d'injection**

### 3. Interface avec les LAR Keck

#### a. L'interféromètre Keck

L'interféromètre Keck utilise une recombinaison type Michelson entre les faisceaux des deux télescopes Keck, fournissant une longueur de base de 85 mètres. L'interféromètre utilise les pupilles en phase fournies par l'optique adaptative de chacun des deux télescopes.

Le cophasage du système est assuré par le suivi des franges afin de permettre des observations de haute sensibilité. Les composantes du système de cophasage incluent les lignes à retard installées dans le laboratoire de recombinaison et le Dual Star Module, placé au foyer Nasmyth de chaque télescope.

Plusieurs types de recombineur sont disponibles, incluant un recombineur à deux bandes dans l'intervalle 1.5-2.4  $\mu\text{m}$  pour le suivi des franges, l'astrométrie et l'imagerie. Un recombineur multi-bandes dans la gamme 1.5-5  $\mu\text{m}$  pour l'imagerie. Enfin, un « nuller » à 10  $\mu\text{m}$  pour les observations à grande dynamique.

L'interféromètre Keck intègre un grand nombre de sous-systèmes différents pour permettre ces observations. La figure 5.3.1 représente le diagramme du chemin des faisceaux des télescopes jusqu'aux instruments.

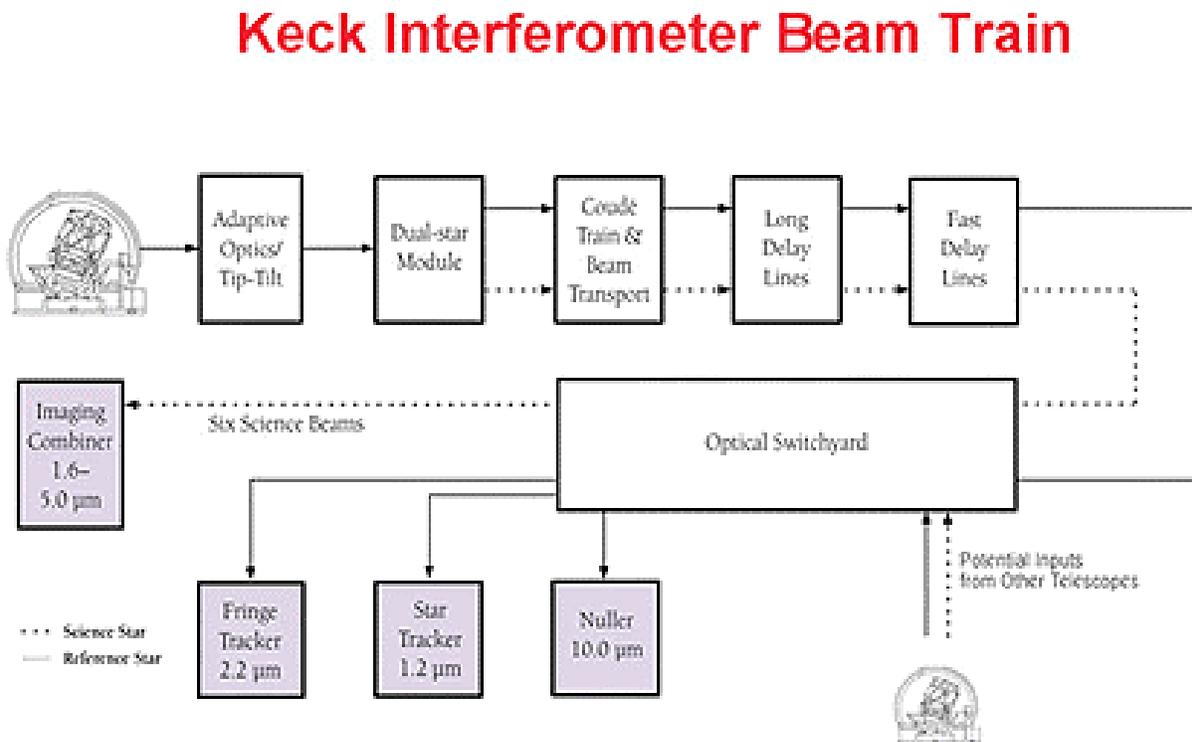


Figure 5.3.1 : Diagramme du chemin des faisceaux Keck, du télescope jusqu'aux instruments

### b. Dual Star Module

Le Dual Star Module (DSM), placé au foyer Nasmyth de chaque télescope, permet le cophasage en produisant deux faisceaux collimatés de deux étoiles différentes (une étoile brillante de référence utilisée pour le suivi des franges et la métrologie, et l'objet scientifique à étudier). La figure 5.3.2 illustre le trajet du faisceau, de l'optique adaptative Keck jusqu'au DSM.

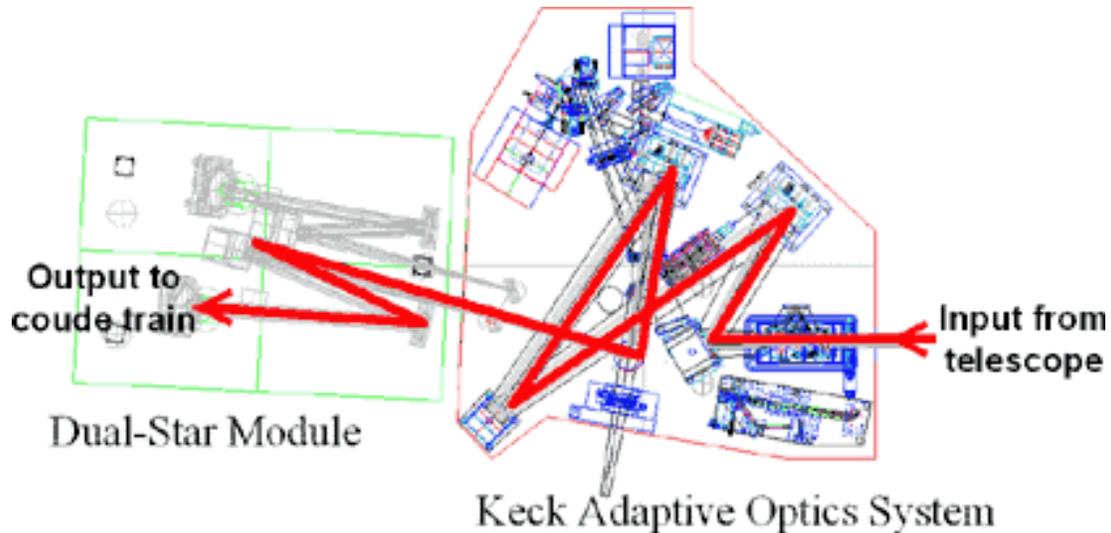


Figure 5.3.2 : Trajet optique des faisceaux interférométriques à travers le banc d'optique Keck et le Dual Star Module

Lors de la recombinaison des deux Keck avec OHANA, les faisceaux lumineux n'utiliseront pas le Dual Star Module, l'injection dans les fibres se faisant directement à la sortie de l'Optique Adaptative.

### c. Train coudé

Pour propager la lumière provenant du Dual Star Module, le train coudé a été complété par les miroirs M4 à M7. Les fibres suivront ce chemin en sortie module d'injection 'OHANA'.

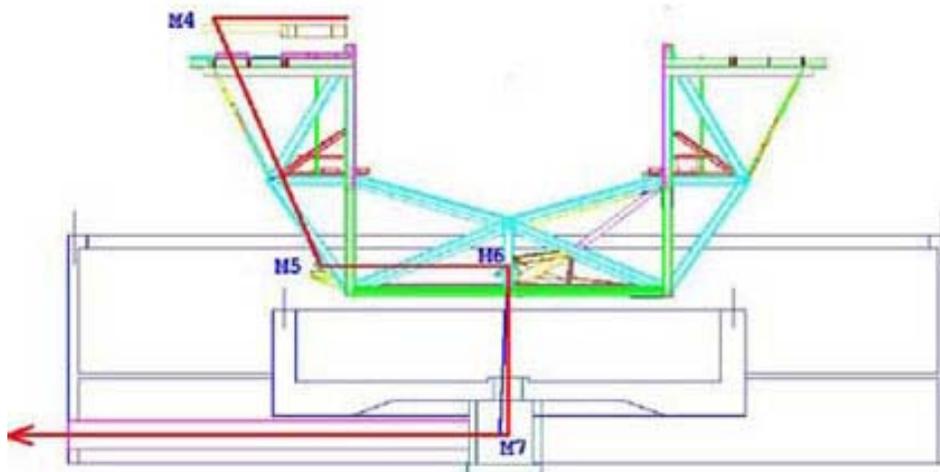
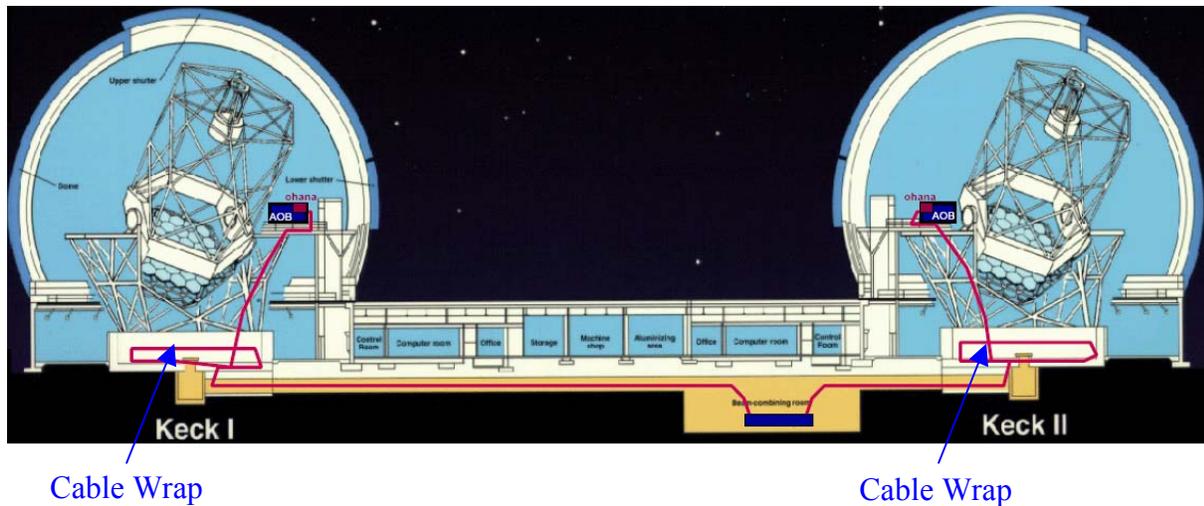


Figure 5.3.3 : Trajet des faisceaux dans le train coudé à la base de la structure supportant les télescopes

Les fibres optiques et plus particulièrement les fibres monomodes en verre fluoré sont fragiles et peuvent casser si elles subissent des torsions ou si on leur impose un rayon de courbure trop faible (inférieur à 4 cm). Le trajet des fibres dans l'environnement Keck doit donc être adapté de façon à ce que lors des mouvements du télescope, les contraintes imposées aux fibres ne soient pas trop importantes.

La solution est donc d'utiliser le « Cable Wrap » de Keck qui est destiné à acheminer l'ensemble des câbles (électriques, fibres...) des instruments scientifiques jusqu'aux salles de contrôle. Ce Cable Wrap est composé d'enrouleurs qui suivent les mouvements du télescope et n'impose donc pas de flexion ni de torsions aux câbles.



#### d. Injection du faisceau dans les lignes à retard Keck

Des modules construits pour l'interfaçage de 'OHANA avec le Keck appelés modules d'extraction permettent de fournir en sortie de fibre un faisceau afocal en entrée des lignes à retard Keck. On utilise le même principe que pour la ligne à retard Gemini – CFHT, c'est-à-dire un ensemble support de fibre 3 axes avec une parabole de collimation. Celui-ci sera installé à la place d'un des miroirs de guidage Keck.

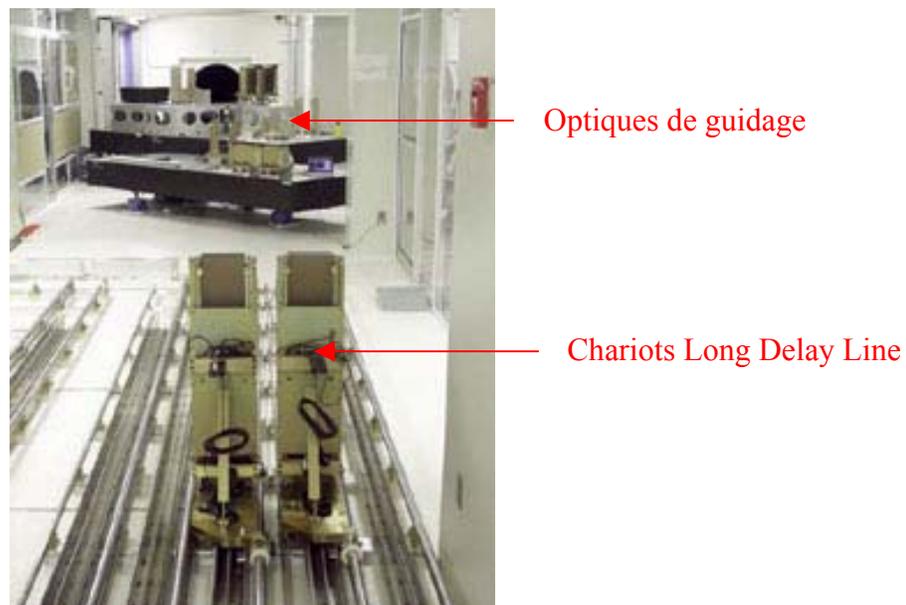
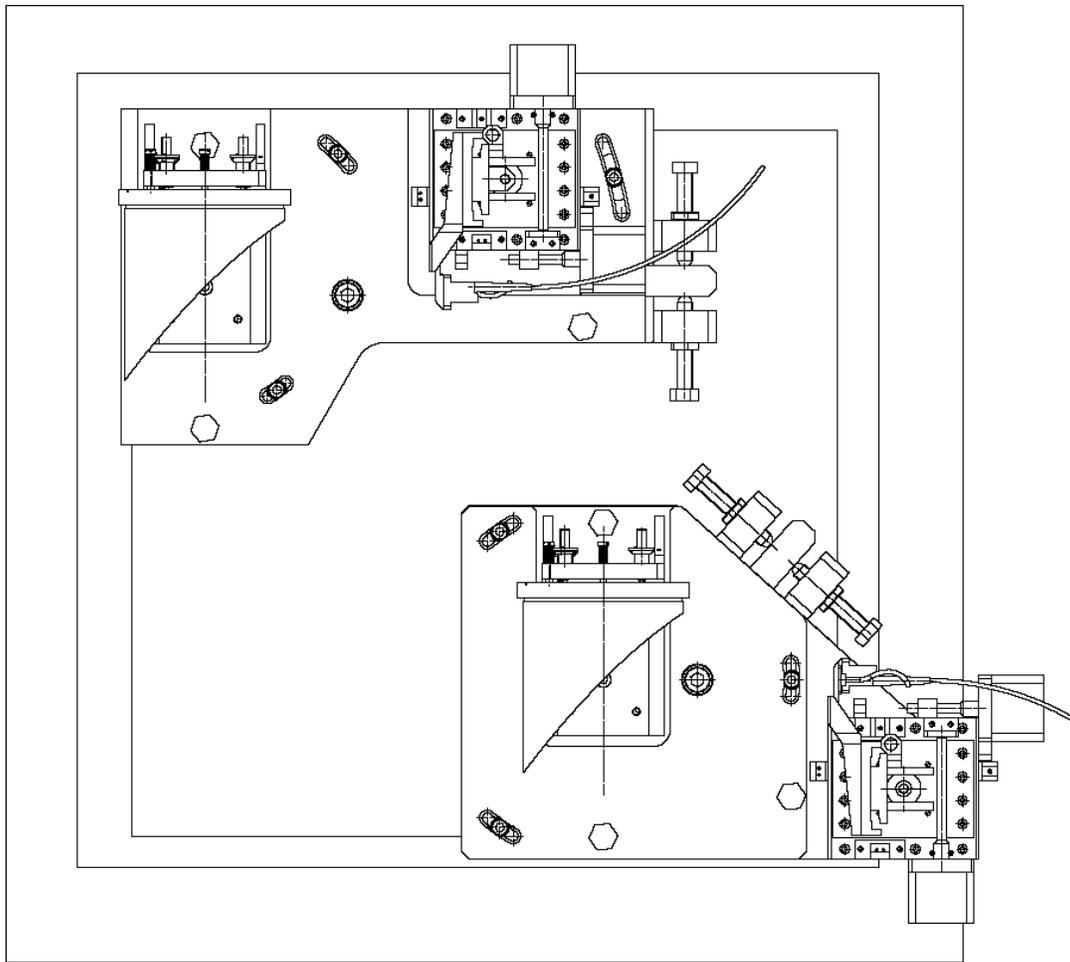
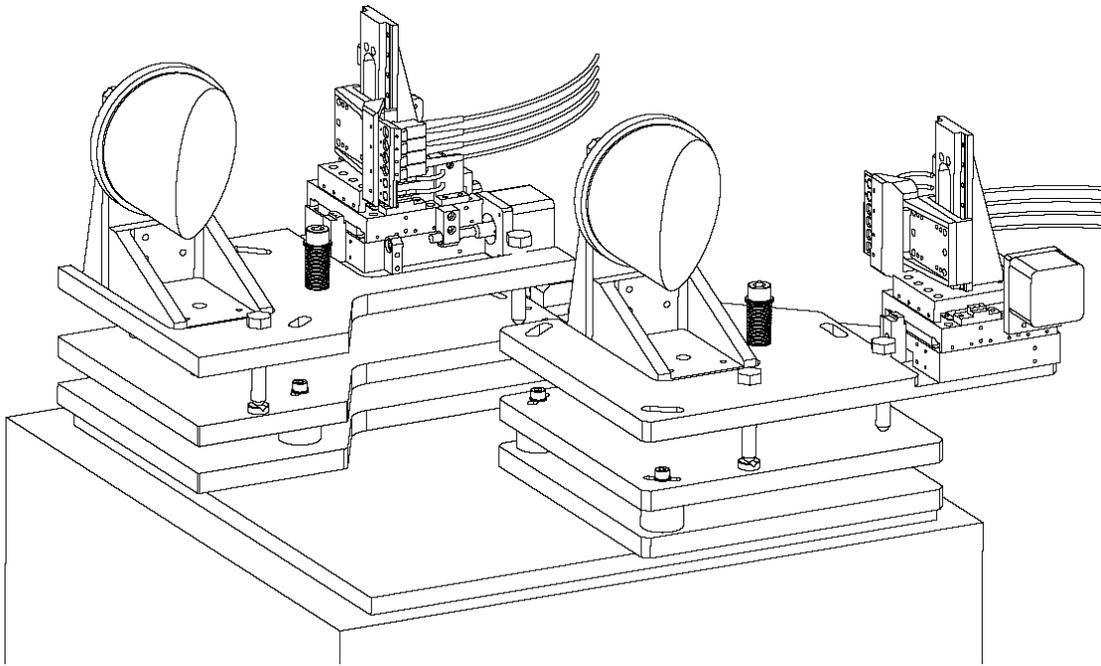
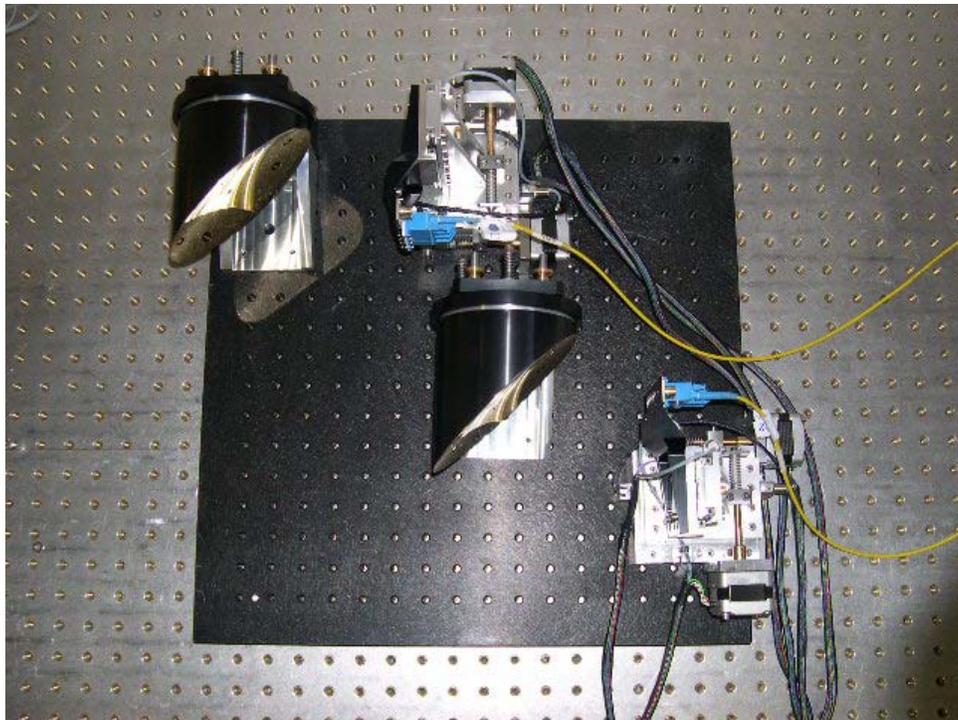
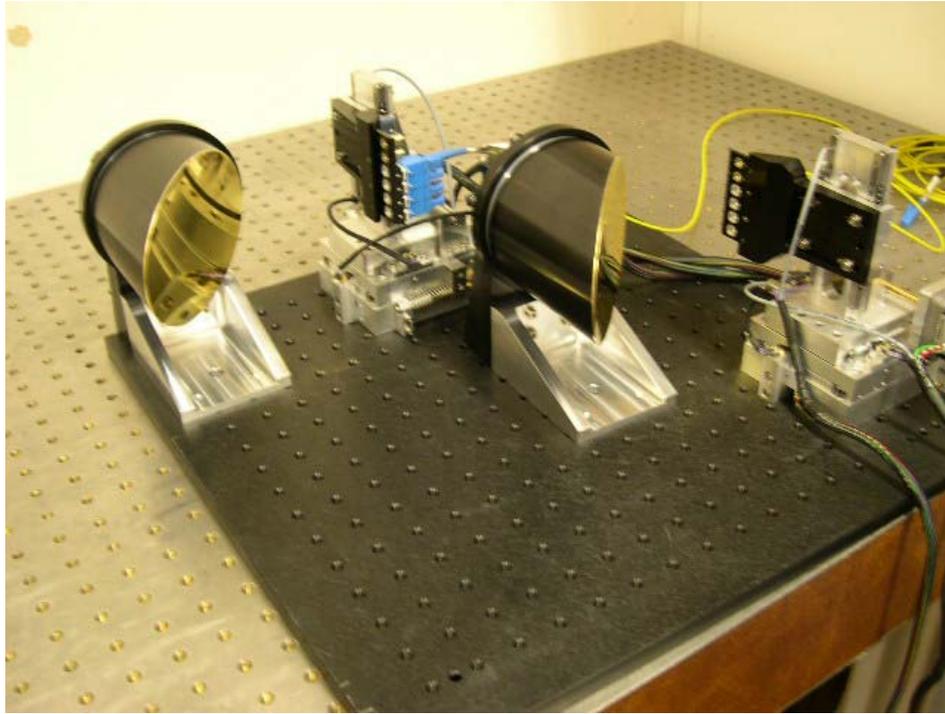


Figure 5.3.4 : Photo des optiques de guidage et des Long Delay Line



**Figure 5.3.5 : Différentes vues du module d'extraction**



**Figure 5.3.6 : Photo du module d'extraction**

La conception de ce module ayant pris du retard, ce module sera directement intégré sur place à Hawaii. Je n'ai pu réaliser qu'un pré-montage à Meudon comme montré figure 5.3.6.

## VI. Intégration des systèmes opto- mécaniques de la ligne à retard

Les rayons issus d'un objet astronomique et passant par deux télescopes distincts sont en général de longueur différente sauf lorsque l'objet passe au méridien de la base. La ligne à retard a donc pour fonction de retarder ou d'avancer la lumière de façon à égaliser les chemins optiques dans les deux bras de l'interféromètre.

Elle se compose de plusieurs miroirs se déplaçant sur des chariots dont on doit pouvoir contrôler la position à une fraction de longueur d'onde près. L'objet astronomique étant en mouvement apparent du fait de la rotation terrestre, la ligne à retard doit également permettre de maintenir la différence de marche nulle en suivant le déplacement du paquet de franges à mesure que la source observée traverse le ciel.

La ligne à retard 'OHANA sera installée dans la salle Upper Coudé Room située dans le pilier central du télescope Canada-France-Hawaï (cf. annexe 3). Ce pilier circulaire, isolé du bâtiment contenant les servitudes du télescope, fournira un environnement exempt de vibrations à la ligne à retard. Cette salle contient déjà un spectrographe appelé Gecko occupant le centre de la salle Coudé et s'étendant vers le Sud. Le quart Sud-Est de la salle est réservé à l'instrument ESPADON. La ligne à retard pourra donc s'étendre, le long d'une corde, au nord de cette salle circulaire. La longueur de la ligne à retard avoisinera alors les 14 mètres.

### 1. Composition de la ligne à retard

Compte tenu de la difficulté de satisfaire à la fois le besoin d'égalisation de la différence de marche sur de grandes longueurs et de suivi précis des franges, la ligne à retard 'OHANA comporte trois étages:

1. le Chariot Central: sa fonction est de réaliser l'égalisation grossière de la différence de marche. Il peut pour cela se déplacer sur une course d'environ 12m. Les réflecteurs du chariot central sont des dièdres. Le faisceau effectuant 2 allers-retour, ce chariot génère une variation de retard maximale de 48m.
2. le Chariot Aerotech: sa fonction est de maintenir la position de différence de marche nulle fixe au cours du temps dans l'interféromètre. Il doit être précis en position et en vitesse. La lumière est réfléchiée par un dièdre traduisant ainsi la course mécanique maximale de 1m en un retard maximum de 2m (car un dièdre est posé dessus).
3. le Fast Scan (balayage rapide): ce système, constitué d'un miroir plan monté sur céramique piézo-électrique, permet de faire varier linéairement la différence de marche d'une centaine de microns autour de la différence de marche nulle pour "dessiner" le paquet de franges.

Les faisceaux provenant des modules de sortie et d'entrée des faisceaux dans les fibres sont afocaux d'où l'utilisation de miroirs plans

La ligne à retard devra être capable de faire du suivi de frange en autocollimation. Ce mode de fonctionnement permettra de vérifier le bon fonctionnement de la ligne à retard indépendamment du reste de l'interféromètre et de lever ainsi rapidement un doute en cas d'échec de la recherche de franges. Un quatrième élément en translation servira ainsi à simuler un retard variable inconnu que devra compenser le reste de la ligne à retard (Chariot Schneeberger). Avant d'être un mode de vérification, ce mode d'autocollimation de la ligne à retard servira à valider les procédures de recherche des franges en laboratoire.

La ligne à retard devra être capable de s'aligner très rapidement après déplacement du Chariot Central ou après changement de fibre. Cela impliquera de motoriser un certain nombre d'axes sur le Chariot Central et d'inclure dans la ligne à retard un système de contrôle de l'alignement.

## 2. Spécifications mécaniques

La ligne à retard est composée de trois ensembles principaux (cf. figure 6.1):

1. La table à retard continu notée TRC qui comporte notamment le Chariot Aerotech et le Fast-Scan.
2. La table à retard simulé noté TRS sur laquelle se trouve le Chariot Schneeberger.
3. Le chariot central à retard incrémental noté CC.

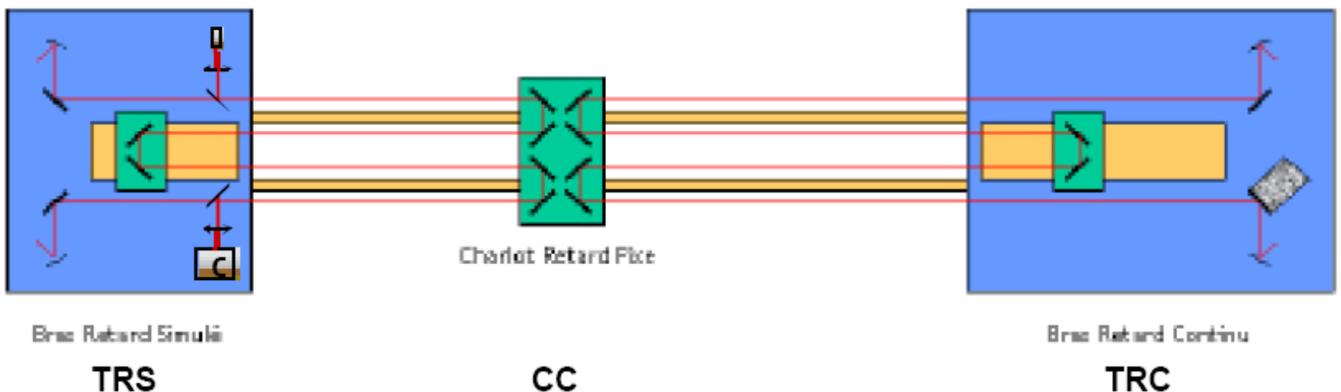


Figure 6.2 : Schéma de la ligne à retard

## 3. Axes

Les axes sont définis par un repère tridimensionnel direct orienté dans la direction de propagation du faisceau. Par convention, l'axe Z pointe dans la direction de propagation du faisceau, l'axe vertical Y est orienté vers le haut et le troisième axe X est horizontal (cf. figure 6.3.1)

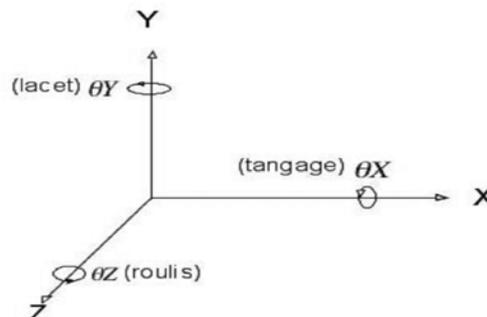


Figure 6.3.1 : Définition des axes et angles

## Table à Retard Continu

L'ensemble des éléments de la table à retard continu TRC est posé sur une table optique

### a. Porte- fibres

C'est un système permettant de positionner différentes fibres au foyer de la parabole d'injection. Quatre fibres sont nécessaires: J, H, K et une fibre de calibration.

### b. Parabole d'injection

C'est une parabole hors axe permettant de produire un faisceau afocal à partir de la fibre placée à son foyer (focale = 50,8 mm et diamètre = 50,8mm).

### c. Miroir plan d'injection d'entrée

Ce miroir de pointage fin permet de faire correspondre les fibres d'entrée et de sortie du bras de la ligne à retard.

### d. Chariot Aerotech

Cette table de translation est chargée de produire le retard continu de la ligne à retard. Celle-ci dispose d'une course en translation de 1 mètre. Elle est spécifiée en précision de positionnement et en stabilité de vitesse de translation (cf. annexe 6).

### e. Miroir plan d'injection de sortie - Fast Scan

Ce miroir a la particularité de moduler rapidement la longueur de la ligne à retard de façon à explorer le paquet de franges d'interférences produit par l'interféromètre.

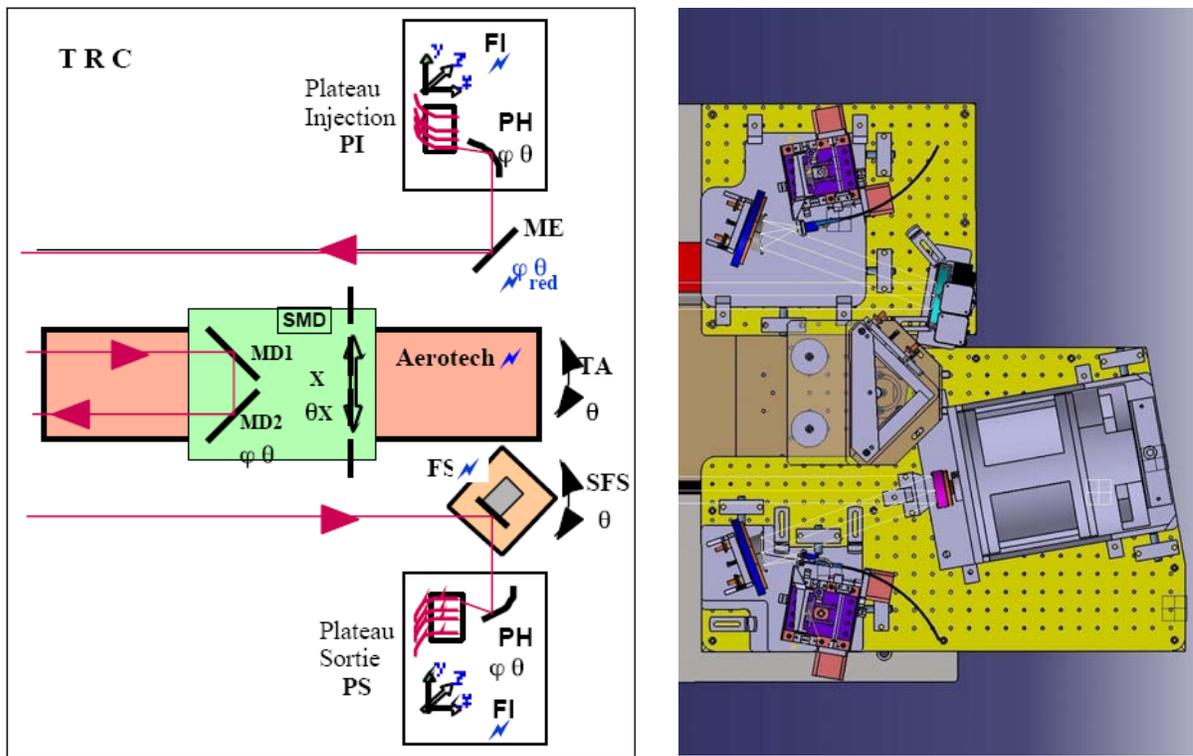
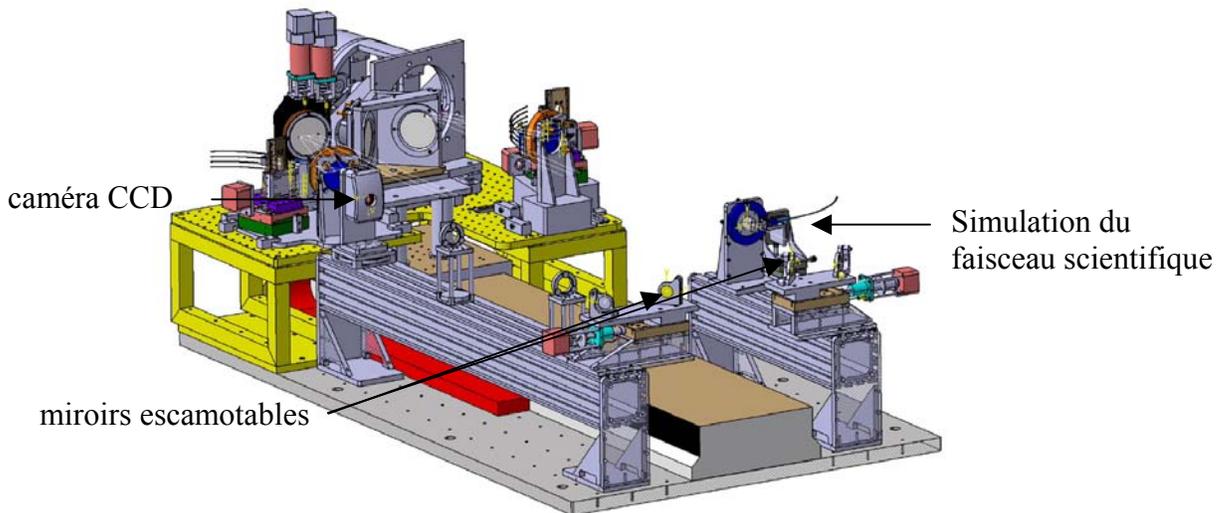


Figure 6.3.2 : Principe de fonctionnement et vue de dessus de la Table à Retard Continu

## Système de contrôle

Ce système permet d'aligner correctement le chariot central. À chaque déplacement du chariot central, celui-ci, du fait de l'imperfection des rails, change d'assiette et de position latérale qui sont à corriger. L'alignement du chariot central doit s'effectuer rapidement et sans perturber les faisceaux scientifiques. Le faisceau scientifique est simulé à l'aide d'un laser fibré et d'une parabole de collimation. Le faisceau d'alignement est "envoyé" grâce à un miroir à 45° escamotable. Lorsque le CC se déplace, il induit de légères erreurs qui sont mesurées par une caméra CCD avant d'être corrigées.



## Table à Retard Simulé

L'ensemble des éléments de la table à retard simulé TRS est posé sur une table optique. Celle-ci contient les mêmes optiques que pour la TRC excepté le Fast Scan. Celui-ci est remplacé par un miroir plan d'injection de sortie.

Le Chariot Schneeberger est une table de translation de 20 centimètres de course. (utilisée dans l'interféromètre de laboratoire pour la caractérisation des fibres en bandes K).

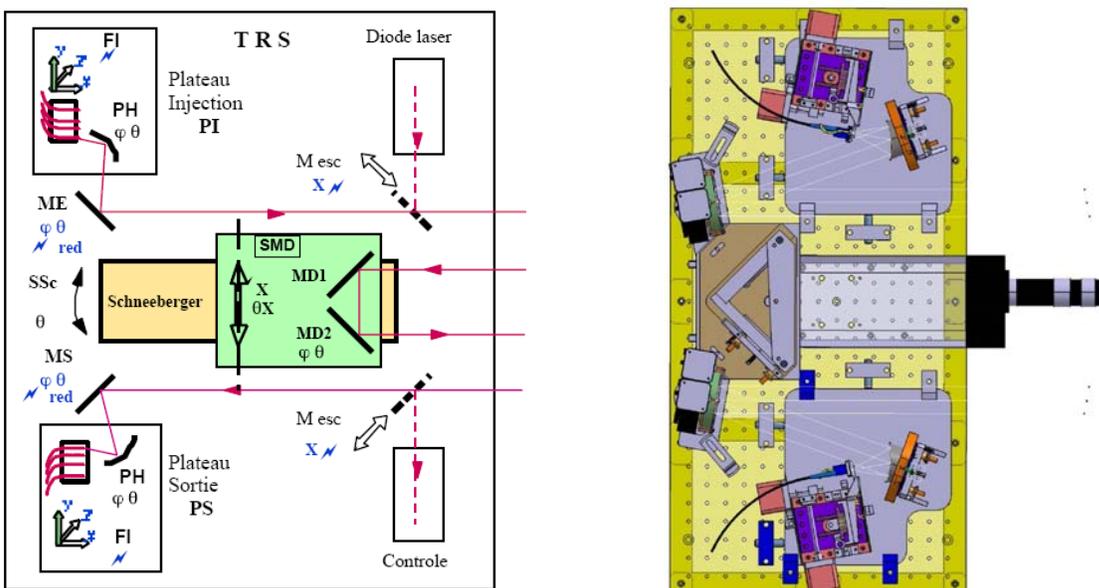


Figure 6.3.3 : Principe de fonctionnement et vue de dessus de la Table à Retard Simulé

## Chariot Central

Le Chariot Central comporte quatre dièdres : deux faisant partie du faisceau optique d'un bras de l'interféromètre, les deux autres appartenant à l'autre bras. Il est monté sur des rails, lui permettant de se déplacer entre les deux tables optiques afin de générer un retard différentiel entre les deux bras de l'interféromètre (cf. figure 6.3.5).

Plutôt que d'imposer une forte contrainte sur le roulis et le placement transverses du chariot (seules sources de désalignement), les quatre dièdres seront montés sur une monture de translation transverse X et de tangage  $\theta X$  (correcteur d'attitude).

Un ruban de mesure de position (Meter Drive) permet de mesurer la position du chariot et donc la différence de longueur entre les 2 bras de la ligne à retard. La précision de la mesure de la position du chariot central est de  $100 \mu\text{m}$  soit donc une précision sur la différence de marche de  $400 \mu\text{m}$  (cf. figure 6.3.4). Cette précision est suffisante pour permettre le repérage et la direction des franges avec le chariot Aerotech.

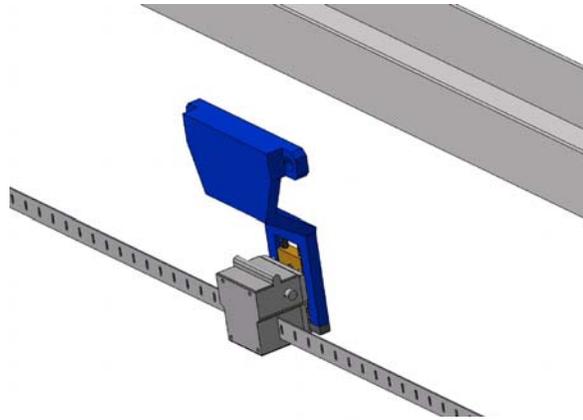


Figure 6.3.4 : Vue isométrique du Meter drive

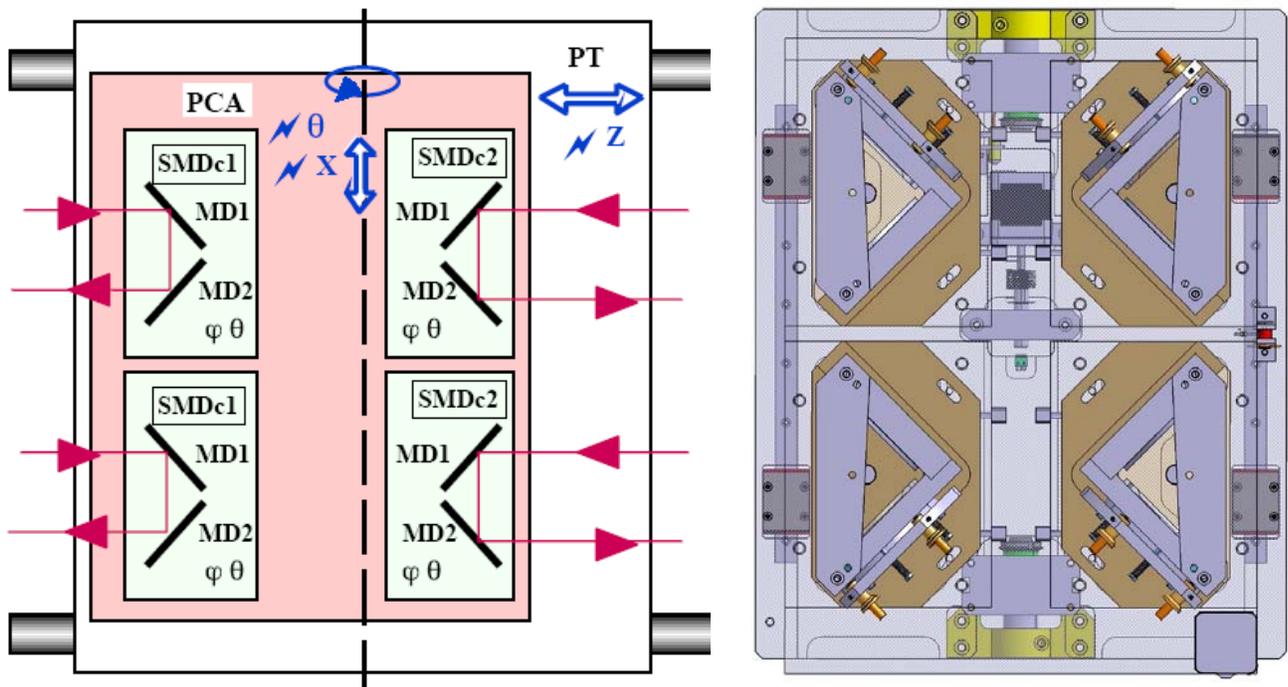


Figure 6.3.5 : Principe de fonctionnement et vue de dessus du Chariot Central



Figure 6.3.6 : Photo de la ligne à retard sans les systèmes opto- mécaniques (table Aerotech au premier plan)

#### 4. Montage et centrage des miroirs du dièdre

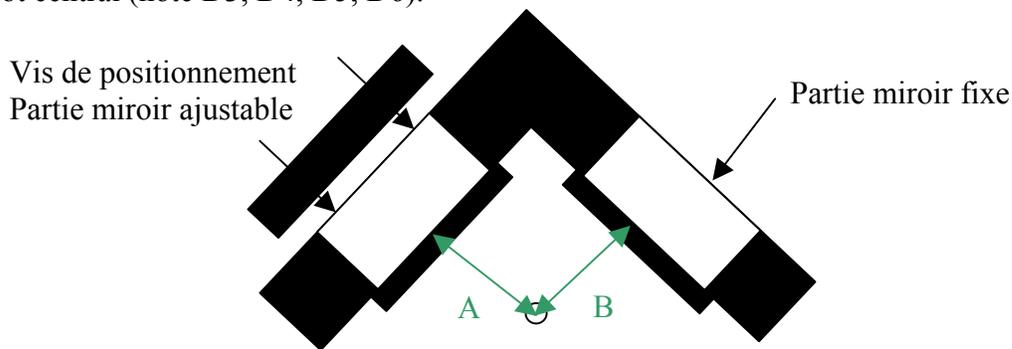
Les réflecteurs du chariot central sont des dièdres. Contrairement à un système coin de cube (trièdre), l'utilisation de dièdres nous permet de réduire le nombre de miroirs et nous permet aussi d'avoir un montage plus compact.

Une fois la mécanique livrée, je me suis occupé du montage des dièdres avant de réaliser le réglage optique.

Lors du montage mécanique, il s'est avéré qu'il y avait des écarts entre les plans et les dièdres une fois montés. Certains de ces écarts pourront être compensés par un réglage optique. J'ai compensé d'autres écarts à l'aide de cales mécaniques

La ligne à retard est constituée de 6 dièdres : 4 sont disposés sur le chariot central (écartement entre les centres des miroirs de 80 mm) et 2 respectivement sur les tables Aerotech et Schneeberger (écartement entre les centres des miroirs de 110 mm).

Tout d'abord, je veux m'assurer que le centre défini sur les dessins de définition l'est réellement sur les dièdres dont je dispose. Cet écart est de  $A = B = 31,20$  mm pour les dièdres des tables Aerotech et Schneeberger (noté D1 et D2) et de  $A = B = 21,90$  mm pour les dièdre du chariot central (noté D3, D4, D5, D6).



En mesurant les valeurs A et B pour les différents dièdres, j'obtiens les valeurs suivantes :

Diedre	A (mm)	B (mm)	écart (mm)
1	32,39	32,49	0,1
2	32,32	32,63	0,31
3	21,71	21,79	0,08
4	21,72	21,82	0,1
5	21,76	21,73	0,03
6	21,84	21,87	0,03

Même s'il ne sera pas possible de respecter les distances données sur les plans, il est cependant nécessaire d'avoir la même distance entre les 2 miroirs par rapport au centre.

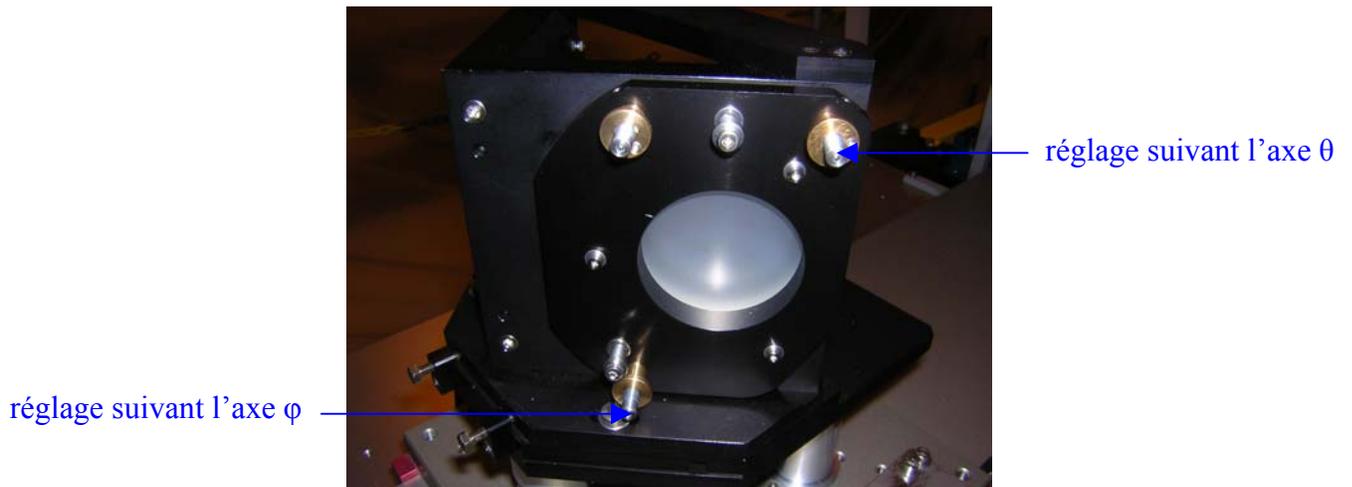
En effet, cette erreur génère une différence d'entre-axe pour les faisceaux qui se propage d'un dièdre à l'autre sur la ligne à retard et je veux aborder le réglage de la ligne à retard avec les entre-axes les plus parfaits possibles. Pour cela je pose un jeu de cales entre les rondelles et le miroir de manière à reculer l'un d'entre eux. Cela ne concerne que le dièdre n°2 qui a un écart entre les valeurs A et B trop important. Une fois le callage effectuée sur le miroir n°2, les miroirs des dièdres sont centrés avec une précision de 1/10 de mm.

L'écart entre les 2 miroirs sera différent pour chaque dièdre. Cependant, le diamètre du faisceau faisant 37 mm (avec un diamètre projeté de miroir à 53 mm), il n'y a aucun risque que le faisceau soit vignetté car les différences d'écartement des miroirs entre chaque dièdre sont de 1mm maximum.

## 5. Réglage optique des dièdres

### 1. Procédure générale

Les dièdres doivent être réglés suivant 2 axes notés  $\theta$  (angle formé par les 2 miroirs) et  $\varphi$  (angle d'inclinaison entre les 2 miroirs selon l'axe horizontal). Les dièdres sont constitués d'un miroir fixe et d'un miroir ajustable sur lequel sont disposées 3 vis de réglage.



La contrainte imposée pour ces réglages est de n'utiliser que le matériel déjà disponible en laboratoire.

Un montage type interféromètre de Michelson de diamètre supérieur à 110 mm ou un réglage avec une lunette autocollimatrice d'objectif supérieur à 110 mm ne peuvent donc être envisagés.

Pour ces réglages, mon principal outil de travail sera une lunette autocollimatrice de diamètre d'objectif égal à 50 mm et dont le principe de fonctionnement est décrit figure 6.5.1.

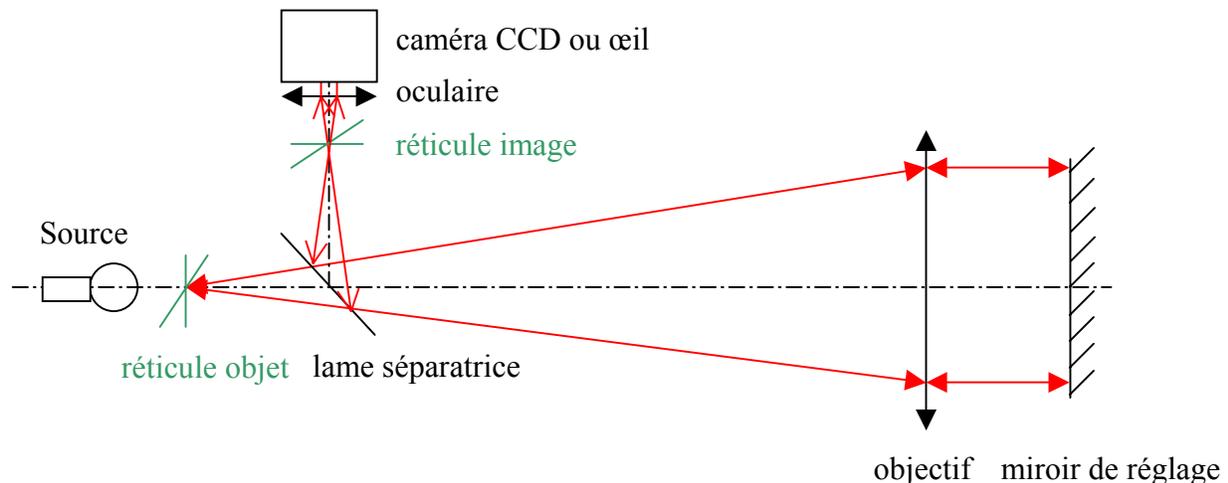


Figure 6.5.1 : Principe de fonctionnement d'une lunette autocollimatrice

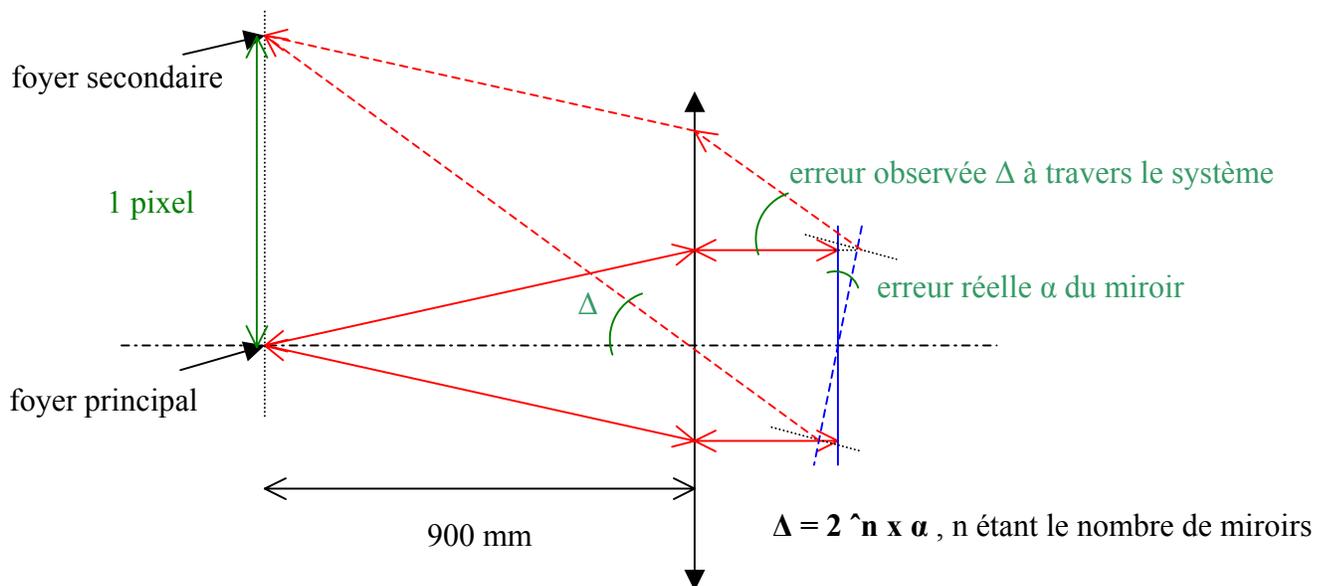
Avant toute utilisation, il faut d'abord régler la lunette. Cela s'effectue en 2 étapes. Tout d'abord on règle l'oculaire à sa vue de manière à voir les graduations du réticule nettes (conjugaison du plan image de l'oculaire avec le plan du réticule objet). Ensuite, on place un miroir face à l'objectif et on agit sur le déplacement en translation de cet objectif afin d'avoir une distance objectif - réticule objet correspondant à la distance focale de l'objectif : le réticule image observé par autocollimation est alors net et la lunette réglée.

## 2. Précision d'assemblage des miroirs

Une erreur  $\alpha$  sur l'angle entre les 2 miroirs par rapport à  $90^\circ$  se traduit par une erreur sur le faisceau réfléchi de  $2\alpha$ . Dans le pire des cas, une même erreur sur les 3 dièdres de chaque bras de l'interféromètre conduit donc à une déflexion du faisceau de  $6\alpha$ . Les déplacements des différents chariots mobiles induisent donc un déplacement latéral du faisceau au maximum de  $6\alpha L$  où  $L$  est la course du chariot central soit 12 mètres. Le maximum acceptable pour ce déplacement latéral du faisceau est de 1 mm, ce qui donne une valeur maximale  $\alpha = 2,5$  secondes d'angles.

## 3. Résolution du système lunette + caméra CCD

La caméra CCD est une SBIG ST-7XE 765 x 510 pixels ; 1 pixel = 9  $\mu\text{m}$ . La distance focale de l'objectif est de 300 mm avec un grandissement supplémentaire  $\gamma = 3$ .



Sachant que l'erreur observée sur un miroir est 2 fois supérieure à l'erreur réelle, on en déduit la correspondance entre 1 pixel du détecteur et l'erreur du miroir :

$$\begin{aligned}
 1\text{pixel} &= 3f \times \Delta \\
 \Delta &= 1\text{pixel} / 3f = 9.10^{-6} / 900.10^{-3} = 2'' \\
 \Delta &= 2\alpha \\
 \alpha &= \Delta / 2 = 2'' / 2 = 1''
 \end{aligned}$$

On en déduit que 1 pixel correspond à 1'' d'erreur pour un miroir donné. Ce miroir définit alors une référence pour le second miroir du dièdre à régler. 1'' est l'objectif de précision des dièdres après réglage.

## 4. Réglage en $\theta$

### a. Procédure de réglage pour les petits dièdres

Pour ce réglage, une simple lunette autocollimatrice suffit car l'ouverture de cette lunette est de 50 mm. On peut alors viser les 2 extrémités des miroirs pour les petits dièdres d'écartement 80 mm (cf. figure 6.5.2). Sur ces dièdres, il suffit de superposer les réticules objet et image pour effectuer ce réglage. Cependant, ce n'est pas le cas pour les dièdres dont l'écartement est de 110 mm. Il a donc fallu mettre en place une procédure de réglage particulière.

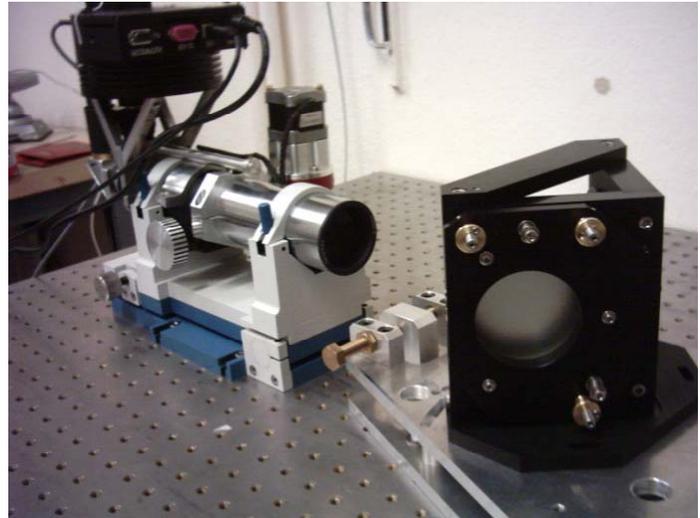
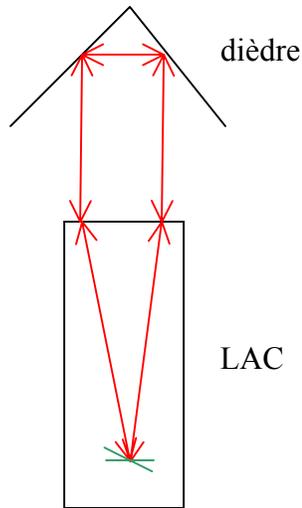
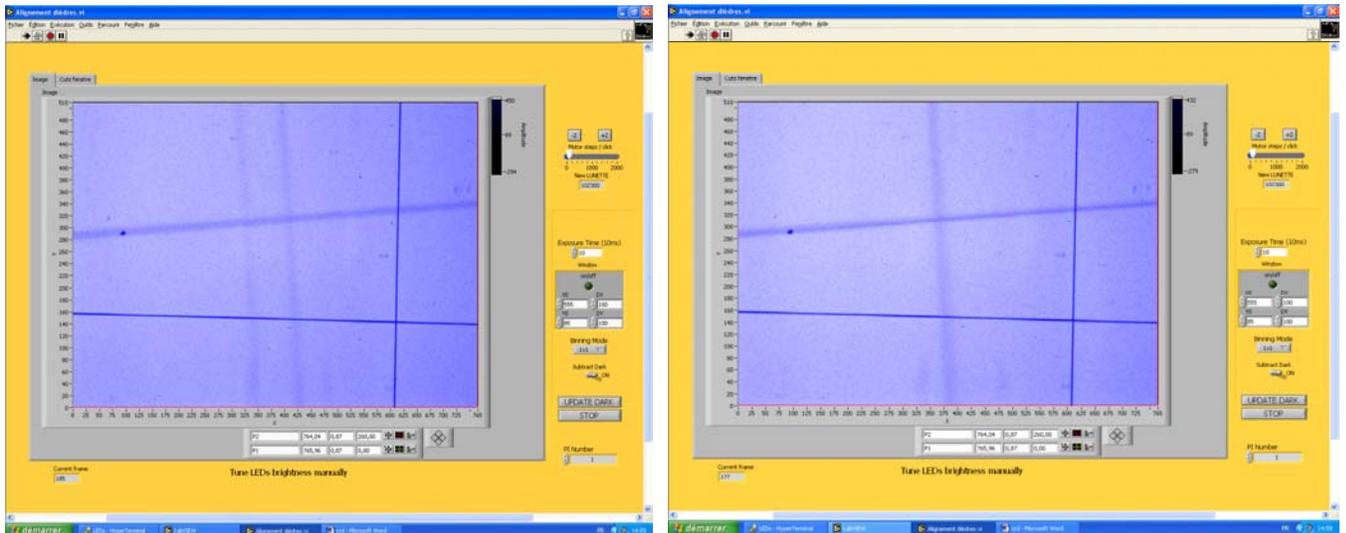


Figure 6.5.2 : réglage en  $\theta$



L'épaisseur du réticule étant d'environ 10 pixels (1 pixel correspond à 1''), l'œil pouvant superposer les réticules avec une précision inférieure à  $1/5^{\text{ème}}$  d'épaisseur, le dièdre est réglé à 2 secondes d'angle une fois les 2 réticules confondus.

Ensuite, nous optimisons le réglage utilisant l'intensité d'une coupe du réticule selon les axes vertical et horizontal et qui est de forme gaussienne. Ainsi, soit on ajuste de manière à avoir l'intensité de la coupe du réticule maximale, soit de manière à avoir la largeur à mi-hauteur la plus petite possible. Ce réglage ne concerne que l'axe horizontal noté x sur le programme. La précision de 1 pixels est largement atteinte sur ce réglage puisque la position du réticule est donnée à  $1/10^{\text{ème}}$  de pixel.

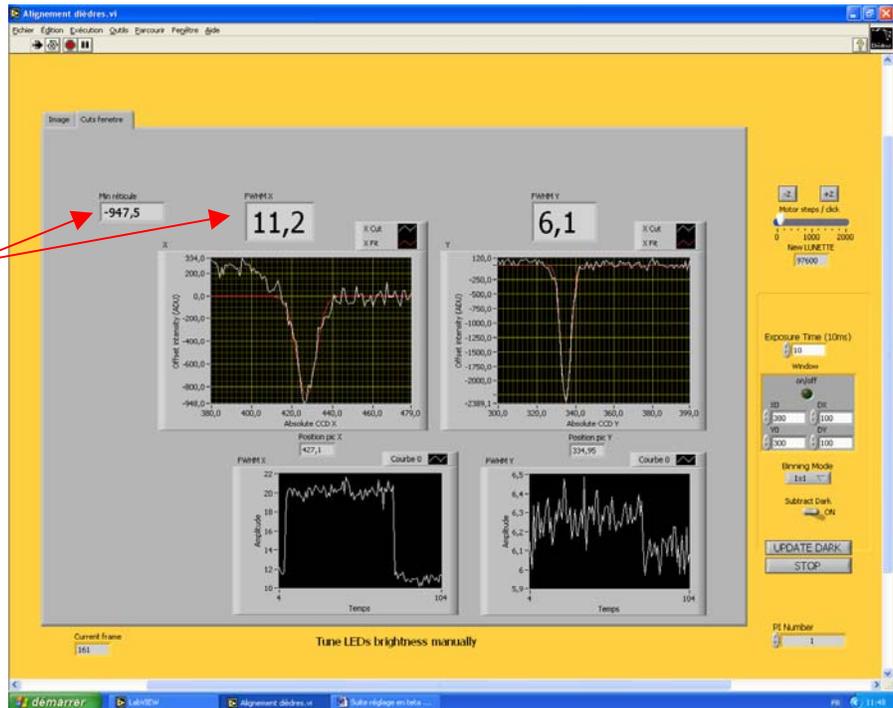
l'axe horizontal, celui qui nous intéresse l'axe vertical

Courbe gaussienne correspondant aux intensités des deux réticules à superposer.

L'intensité mesurée est stable à  $\pm 1\%$ .



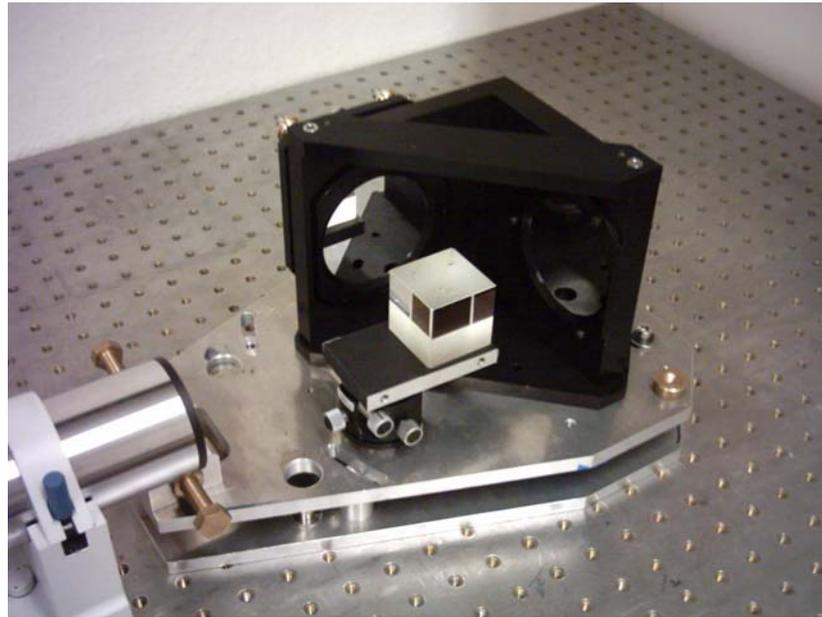
L'ajustement est réalisé soit à l'aide de l'intensité qui est dans notre cas de 947,5 soit sur la largeur à mi-hauteur qui est de 11,2.



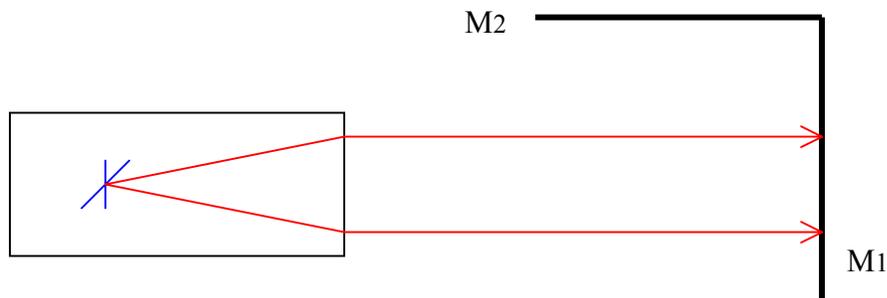
b. Procédure particulière pour les grands dièdres

Pour les 2 grands dièdres dont l'écartement est de 110 mm et non plus de 80 mm, une seule lunette ne permet plus de viser simultanément les 2 miroirs du dièdre. Je dois donc mettre en place une nouvelle procédure de réglage.

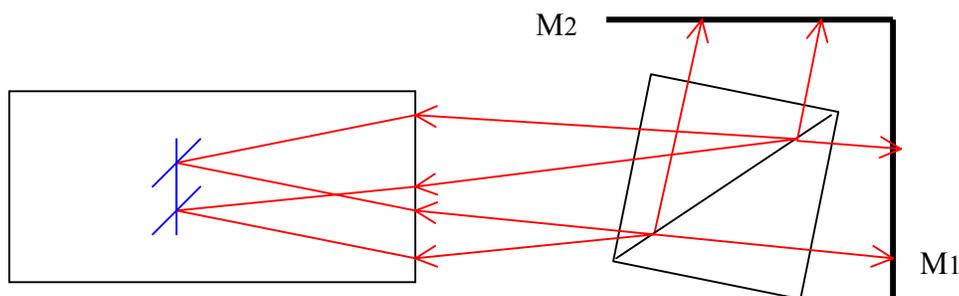
Pour cela, j'utilise un cube séparateur. Cependant, l'utilisation de ce cube induit que celui-ci doit être positionné avec ses faces parallèles aux miroirs du dièdre avec une précision inférieure à la seconde d'angle. Pour cela, j'utilise un petit dièdre déjà réglé.



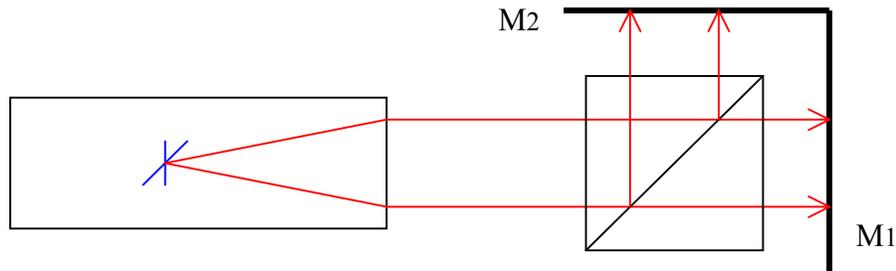
Tout d'abord, je dois régler l'orientation du cube. Pour cela, j'utilise un petit dièdre déjà réglé. Je fais une première autocollimation sur le miroir M1. En faisant confondre les réticules objet et image, le miroir M1 est perpendiculaire à l'axe de la lunette.



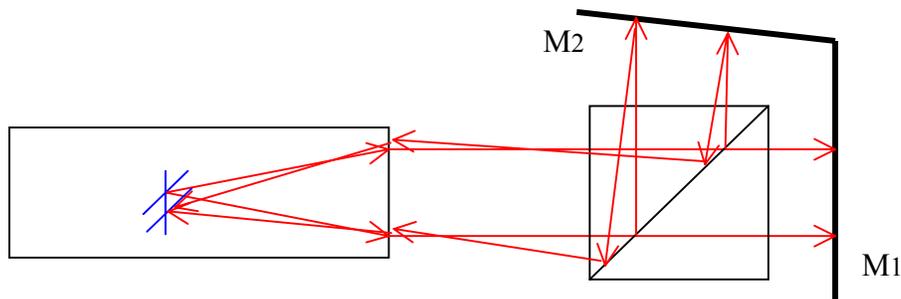
Ensuite, je pose le cube séparateur sur une table 3 rotations. Cependant, les 2 faces du cube n'étant pas parallèles aux 2 faces des miroirs, on obtient 2 images à superposer.



En agissant sur les 3 vis d'orientation du cube, je fais confondre les réticules image de M1 et M2. Une fois cette opération réalisée, le cube est réglé avec ses 2 faces parallèles aux faces des miroirs du dièdre.



Ensuite, j'enlève le petit dièdre et je positionne le grand dièdre à régler (M1 est orienté pour ramener en coïncidence le réticule objet et son image après réflexion sur M1). Je constate alors que les 2 images du miroir M1 et M2 ne sont pas confondues.



J'agis sur la vis de réglage pour faire confondre les 2 réticules: les 2 miroirs plans du dièdre sont alors orthogonaux.

Au moment où j'ai mis en place cette technique de réglage, je n'avais à ma disposition qu'un dièdre. Après réglage du cube séparateur je déréglaï le dièdre avant de le re-régler comme cela vient d'être expliqué. Cette technique s'est avérée efficace puisque lors du contrôle ( en visant directement avec la lunette), la précision de ce réglage était de la seconde d'angle.

Cependant, une fois tous les dièdre mis à ma disposition, je me suis très rapidement rendu compte que cette technique de réglage n'était pas fiable. En effet, cette méthode ne peut marcher que si les miroirs fixes de chaque dièdre sont positionnés avec la même inclinaison car je fais une autocollimation sur cette face avant de régler le cube séparateur. Or, le miroir de la partie fixe n'est pas parfaitement parallèle mais a une petite inclinaison (autour de l'axe horizontal x), qui varie suivant chaque dièdre (la mécanique ne pouvant atteindre cette précision).

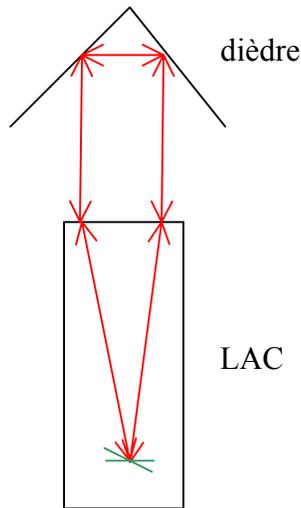
En outre, l'erreur réelle du réglage des grands dièdres est la somme de plusieurs erreurs :

- . L'erreur de réglage des petits dièdres de référence
- . L'erreur de perpendicularité des faces du cube séparateur
- . L'erreur d'inclinaison des miroirs des dièdres différentes pour chaque dièdre
- . L'erreur de réglage du grand dièdre

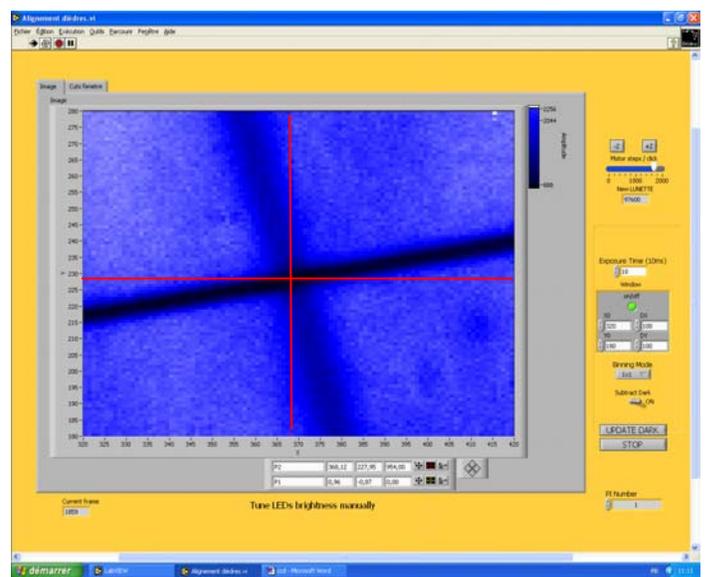
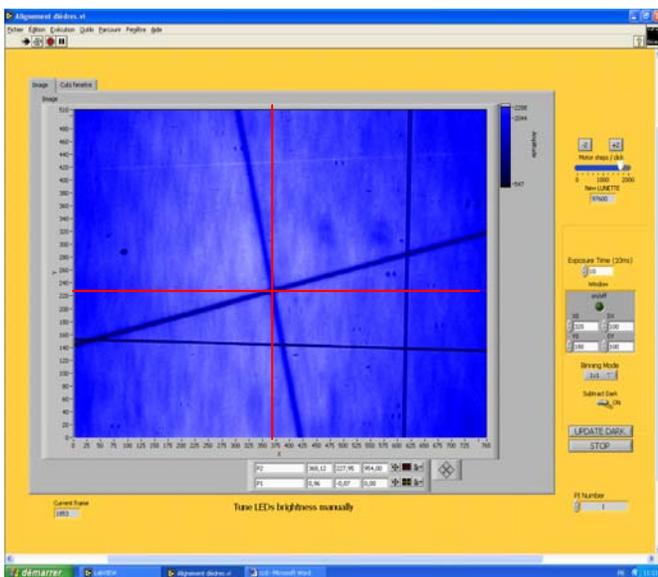
Ces erreurs n'étant pas corrélées, elles s'ajoutent quadratiquement. Pour atteindre une précision finale de 1'' sur les grands dièdres, il faut donc une erreur inférieure à  $(1/\sqrt{4})''$  sur chacun de ces paramètres. Il est donc probable que la précision de réglage de grands dièdres soit supérieure à 1''. Cette précision a été quantifiée : elle est largement supérieure à la tolérance fixé et n'est donc pas acceptable pour un rétro réflecteur qui ira sur la ligne à retard.

Je dois donc mettre en place une autre technique de réglage pour palier à ce problème. Pour cette nouvelle procédure de réglage, j'utilise 2 lunettes autocollimatrices : l'une est en mode de fonctionnement, c'est-à-dire que son réticule est éclairé et l'autre est en mode d'observation. Dans ce cas là, on ne pourra plus superposer 2 réticules car on ne les observera pas en même temps. Cependant, positionner les 2 réticules sur le même axe correspondrait à les faire se confondre.

Tout d'abord, j'utilise un dièdre déjà réglé (ceux dont l'écart entre les centres des miroirs est de 80 mm) et je fais une première autocollimation à l'aide de la LAC+SBIG sur le dièdre.

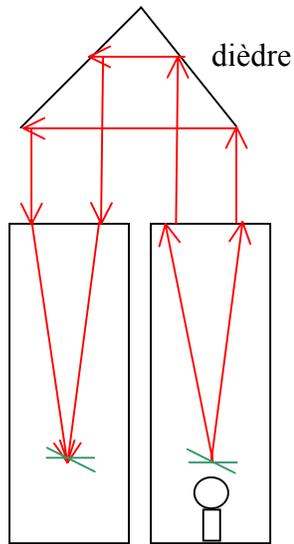


Je détermine la position du réticule à l'aide du réticule rouge qui sert de référence.

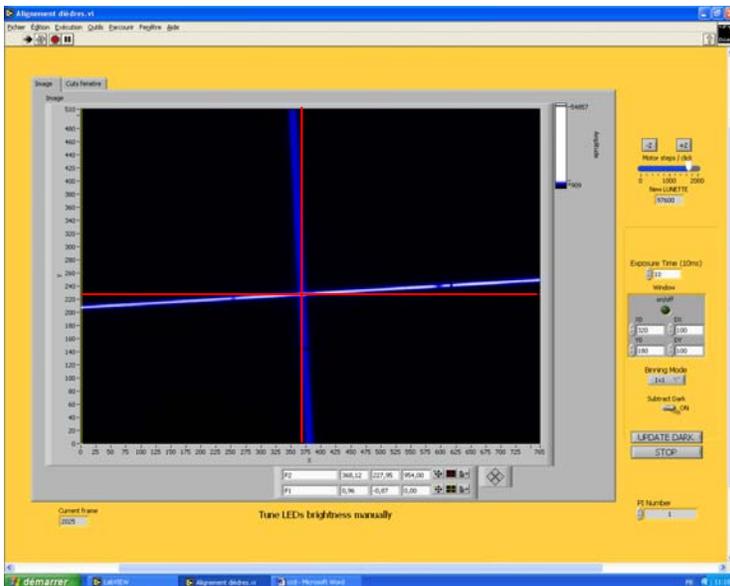
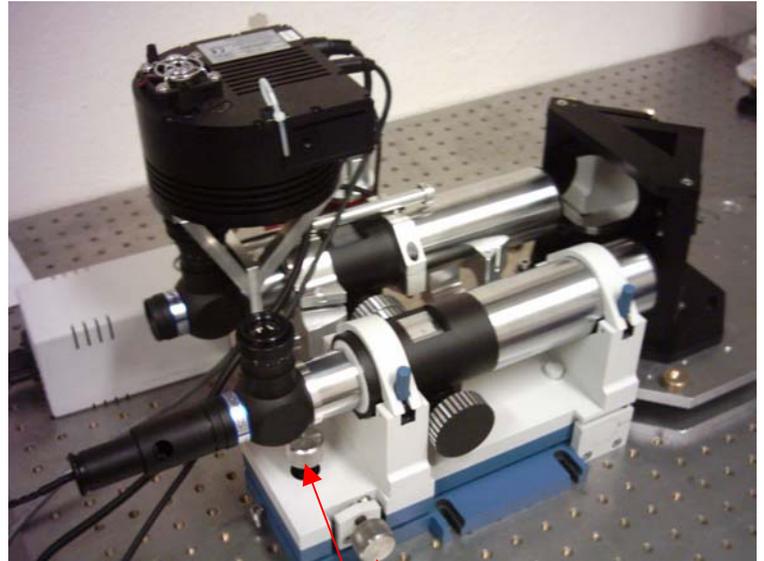


Ensuite, la seconde lunette autocollimatrice est positionnée de manière à ce que les axes optiques des 2 lunettes soient parallèles à 1'' près. Pour cela, je place le même dièdre déjà réglé face aux 2 lunettes.

Je ne touche plus à la position de la LAC+SBIG. Celle-ci n'a plus son réticule éclairé. J'éclaire seulement le réticule de la seconde lunette et je me sers de la LAC+SBIG pour observer le déplacement du réticule de la seconde lunette. Le dièdre utilisé étant réglé inférieure à 1'', si je positionne le réticule de la seconde lunette sur le réticule de référence rouge, alors les 2 lunettes seront alignées à la précision du réglage du petit dièdre près ( $< 1''$ ).

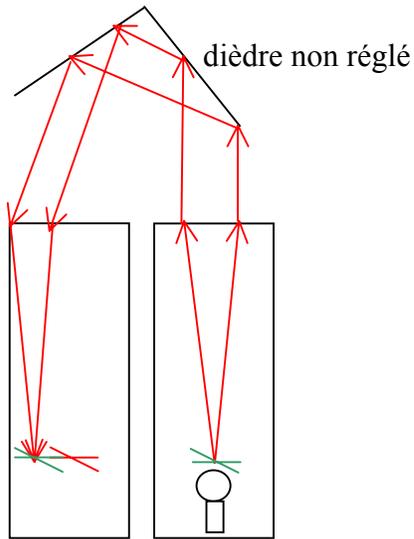


LAC+SBIG (mode observation)      LAC (mode éclairage)

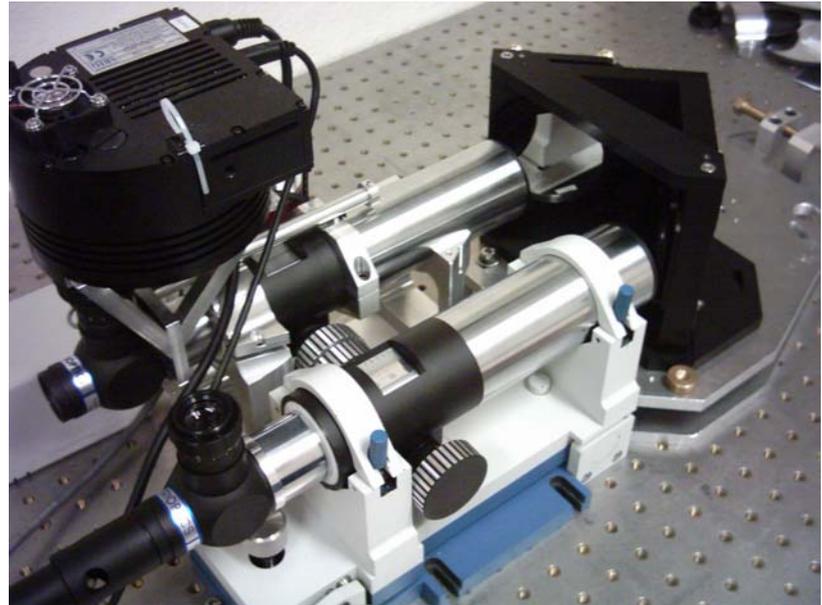


On agit sur les vis de positionnement de la LAC pour déplacer son réticule observé par la LAC+SBIG (le fond est noir car la LAC+SBIG est en mode d'observation et donc, non éclairée). Une fois celui-ci positionné sur le réticule rouge servant de référence, les 2 lunettes sont alors parallèles

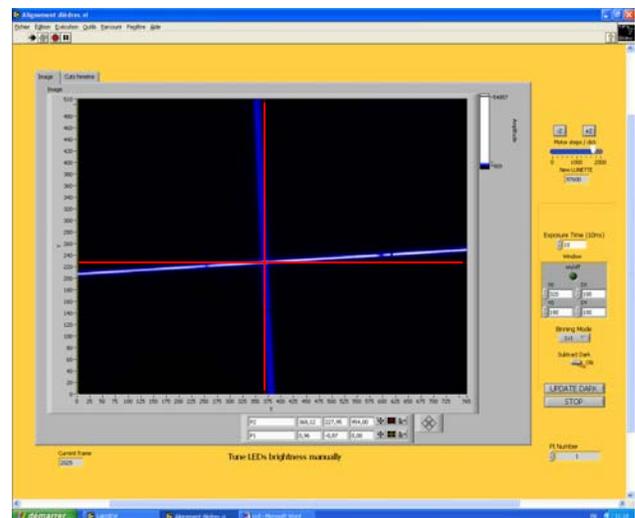
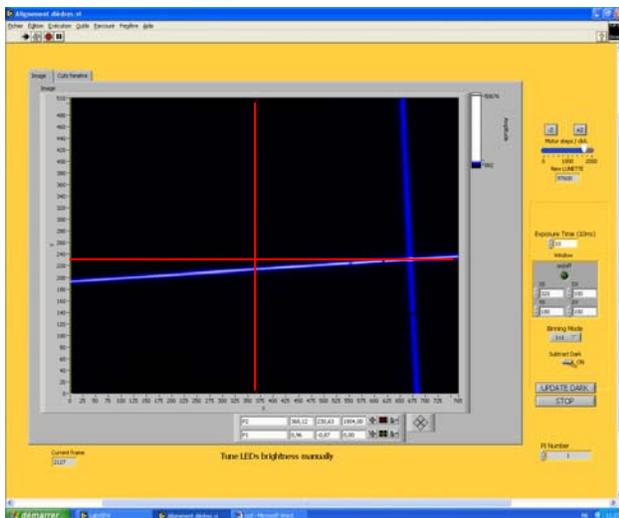
Maintenant, pour réaliser le réglage en  $\theta$  sur les grands dièdres, j'enlève le petit dièdre qui a permis de régler les 2 lunettes parallèles et je positionne le dièdre d'écartement 110 mm à régler :



LAC+SBIG (mode observation)      LAC (mode éclairage)



Le réticule de la lunette source n'est pas superposé au réticule rouge de référence de l'autre lunette : j'agis donc sur la vis de réglage du miroir ajustable pour procéder à l'ajustement.

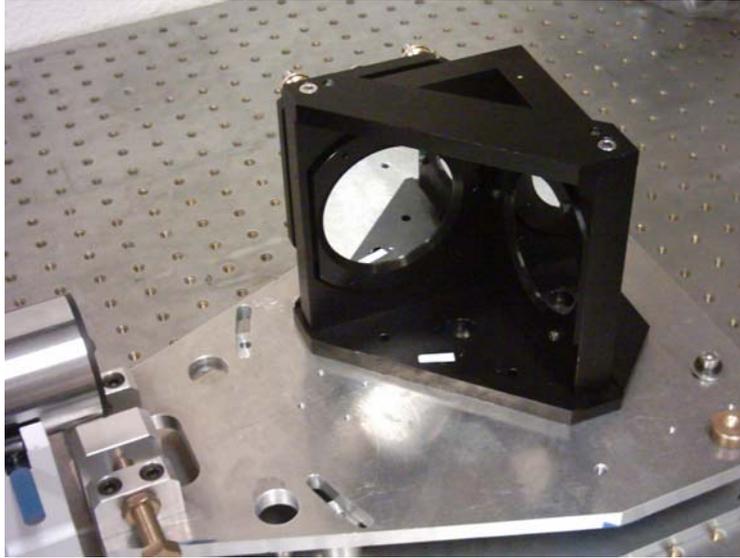


Une fois le réticule observé superposé au réticule rouge de référence, le dièdre est réglé. Or, ce réglage a été réalisé avec des lunettes qui ont elles-mêmes été réglées avec un petit dièdre. Si le dièdre est réglé avec une erreur très inférieure à la seconde d'angle, on peut négliger ce facteur. Un facteur d'erreur de  $\sqrt{2}$  est donc à prendre en compte. Cependant, il sera plus judicieux de dire que le réglage sur les grands dièdre est réalisé à  $1.\sqrt{3}''$  près dû à l'addition de l'erreur de réglage du réticule de la lunette (cf. VI.6 p°60), de l'erreur de réglage sur le petit dièdre et enfin sur l'erreur de réglage du grand dièdre. Cette méthode à l'avantage d'éliminer l'inconnue « cube séparateur ».

## 5. Réglage en $\varphi$

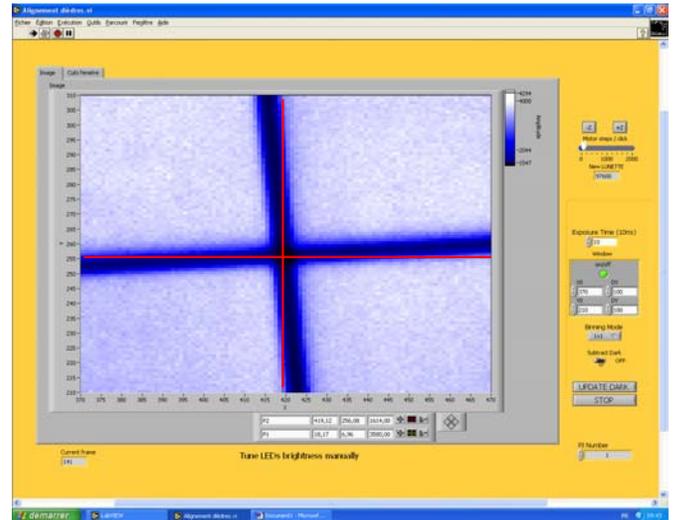
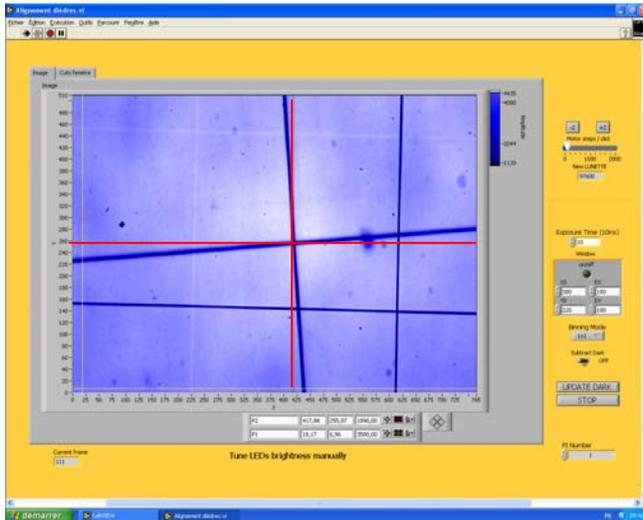
Le réglage en  $\varphi$  consiste à régler les dièdres de manière à ce que l'angle d'inclinaison entre les 2 miroirs soit de l'ordre de la seconde d'angle.

Cependant, contrairement au réglage en  $\theta$ , on ne peut pas superposer 2 réticules. On ne peut plus aligner un miroir par rapport à l'autre de façon directe.

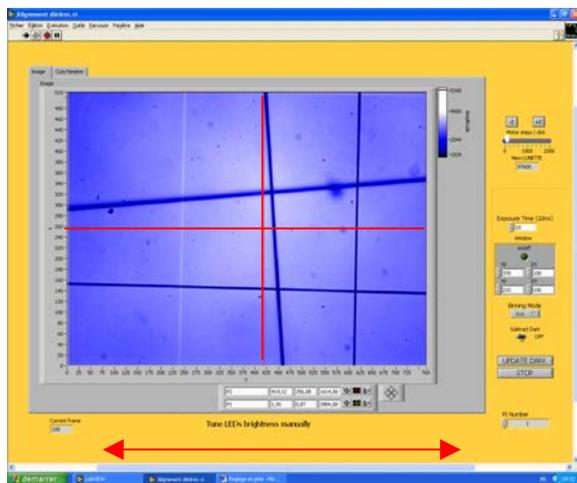
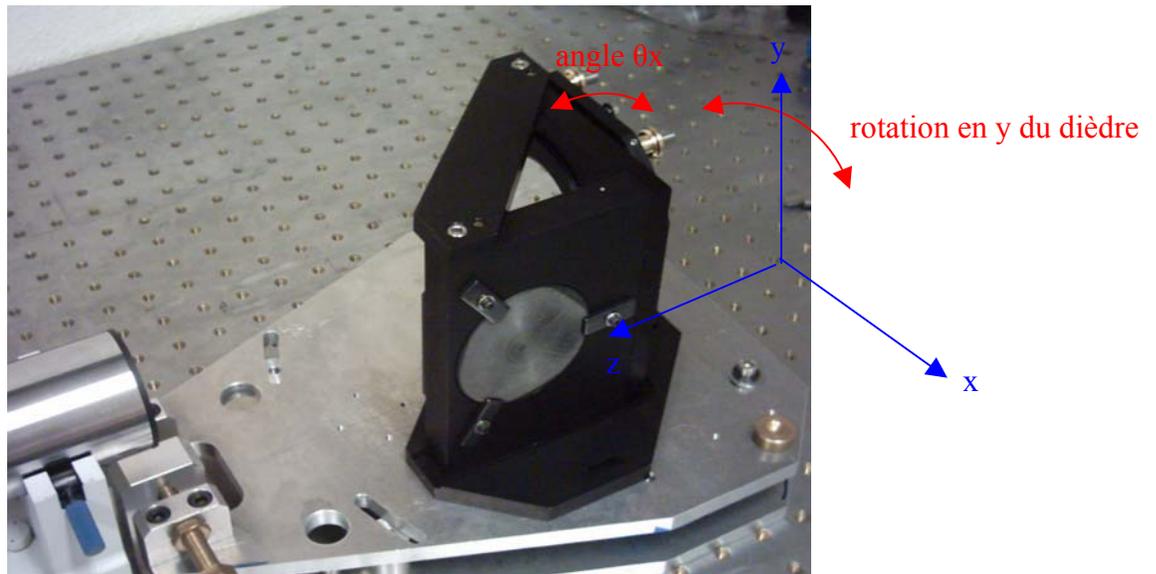


Pour cela, je suppose que le 1<sup>er</sup> miroir fixe est parfaitement orthogonal à son support. Je fais une première autocollimation sur cette surface. L'axe de la lunette autocollimatrice est alors perpendiculaire au miroir M1.

Je définis la position du centre du réticule à l'aide d'un réticule de référence (réticule rouge). Ainsi, lorsque je positionne le second miroir, je dois superposer l'image du réticule sur le réticule rouge de référence.



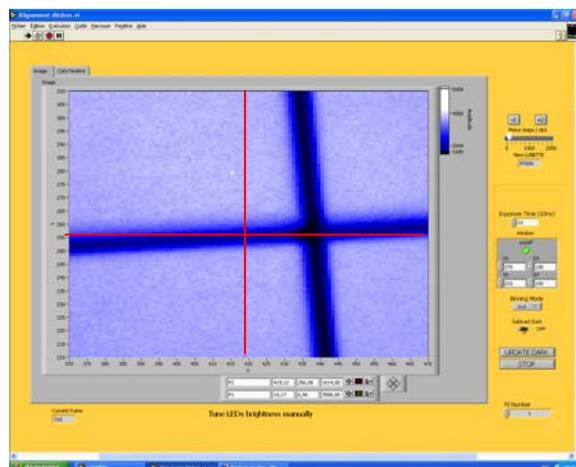
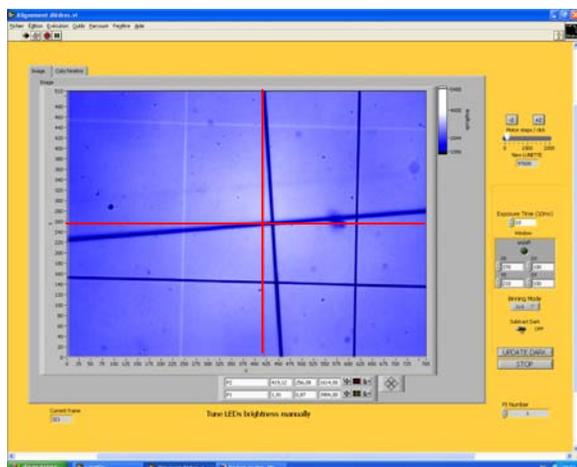
Ensuite, je positionne approximativement le second miroir dans l'axe de la lunette (rotation du dièdre en y) et j'agis sur la vis de positionnement pour repositionner le réticule image à la même position que la position du réticule du miroir M1.



rotation du dièdre en y

angle  $\theta_x$

L'angle  $\theta_x$  est lu sur cet axe : on constate en positionnant le dièdre que celui-ci n'est pas réglé ; il faut donc agir sur la vis de réglage de manière à faire descendre le centre du réticule sur l'axe de référence en rouge comme cela est montré (ajustement précis en zoomant à l'aide de la fenêtre).



La rotation du dièdre en  $z$  est réalisée à la main approximativement, de manière à centrer le champ de la caméra CCD sur le miroir mobile. Cependant, il n'est pas nécessaire de positionner exactement les 2 miroirs de manière à faire confondre le centre des 2 réticules car seulement l'axe concernant l'angle  $\varphi$  nous intéresse.

Cependant, on constate que l'axe du réticule n'est pas parallèle à celui du réticule rouge.

En mesurant la position du réticule à droite puis à gauche de la fenêtre, on constate que celui-ci se décale de 10 pixels ce qui correspond à  $10''$  sur une fenêtre de 765 pixels. En positionnant les réticules sur une fenêtre de 20 pixels, on pourra alors négliger cette erreur ( $<0.3''$ )

De plus, contrairement au 1<sup>er</sup> réglage en  $\theta$ , le dièdre doit changer de position durant le réglage. Or, le support sur lequel nous travaillons n'est pas plan à la seconde d'angle près. Le support doit être plan à quelques microns près.

Cependant, l'utilisation de la même surface d'appui pour les 2 miroirs plans relâche cette contrainte et on peut supposer que le support n'introduit pas d'erreur sur le réglage en  $\varphi$  supérieure à quelques secondes d'angles.

La base du dièdre étant de 10cm, un défaut de planéité de  $50 \mu\text{m}$  provoquera une inclinaison d'une seconde d'angle. Le support utilisé n'a pas été spécifié pour être plat à  $50 \mu\text{m}$  mais on peut penser qu'il l'est (surface lisse) sur une si courte distance. Cependant, lors du montage du chariot central sur la ligne à retard, les dièdres pourront être ajustés à l'aide d'un jeu de cales très fines (de l'ordre du micron) afin de supprimer cet « angle offset ».

Enfin, à noter que les réglages en  $\theta$  et  $\varphi$  sont légèrement couplés (les axes ne sont pas parfaitement perpendiculaires). Une fois le second réglage réalisé, il sera donc nécessaire de revenir au premier afin de vérifier si celui-ci n'a pas été légèrement modifié.

## 6. Problème rencontré

Pendant le réglage des dièdres de la ligne à retard, je me suis rendu compte d'une anomalie concernant une des deux lunettes autocollimatrices : en effet, même si les 2 lunettes n'ont pas la même précision, celles-ci doivent me donner une même image pour un dièdre ce qui n'est pas le cas : une lunette montrait 2 réticules superposés, c'est-à-dire un dièdre réglé tandis que l'autre observait 2 réticules séparés.

Afin de vérifier si ces 2 lunettes sont opérationnelles, je place une lunette en face de l'autre ; j'éclaire l'une des deux et j'observe avec l'autre. Si les 2 lunettes sont réglées, je dois voir le réticule de la lunette observée net à travers la première lunette, ce qui n'est pas le cas (cf. figure 6.4.1).

J'en déduis donc que la LAC+ SBIG est mal réglée, ce que je ne pouvais supposer au départ, sachant que l'on observait le réticule de l'oculaire et de l'objectif net à l'aide de la caméra CCD. Cependant, cette condition n'est pas suffisante pour avoir une lunette autocollimatrice réglée car les 2 réticules sont nets mais observés avec 2 lentilles différentes (l'une avec l'oculaire et l'autre avec l'objectif). L'autre condition nécessaire au bon fonctionnement de la lunette est que les réticules objet et image soient équidistants par rapport à la lame séparatrice : cette condition non respectée est à l'origine du dysfonctionnement lors de la lecture.

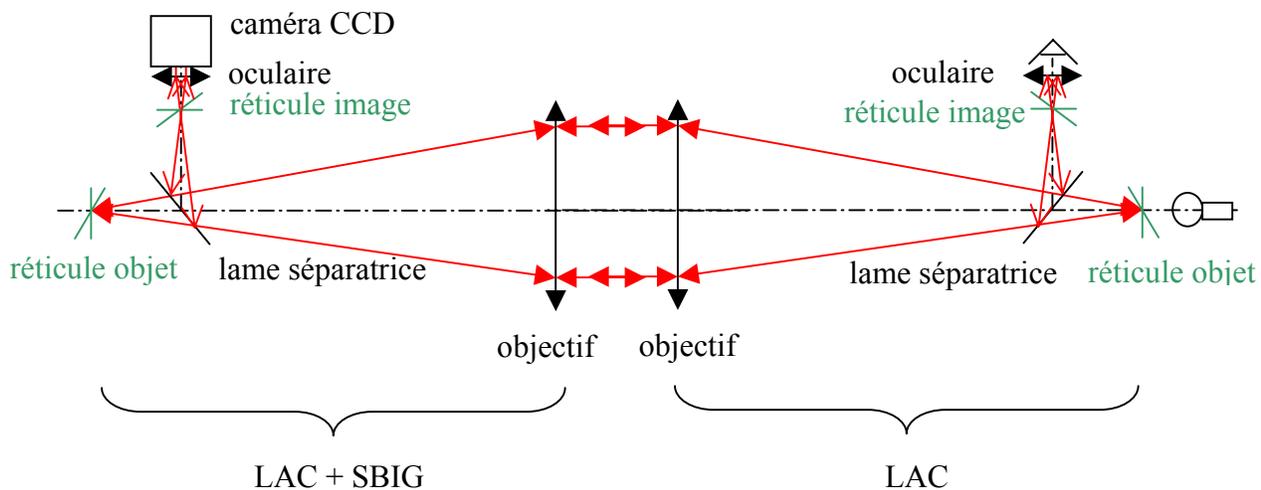


Figure 6.4.1 : Schéma du principe de fonctionnement

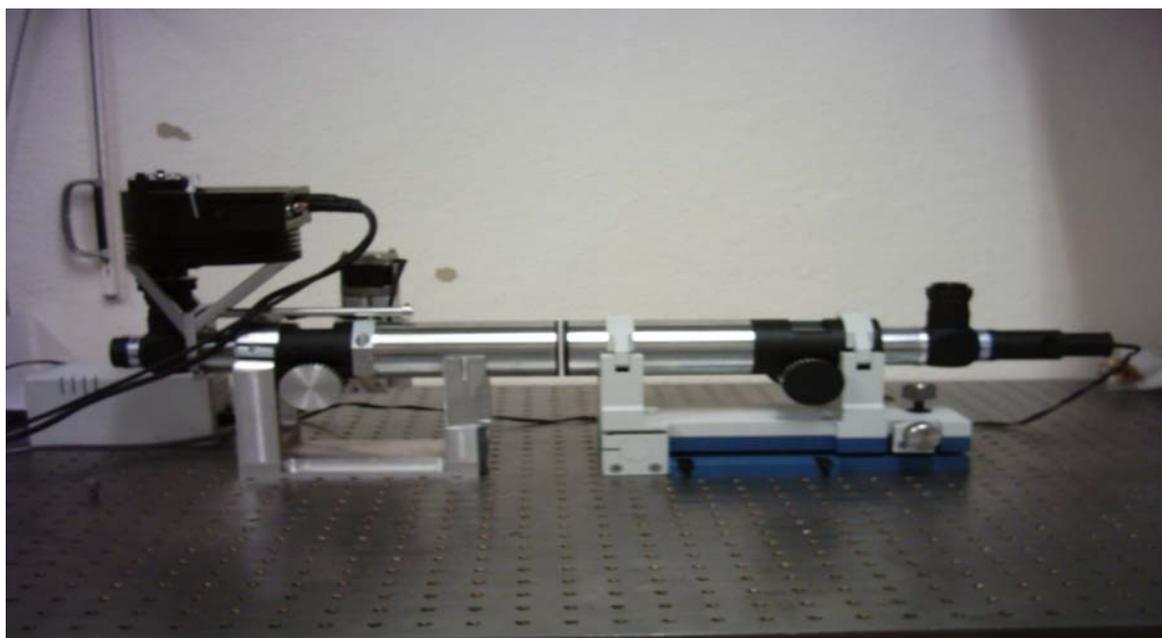


Figure 6.4.2 : Photo du montage

Afin de procéder au réglage de cette lunette, j'enlève le réticule objet de la lunette à régler (LAC + SBIG) et j'éclaire le réticule de l'oculaire (réticule image) avec la lunette LAC. J'agis sur le focus (commandé par un moteur pas à pas sous LABView) jusqu'à ce que j'observe le réticule net à travers l'objectif. Le réticule image est alors placé à une distance égale à la distance focale de l'objectif.

Ensuite, je règle la position du réticule objet par autocollimation en plaçant un miroir devant l'ouverture de la lunette. La lame séparatrice étant fixe, je viens positionner le réticule objet en le vissant jusqu'à ce que l'on observe le réticule net à travers le même objectif. On a alors le réticule placé au foyer de l'objectif. Cependant, l'erreur sur ce réglage a été prise en compte pour le réglage des grands dièdres (cf. VI.5 p°57).

## 6. Actions menées sur la ligne à retard:

La ligne à retard sera d'abord intégré d'un coté du chariot central (coté Aerotech). Une fois cette partie terminée, le même travail sera réalisé de l'autre côté (table Schneeberger).

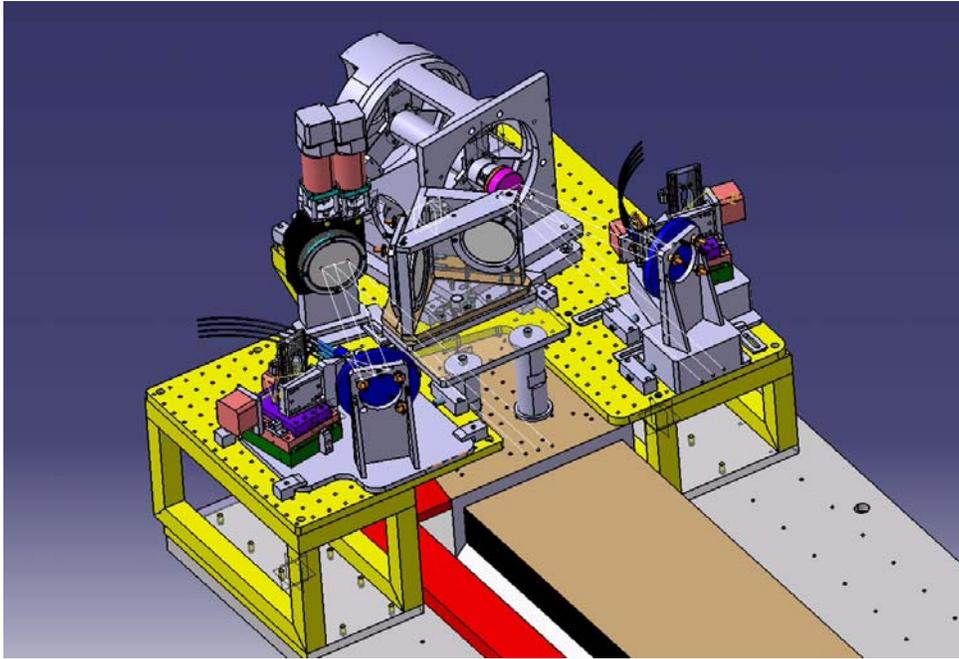


Figure 5.1 : Vue isométrique de la table Aerotech

### a. Réglage de la hauteur du châssis Aerotech

Tout d'abord, le châssis de la table Aerotech doit être rehaussé de manière à ce que le faisceau scientifique, positionné à 336.3 mm de hauteur sur le châssis Aerotech, soit centré sur le miroir du 1<sup>er</sup> dièdre (le rehaussement est estimé à 8 mm par rapport à la position du châssis actuel). Lorsque le châssis est rehaussé, celui ci est remis à niveau à l'aide d'un système à bulles (1 graduation = 0.05 mm pour 1 m).

Une fois le faisceau laser réglé parallèle au châssis (cf. figure 5.2), on peut alors vérifier si le rehaussement du châssis est correct. Pour cela, le chariot central est amené du côté de la table Aerotech et le faisceau laser préalablement réglé se retrouve centré sur le miroir du 1<sup>er</sup> dièdre du Chariot Central (cf. figure 5.3).

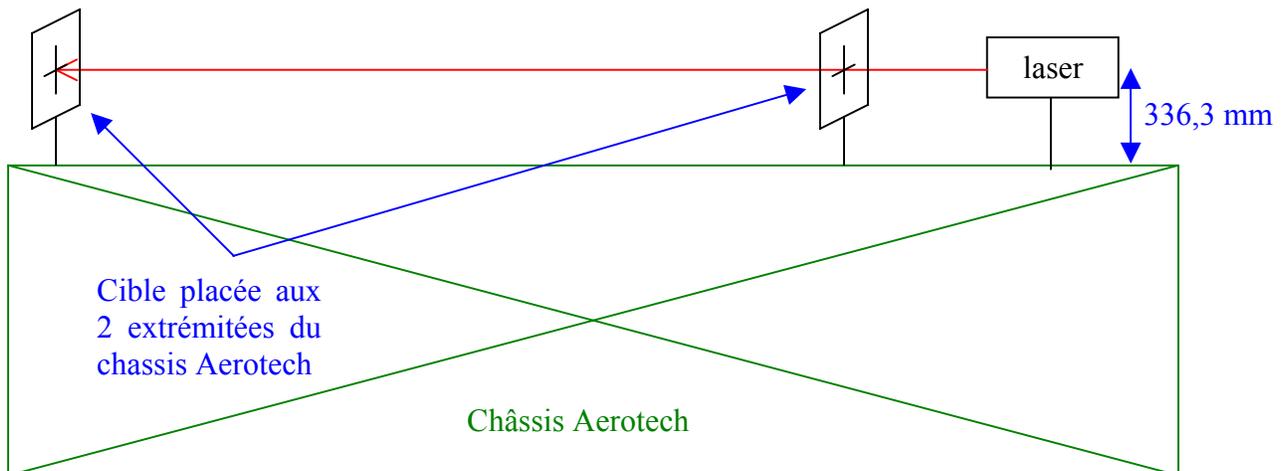


Figure 5.2 : Réglage du laser par rapport au châssis Aerotech

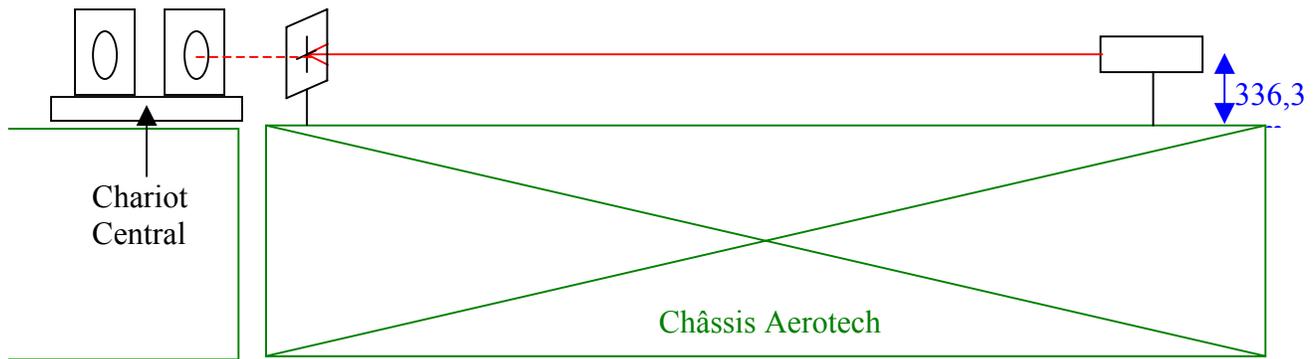


Figure 5.3 : Rehaussement du châssis vérifié à l'aide du Chariot Central

### b. Réglage du faisceau de référence

Une fois cette opération réalisée, il faut définir un faisceau de référence pour pouvoir régler le parallélisme des rails (la tolérance sur ce parallélisme est de 1 mm). Ce faisceau de référence est défini par un laser placé sur la table Aerotech. Tout d'abord, nous réglons le faisceau sur une distance correspondant à la longueur de la table Aerotech (1 mètre). Un réglage à l'œil nous permet d'obtenir un réglage correct à  $\frac{1}{2}$  mm sur une distance d'un mètre. Cependant, le faisceau doit être réglé sur la distance la plus importante possible. Nous plaçons donc une cible au centre de la table Schneeberger, exactement où l'impact laser doit avoir lieu. 10 mètres plus loin, la différence entre l'impact théorique et l'impact réel doit être de l'ordre de 5 mm car le réglage est bon à  $\frac{1}{2}$  mm sur une distance d'un mètre. Or, on constate que 10 mètres plus loin, ce n'est pas du tout le cas suivant l'axe horizontal x. Cela est dû au fait que les faces avant des tables Aerotech et Schneeberger ne sont pas parallèles entre elles (cf. figure 5.4). Nous déplaçons donc en rotation la position du châssis Aerotech de manière à ce que le faisceau soit réglé sur l'axe horizontal de la table Schneeberger sans que la position du laser sur la distance d'un mètre ne soit modifiée. L'axe vertical est peaufiné en ajustant le réglage du laser.

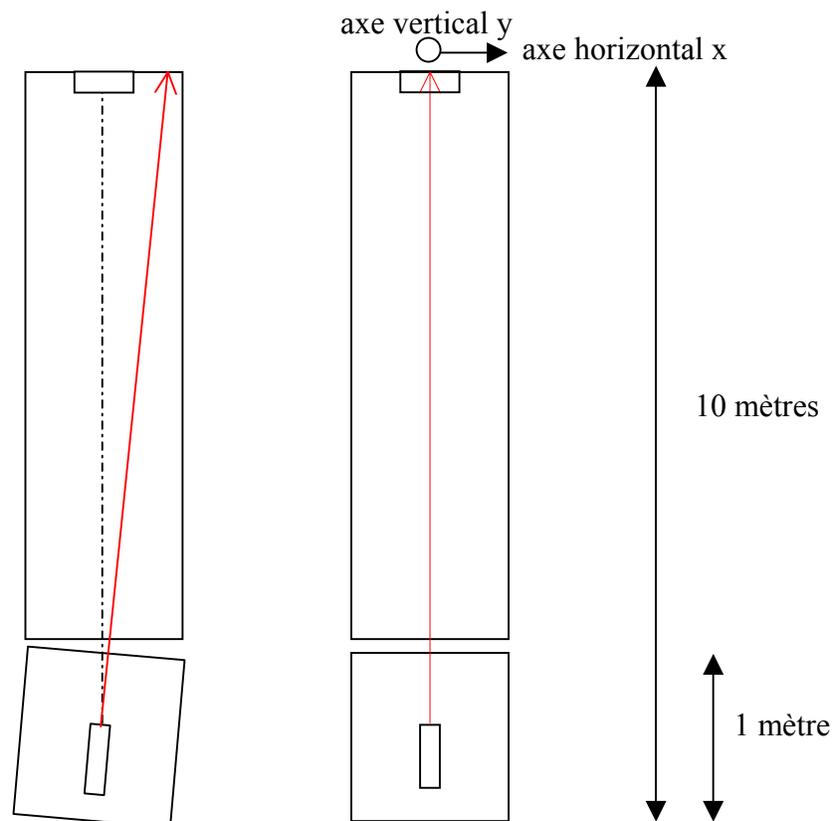


Figure 5.4 : Réglage du parallélisme des faces avant de la table Aerotech et Schneeberger

### c. Réglage du parallélisme des rails

Le laser étant réglé sur une distance de plus de 10 mètres, nous plaçons une cible sur le chariot central. Le chariot central part du côté du châssis Aerotech et sur les 12 mètres de rails, c'est-à-dire jusqu'au châssis Schneeberger. Le faisceau ne doit pas se déplacer sur l'axe horizontal et vertical de plus de 1 mm (cf. figure 5.5).

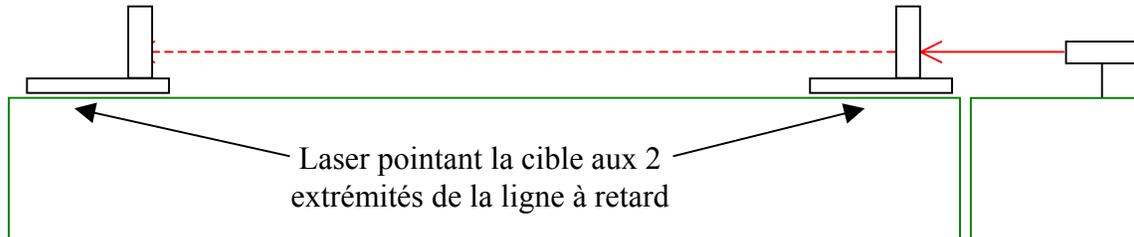


Figure 5.5 : Réglage du parallélisme des rails

Le rail que nous voyons sur la photo (cf. figure 5.6) sert de direction pour le chariot central. L'autre rail sert de guidage. Pour le déplacement du faisceau sur l'axe horizontal, on n'agit que sur rails servant de direction. Sur l'axe vertical, c'est à dire la hauteur, on rehausse les 2 rails.

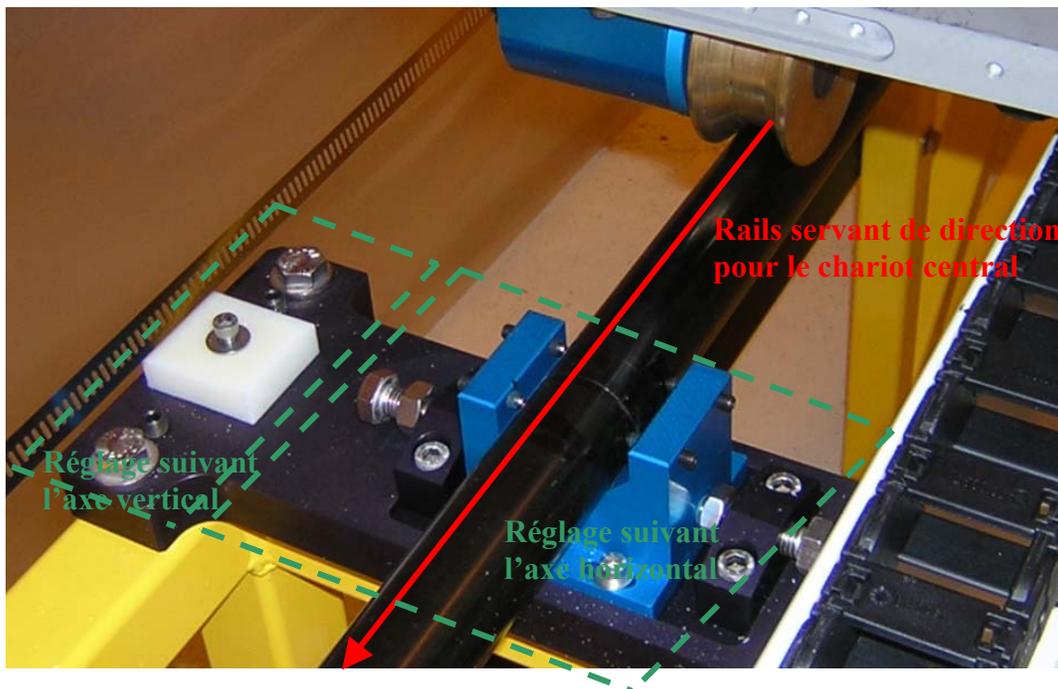


Figure 5.6 : Réglage du parallélisme des rails

Une fois ce réglage réalisé, on vérifie visuellement que sur toute la longueur des rails, la cible posée sur le chariot central ne varie pas de plus d'un millimètre. Il est difficile de descendre en dessous de cette tolérance car ce réglage dépend aussi de la qualité des rails utilisés. En effet, les interféromètres VLT et Keck utilisent des lignes à retard dont le parallélisme et la rectitude des rails est de 100  $\mu\text{m}$ . Cependant, dans cette phase de démonstration du projet, il est impensable de pouvoir s'acheter des rails ayant cette précision. Nous décidons donc de relâcher cette contrainte en positionnant des moteurs dans le sous système chariot central qui auront pour rôle de compenser cette erreur. Cependant, la tolérance de 1 mm doit absolument être respectée au risque de voir cette erreur amplifiée par les allers retour du faisceau à travers les dièdres.

#### d. Réglage de la rectitude des rails

Le dernier réglage des rails concerne la rectitude des rails. Ce réglage est réalisé de manière à avoir la table supportant le chariot central toujours parallèle à la table Aerotech. Pour cela, nous plaçons un niveau à bulles sur la table du chariot central et nous agissons sur les vis de positionnement du rail en hauteur. Cependant, ce réglage a ses limites : les défauts de surface du chariot central (tolérance de 2 mm sur une longueur de 400 mm) et des rails font que suivant la position où est posé le niveau sur le chariot, celui-ci n'est légèrement pas au même niveau.

Une fois ce réglage réalisé, les rails sont considérés comme réglés et ne seront plus retouchés. Nous pouvons maintenant poser le chariot central sur la table convenue à cet effet.

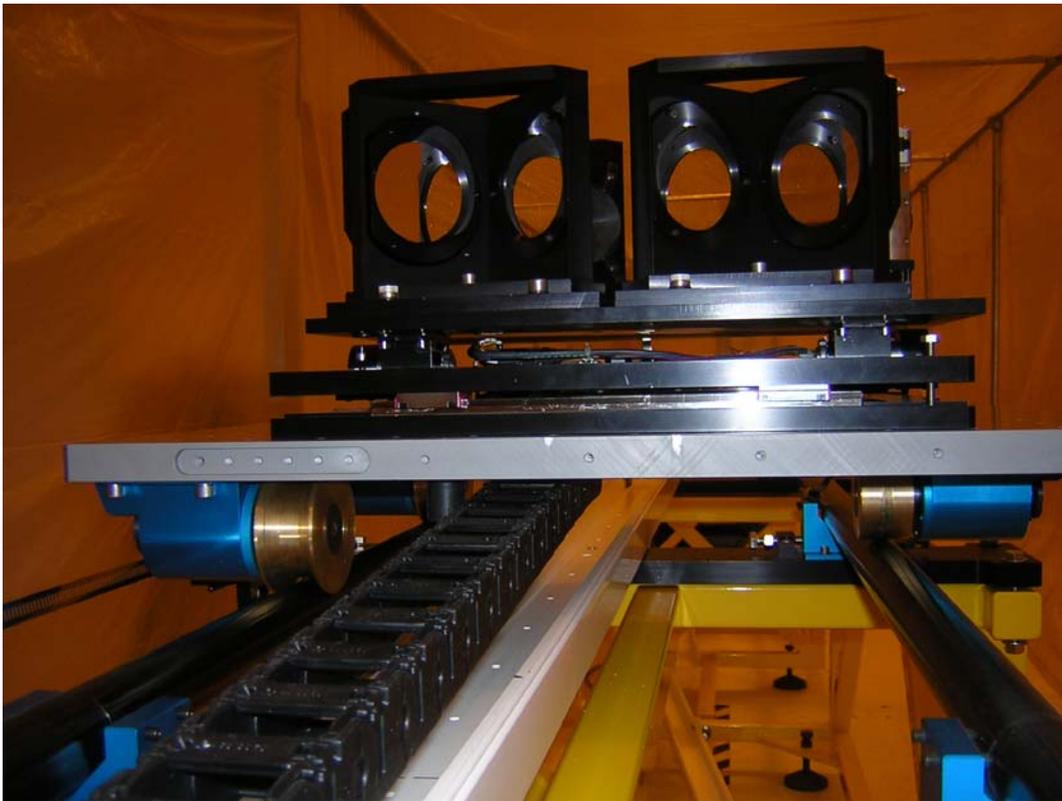


Figure 5.7 : Chariot central posé sur la table après les réglages des rails

Le laser est positionné de manière à simuler le faisceau scientifique ; il est réglé de manière à être parallèle aux rails et centré sur le miroir du premier dièdre du chariot central.

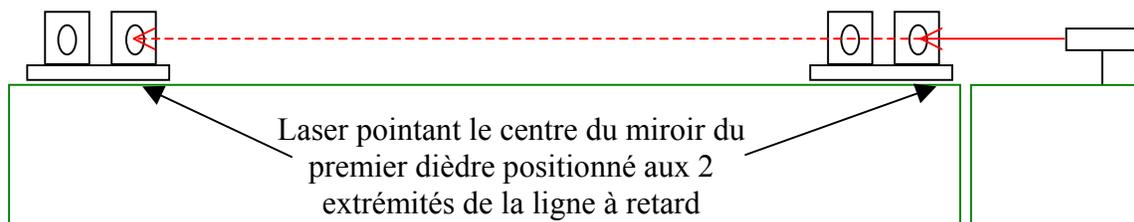


Figure 5.8 : Simulation du faisceau scientifique

### e. Positionnement des dièdres

Ensuite, nous plaçons une cible sur la table Aerotech et nous faisons varier la position du chariot central pour voir comment varie le faisceau après la traversé d'un seul dièdre.

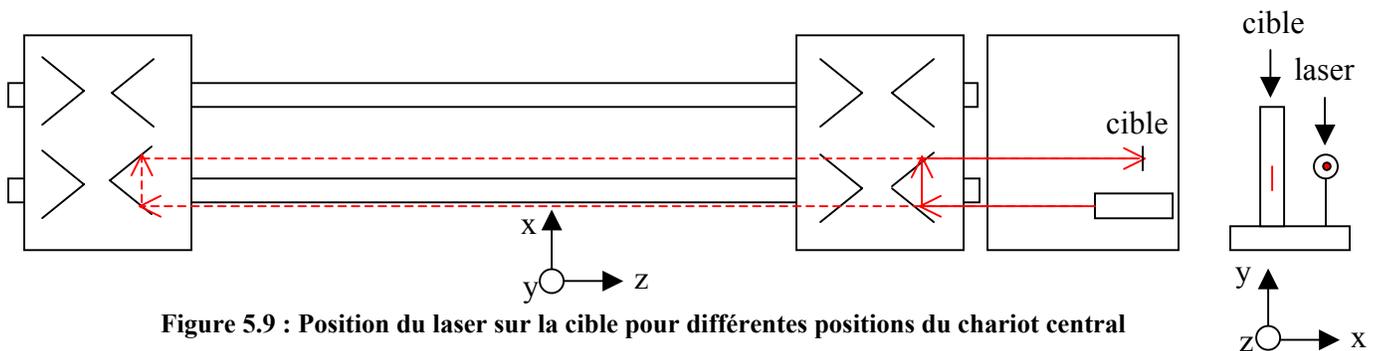


Figure 5.9 : Position du laser sur la cible pour différentes positions du chariot central

Je place un niveau à bulle sur la plaque du chariot central qui supporte les dièdres et à chaque position du chariot central sur la ligne à retard, j'agis sur le moteur permettant de régler l'assiette du chariot central (cf. figure 5.10). Enfin je repère la position du faisceau sur ma cible (cf. figure 5.9).

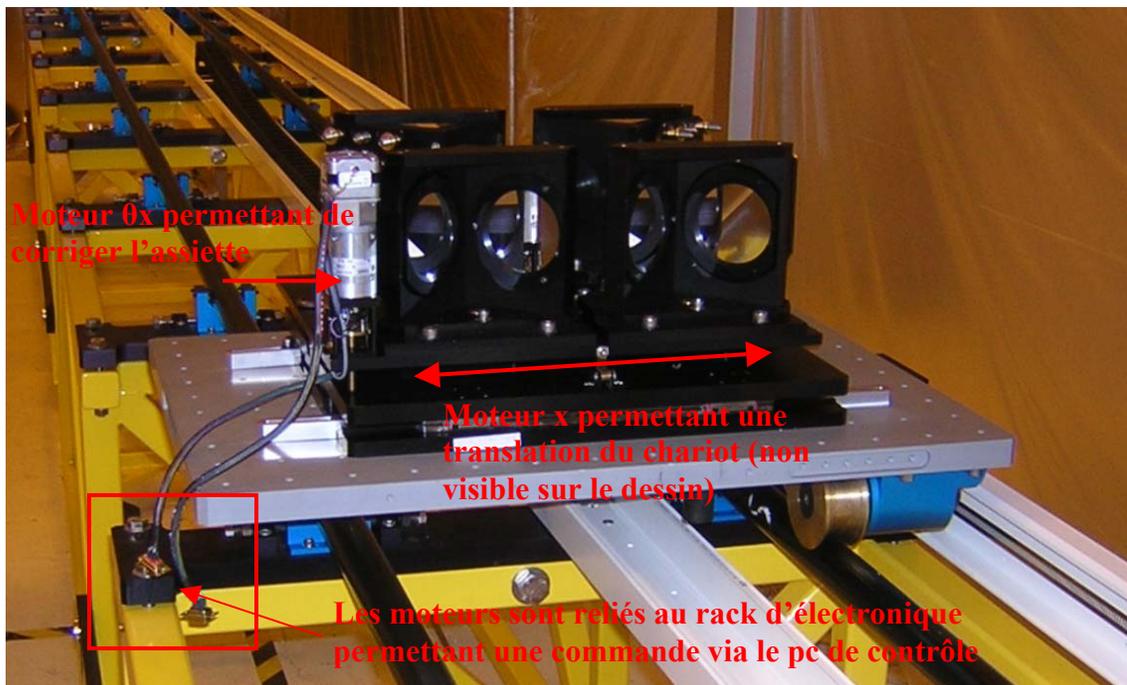


Figure 5.10 : Moteurs du chariot central

Je constate que le faisceau varie de plusieurs centimètres sur l'axe vertical. Je dois donc utiliser des cales que je place sous le dièdre pour rehausser le faisceau. Ces cales très fines, sont de l'ordre du dixième de millimètre (cf. figure.5.11)

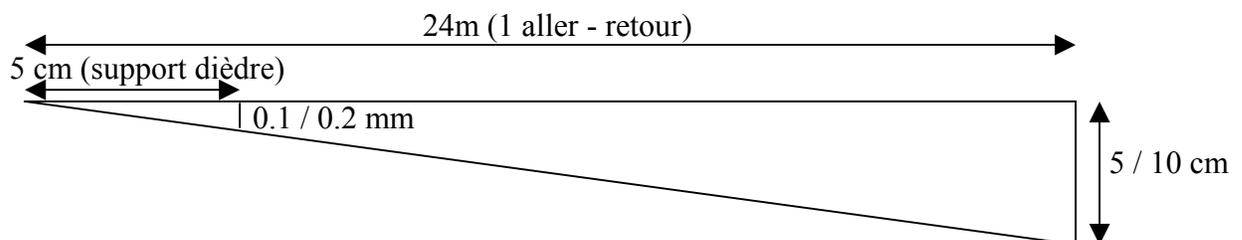


Figure 5.11 : Détermination de l'épaisseur de la cale à positionner sous le dièdre

Le même travail est effectué sur les dièdre de la table Aerotech et le 2<sup>nd</sup> dièdre du chariot central avec succès : après 3 dièdres et 48 mètres de propagation du faisceau, celui-ci ne varie sur la cible que de 4 millimètres sur l'axe vertical et ne varie pas sur l'axe horizontal.

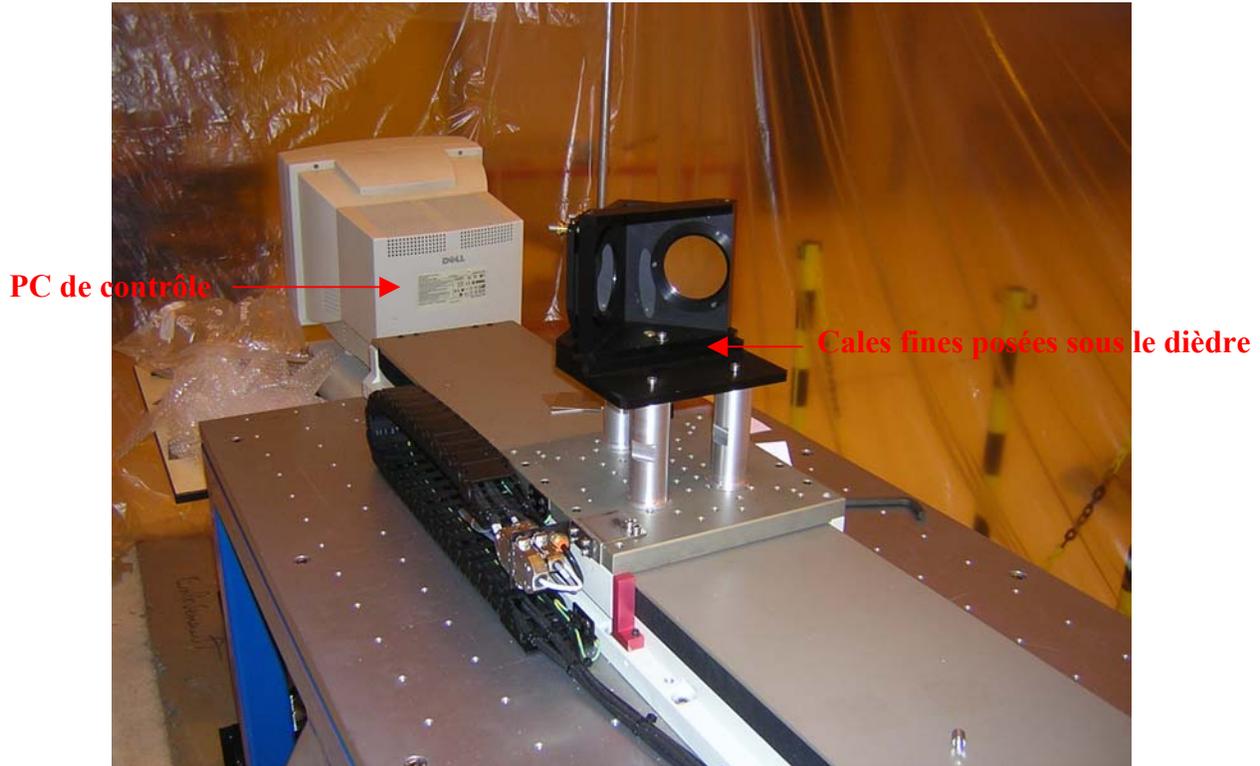


Figure 5.12 : Dièdre de la table Aerotech et PC de contrôle

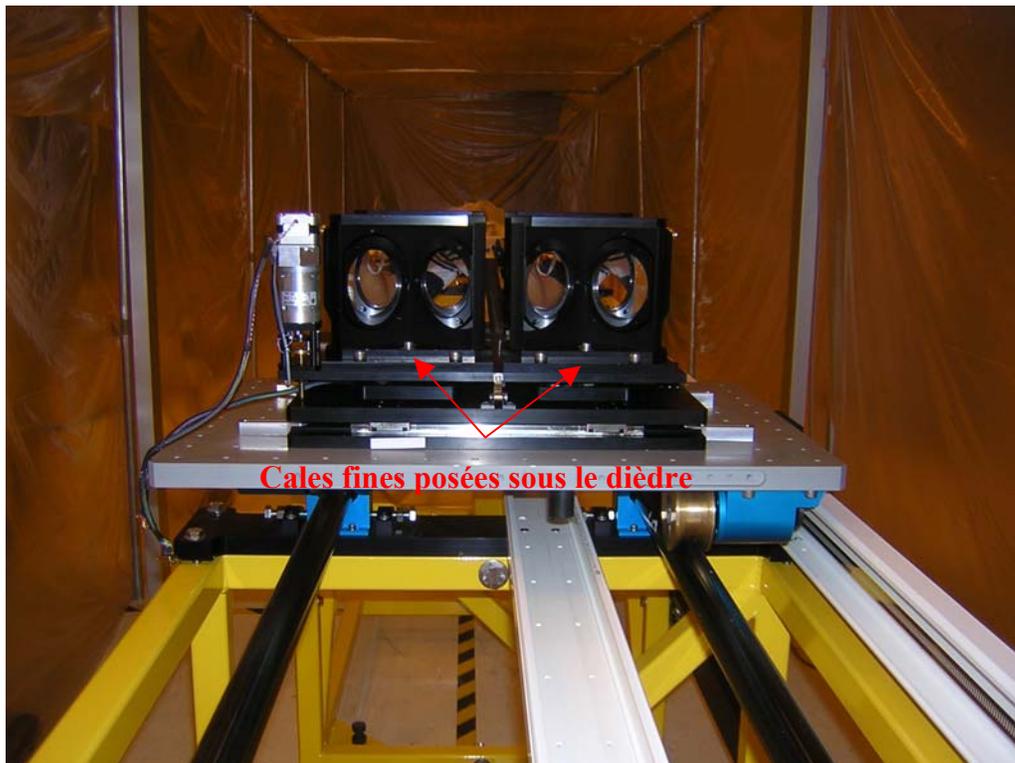


Figure 5.13 : Les 2 dièdres du chariot central coté Aerotech

Cependant, ces légères variations de positions du faisceau ne peuvent être quantifiées que si un système de détection est mis à la place de la cible, qui ne me permet qu'une visualisation à l'œil. Une caméra CCD a été achetée à cet effet. Elle fait partie du système de contrôle de la ligne à retard présenté page 45.

L'un des objectifs de la ligne à retard est d'automatiser la position des moteurs du chariot central pour différentes positions du chariot sur la ligne à retard. Ainsi, lorsque ce système sera intégré, des mesures de positions des moteurs nécessaires pour corriger le chariot central seront enregistrés dans un tableau et réalisées tous les centimètres par exemple. Ainsi, lorsque la ligne à retard sera opérationnelle dans le ciel, en déplaçant le chariot central à une position donnée, la correction à apporter par les moteurs sera faite automatiquement, grâce à l'échantillonnage en position réalisé en laboratoire.

Il reste maintenant à intégrer de chaque côté de la table Aerotech le système « fibre + parabole + miroir plan » qui est en cours de montage à l'atelier mécanique et dont j'ai participé. L'optimisation de l'injection dans la fibre via la parabole sera réalisée de la même façon que pour les modules d'injection Keck, en utilisant une lunette autocollimatrice afin d'optimiser la qualité image des parabole (voir page 33/34). Enfin, l'optimisation d'injection du système sera réalisé en ajustant le miroir plan afin d'injecter le maximum de flux dans la fibre.

Ensuite, le même travail sera réalisé de l'autre côté de la ligne à retard, sur la table Schneeberger (cf. figure 5.14). La table Schneeberger sur laquelle est positionné le dièdre permettra de faire un suivi de franges en autocollimation pour vérifier le bon fonctionnement de la ligne à retard en laboratoire.

Enfin, le test très attendu sera de quantifier la perte en sortie du système pour une injection donnée. L'objectif est d'obtenir 80% du flux en sortie de fibre lors de l'injection.

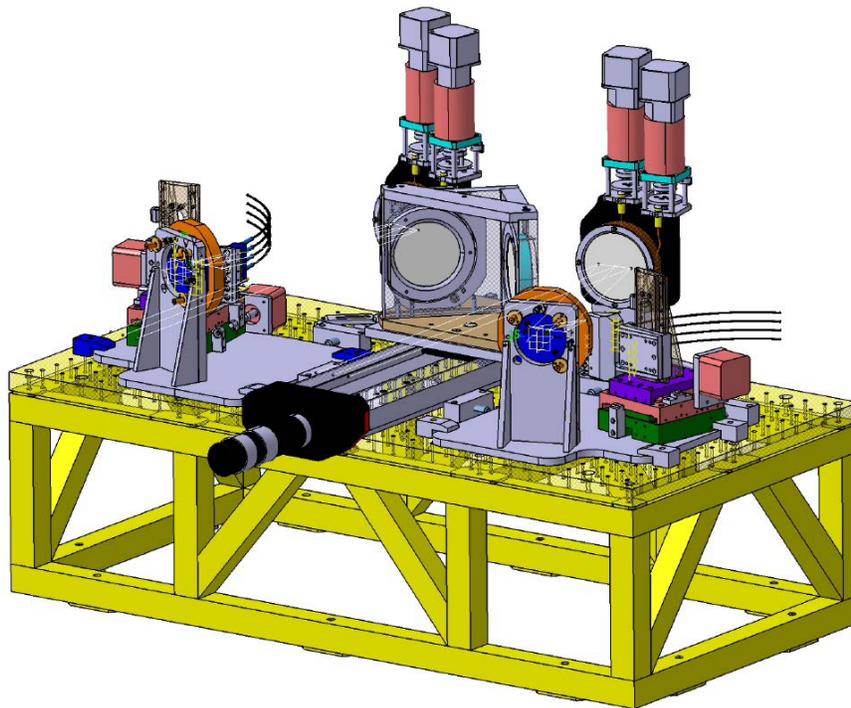


Figure 5.14 : Vue isométrique de la partie retard simulé (Table Schneeberger)

## VII. Conclusion

Le projet 'OHANA étant entré en phase II lors de mon arrivée au sein de l'équipe, il était prévu que mon sujet de travail soit l'intégration de la ligne à retard. Cependant, la proposition de l'Observatoire du Keck faite à notre équipe d'intégrer 'OHANA sur leur interféromètre a fait que le calendrier de l'expérience a été décalé et que l'intérêt de l'équipe a été focalisé pendant 2 mois sur les platines d'injection à adapter sur le Keck. C'est donc naturellement que l'on m'a proposé de travailler sur l'intégration de ces modules qui permettront à l'interféromètre Keck de gagner en sensibilité.

Ce stage m'a donc permis de travailler à plusieurs stades de la réalisation d'un instrument astronomique et j'ai pu me rendre compte de toute la complexité de ces instruments qui allient optique, mécanique, électronique et informatique.

La phase II du projet 'OHANA s'annonce en très bonne voie, comme l'a été la phase I avec des résultats prometteurs sur la ligne à retard 'OHANA. Rappelons que même si celle-ci est en cours d'intégration, les manipulations réalisées en laboratoire nous permettent de s'affirmer que ce que la ligne à retard 'OHANA n'aura rien à envier aux performances des lignes à retard Keck ou VLTI et ceux avec un budget beaucoup moins important. En effet, le coût revient pour la ligne à retard 'OHANA est estimé à 150 M€ sachant que la ligne à retard du VLTI a coûté 5 M€ !

Sur le plan personnel, je suis très heureux d'avoir effectué mon stage d'ingénieur maître en optique au sein du département de recherche spatiale de l'Observatoire de Paris. Ce stage de 5 mois m'a permis d'intégrer sans difficulté une équipe qui travaille sur ce projet depuis plusieurs années. Ce stage m'a permis de travailler en groupe tout en me responsabilisant.

Avant ce stage, mon objectif professionnel était d'intégrer à terme un groupe spécialisé dans la défense ou le spatial. Ce stage très intéressant confirme que c'est dans ce type d'applications que je désire travailler.

'OHANA va devenir l'interféromètre astronomique le plus résolvant et le plus sensible, apportant un gain d'un facteur 5 par rapport au VLTI.

Je suis donc très satisfait des responsabilités qui m'ont été confiées sur ce projet, de la confiance et de l'autonomie que mon maître de stage m'a accordé.

J'espère que mon travail aura contribué à l'avancement de ce beau projet qui ne manquera pas dans quelques années de faire parler les astronomes en leur dévoilant un peu plus les mystères de l'Univers.

## Abstract

The goal of the 'OHANA project (Optical Hawaiian Array for Nanoradian Astronomy) is to coherently link the telescopes on top of Mauna Kea with single mode infrared fibers into a very long baseline optical interferometer.

Seven telescopes are in this park of which the 2 Keck telescopes with a diameter of 10 meters and the Subaru and Gemini telescopes with a diameter of 8 meters. With a maximal baseline of 800 meters, 'OHANA will become the astronomical interferometer the most resolvable and the most sensitive, bringing an improvement of factor 5 compared with the VLTI.

The project is divided into three successive phases. Phase I is dedicated to the demonstration of an efficient injection of the adaptive optics corrected light into single mode fibers. The injection was already realized in 2002 at CFHT and Keck telescopes, and in 2003 at Gemini north telescope. Phase II aims at interferometric operation between two different telescopes on top of Mauna Kea. Phase III aims at full exploitation.

In phase II, I have contributed to the integration of the opto mechanical systems of the delay line, which is used to equalize the optical paths between the Gemini and CFH telescopes. Tests of the single mode fibers which will transport the beam of the telescopes to the delay line have been realized.

Lastly, injection in phase I being a success, The Keck Observatory proposed to our laboratory to test 'OHANA using the delay line and the beam combiner of the Keck. I have had to integrate the 2 injection modules especially adapted to the Keck environment. This module will permit to inject the light which comes from the adaptive optics of the telescopes into a single-mode fiber with a core diameter of 6.5  $\mu\text{m}$ . The new idea to use fibers rather than a lot of mirrors to transport the beams should improve the sensitivity of the Keck interferometer. First recombination of the 2 Keck telescope will take place on December 1, 2004. The Gemini- CFHT delay line will be operational by summer 2005.

## Résumé

Le but du projet 'OHANA (Optical Hawaiian Array for Nanoradian Astronomy) est de recombiner de manière cohérente les télescopes du sommet du Mauna Kea à l'aide de fibres monomodes infra – rouges pour réaliser un interféromètre optique à très longues bases.

Ce parc est composé de 7 télescopes dont les 2 télescopes Keck de 10 mètres de diamètre et les télescopes Subaru et Gemini de 8 mètres de diamètre. Avec une base maximale de 800 mètres, 'OHANA va devenir l'interféromètre astronomique le plus résolvant et le plus sensible apportant un gain d'un facteur 5 par rapport au VLTI.

Le projet est divisé en 3 phases. La phase I est dédiée à la démonstration de l'efficacité d'injection de la lumière corrigée de la turbulence atmosphérique par l'optique adaptative dans les fibres monomodes. Cette injection a déjà été réalisée en 2002 sur les télescopes CFHT et Keck et en 2003 sur le télescope Gemini. La phase II a pour objectif de réaliser l'interférométrie avec 2 télescopes du sommet du Mauna Kea. La phase III a pour but l'exploitation complète de tous les télescopes.

Dans la phase II, j'ai participé à l'intégration des systèmes opto - mécaniques de la ligne à retard qui permettra d'égaliser la longueur des chemins optique entre les télescopes Gemini et CFHT. Des tests sur les fibres optiques monomodes en bande K qui transporteront le faisceau des télescopes jusqu'à la ligne à retard ont aussi été effectués.

Enfin, l'injection en phase I étant une réussite, l'Observatoire Keck a proposé à notre laboratoire de tester 'OHANA en utilisant ses propres ligne à retard et laboratoire de recombinaison. J'ai donc intégré les 2 modules d'injection spécialement adaptés à l'environnement Keck. Ces modules permettront d'injecter les faisceaux provenant du foyer de l'optique adaptative des télescopes dans des fibres monomodes de 6.5  $\mu\text{m}$  de diamètre de cœur. L'idée novatrice d'utiliser des fibres pour transporter les faisceaux devrait permettre à l'interféromètre Keck de gagner en sensibilité. La première recombinaison des 2 télescope Keck aura lieu le 1<sup>er</sup> décembre 2004. La ligne à retard Gemini- CFHT sera opérationnelle à l'été 2005.