

Rapport de stage  
2.2

Observatoire de Meudon  
LESIA

Baptiste JAMMET

avril – septembre 2004

Ensemble de contrôle - commande  
des parties mobiles de la ligne à retard  
de 'OHANA







---

## Abstract

At the LESIA (Laboratoire d'Études Scientifiques et d'Instrumentation en Astrophysique), at the Paris Observatory, scientific experiment 'OHANA is in phase II. 'OHANA is the hawaiian word for family, it has been adopted as an acronym for **Optical Hawaiian Array for Nanoradian Astronomy**. The goal is to build an astronomic interferometer using monomodes optical fibers. One of the 'OHANA subset is the optical delay line, which is used to equalize the optical paths in order to observe fringes. This delay line must be piloted and automated.

We'll try, in this report, to describe the automation proceeding of the delay line with programs written with LabVIEW. Each elements of this delay line will be described, especially the checking – control. The mains VIs will be described too. Some exemples for the asked documentation will be given in annexes, within schemes and complementary pictures.

This work on checking – control and automatisation is very important for 'OHANA because observation time will be short. So it's very necessary to present a rigourous and clearly well-documented work.

## Résumé

Au sein du LESIA (Laboratoire d'Études Scientifiques et d'Instrumentation en Astrophysique), de l'Observatoire de Paris, site de Meudon, l'expérience scientifique 'OHANA entre en phase 2. 'OHANA est le mot hawaïen pour famille, il a été choisi comme acronyme de **O**ptical **H**awaiian **A**rray for **N**anoradian **A**stronomy. Il s'agit de construire un interféromètre astronomique en injectant le signal dans une fibre optique.

Un des sous-ensemble de 'OHANA est la ligne à retard optique (LAR) qui permet d'égaliser la longueur des chemins optique pour obtenir de franges d'interférence. Cette ligne à retard doit être pilotable à distance et, à fortiori, automatisée.

Nous nous appliquons, dans ce rapport de stage, à décrire la procédure d'automatisation de la ligne à retard par des programmes écrits sous LabVIEW. Chaque éléments de la ligne à retard y sera décrit en insistant sur la vision du contrôle – commande. Les principaux VIs y seront aussi décrits. Des exemples de la documentation à fournir seront présentés en annexe, ainsi que des schémas et images complémentaires.

Ce travail de contrôle - commande et d'automatisation est très important pour le projet 'OHANA car les durées d'observation seront courtes. Il est donc nécessaire de présenter un travail rigoureux et clairement documenté.



## Remerciements

Je tiens à remercier très particulièrement Pierre Fedou, mon responsable de stage, pour m'avoir encadré et guidé tout au long de ce stage.

J'adresse mes plus vifs remerciement à :

- ✓ Guy Perrin, astronome et Principal Investigator du projet 'OHANA ,
- ✓ Jean Guerin, coordinateur du projet,
- ✓ Et toute l'équipe de 'OHANA,

pour leur accueil, leur aide et leur sympathie durant la période de notre travail commun.

Je remercie aussi tout le personnel de l'Observatoire de Meudon, et plus particulièrement le LESIA, pour leur soutien, leur sympathie et tous les bons moment qui ont ponctué ce stage.



# Tables des matières

Abstract.....	4
Résumé.....	5
Remerciements.....	7
Tables des matières.....	9
Introduction.....	11
Présentation du stage.....	13
Chapitre 1 – L'Observatoire.....	15
1. L'Observatoire de Meudon.....	15
2. Le LESIA.....	16
Chapitre 2 - 'OHANA .....	19
1. Présentation de 'OHANA .....	20
2. Principe de fonctionnement.....	24
3. La ligne à retard (LAR).....	25
3.1. La table à retard simulé (TRS).....	26
3.2. La table à retard continu (TRC).....	27
3.3. Le chariot central (CC).....	28
Chapitre 3 - Le contrôle - commande.....	29
1. Présentation.....	29
2. Cahier des charges.....	30
2.1. Architecture du contrôle – commande de la ligne à retard.....	30
3. Les moteurs pas-à-pas des miroirs d'alignement.....	31
3.1. Fonctionnement des moteurs pas-à-pas.....	31
3.2. Principe de fonctionnement de LAR Motor.vi.....	32
4. Le chariot Aerotech.....	35
4.1. Présentation du matériel Aerotech.....	35
4.2. Le logiciel U500 MMI.....	35
4.3. Les drivers LabVIEW.....	36
4.4. Principe de fonctionnement de LAR TRC Aerotech.vi.....	36
5. La connection DataSocket.....	39
5.1. Le principe de client/serveur.....	39
6. La documentation des VIs.....	40
6.1. L'aide en ligne.....	40
6.2. Le rapport d'exécution.....	40
7. Le chariot central.....	41
7.1. Le MeterDrive.....	42
7.2. Le moteur à courant continu du chariot à retard fixe.....	43
8. Et ensuite .....	43
Conclusion.....	45
Annexes.....	47
1. La ligne à retard en cours de fabrication.....	48
2. Structure de la ligne à retard.....	49
3. Structure de la table à retard continu (TRC).....	50
4. Platine d'injection.....	51
5. Architecture de contrôle de l'ensemble 'OHANA .....	52

***Tables des matières***

---

6. Hiérarchie de LAR Main OS.vi.....	53
7. Note sur les VIs Appeler une fonction d'une DLL.....	54
8. Cahier des charges du chariot Aerotech.....	55
9. Exemple d'aide en ligne LabVIEW.....	56
10. Exemple de rapport d'exécution.....	57
11. Exemple de documentation réalisée.....	60
12. Les différentes bases du projet 'OHANA au Mauna Kéa.....	63
Lexique.....	65
Bibliographie – sources internet.....	67

## Introduction

L'observation astronomique terrestre atteint lentement ses limites techniques. La taille du plus grand miroir primaire d'un télescope est aujourd'hui de dix mètres de diamètre. Les essais convaincants de l'interférométrie astronomique au Keck (Hawaï) et au VLTI (Chili) poussent les astrophysiciens à s'orienter vers cette voie.

Cependant, la base d'un interféromètre est limitée car la propagation du signal lumineux dans l'air entraîne des pertes. Pour cela, certains astrophysiciens ont imaginé de faire se propager le signal dans des fibres optiques.

Le projet FLUOR, puis Grand FLUOR, utilise les fibres optiques monomodes pour le filtrage spatial et la recombinaison des faisceaux. Mais en 1993, l'échec de Grand FLUOR montre qu'il ne suffit pas d'avoir des longueurs de fibres égales dans chacun des bras de l'interféromètre pour recombinaison des faisceaux et obtenir des franges (problème de dispersion chromatique).

L'équilibrage de la dispersion est trouvé en 1994 par l'observatoire de Meudon avec la société Verre Fluoré. En avril 1996, l'article considéré comme fondateur du projet 'OHANA est publié : *Interferometric connection of large ground-based telescopes* ( J.-M. Mariotti et al.).

La naissance de ce projet s'appuie sur deux avancées technologiques importantes : l'optique adaptative et le développement des fibres optiques monomodes. La résolution attendue pour cet interféromètre est de l'ordre de la milliseconde d'arc ( $\approx 5.10^{-9}$  rad) dans le visible et proche infrarouge, ce qui est supérieur aux résolutions des interféromètres Keck et VLTI.

Le projet 'OHANA est actuellement en phase 2 et doit démontrer son efficacité tout en ne disposant que de peu de temps d'observation. Pour cela, une motorisation et une automatisation de l'instrument est cruciale.

Nous verrons donc que le sujet de ce stage de Mesures Physiques s'intègre dans une expérience ambitieuse, et que les résultats autant que les méthodes utilisées auront beaucoup d'importance.

Après une présentation du projet 'OHANA orientée vers la motorisation de la ligne à retard, nous présenterons le travail effectué. Nous conclurons sur l'usage de ce travail dans le vaste projet qu'est 'OHANA .



## Présentation du stage

L'objectif de ce stage de DUT Mesures Physiques était l'étude et la réalisation de l'ensemble de contrôle et de commande des parties mobiles de la ligne à retard. Les trois points importants de ce stage étaient :

- La commande des moteurs pas-à-pas des miroirs d'alignement,
- La documentation des VIs et la création d'un rapport d'exécution,
- La commande de la table Aerotech, du chariot central et du MeterDrive (capteur de position).

Les autres parties mobiles de la ligne à retard n'entraient pas dans le cadre du stage, soit parce qu'elles étaient déjà automatisées (table Schneeberger, platines d'injection), soit parce que leur contrôle n'était à réaliser que plus tard.

La ligne à retard, ainsi que l'ensemble de 'OHANA , doit être pilotable avec le logiciel LabVIEW, outil choisi au niveau de l'expérience dans son ensemble.

Il s'agissait donc d'écrire des programmes répondant aux deux principaux critères : mobilité et mesure de la position des parties mobiles.

Ce programme de contrôle – commande doit ensuite pouvoir s'intégrer dans l'ensemble plus vaste de pilotage de 'OHANA .



## Chapitre 1 – L'Observatoire

Ce stage de DUT Mesures Physiques a été effectué au LESIA, qui est un laboratoire de l'Observatoire de Meudon. Dans ce premier chapitre, nous présenterons l'Observatoire, de façon historique, et le laboratoire, de façon thématique.

### 1. L'Observatoire de Meudon

L'Observatoire de Meudon est installé sur un ancien domaine royal mis à la disposition de Jules Janssen en 1876 pour qu'il puisse y mener des recherches en physique astronomique. Le domaine, alors complètement en ruine, commence une nouvelle vie. Le château (*voir Illustration 1*), incendié pendant la guerre de 1870 et restauré ensuite, reçoit en 1893 la grande lunette et le télescope de 1 mètre.



Illustration 1 : Site de l'Observatoire de Meudon. Au premier plan, le château et la grande coupole. Photo Observatoire.

La grande lunette possède deux objectifs (83 cm et 62 cm) et est la première d'Europe par ses dimensions. Elle est classée monument historique depuis 1972 et fut utilisée pour l'observation des positions des astres, ainsi que pour l'étude des planètes et des comètes. Elle est actuellement inutilisée car la grande coupole qui l'abrite a subi des dommages lors de la tempête de l'hiver 1999 et est en cours de restauration.

Le télescope de 1 m sert, quand à lui, à l'observation de la Lune, des planètes, des comètes et des astéroïdes. Il possède aussi une lunette, fixée sur sa monture, et comportant un filtre polarisant sélectif pour observer le Soleil.

Deux spectrohéliographes sont installés en 1897 et 1906, puis le grand sidérostat est construit en

## Chapitre 1 – L'Observatoire

1908. La table équatoriale est mise en service en 1931 avec un télescope de 60 cm maintenant utilisé dans un but pédagogique pour les étudiants des DEA d'astronomie et d'astrophysique.

La dernière construction en date est la tour solaire, mise en service en 1969.

## 2. Le LESIA

Le LESIA, Laboratoire d'Études Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique, est un laboratoire de l'Observatoire de Paris, sur le site de Meudon. C'est une unité de mixte de recherche du CNRS (UMR 8109), associée à l'Université Paris VI Pierre et Marie Curie et à l'Université Paris VII Denis Diderot.

Il est issu du regroupement, effectif au 1er janvier 2002 :

- du DESPA (Département Recherches Spatiales),
- du DASOP (Département Solaire de l'Observatoire de Paris),
- de groupes et chercheurs : ARPEGES (Groupe Comète, ...), DAMAP, DASGAL.

Soit environ 212 à 225 personnes (chiffres au 1er février 2004) :

- 120 à 130 chercheurs, dont 72 permanents et 24 doctorants,
- 92 à 95 ITA, dont 72 permanents et 17 ingénieurs CDD.

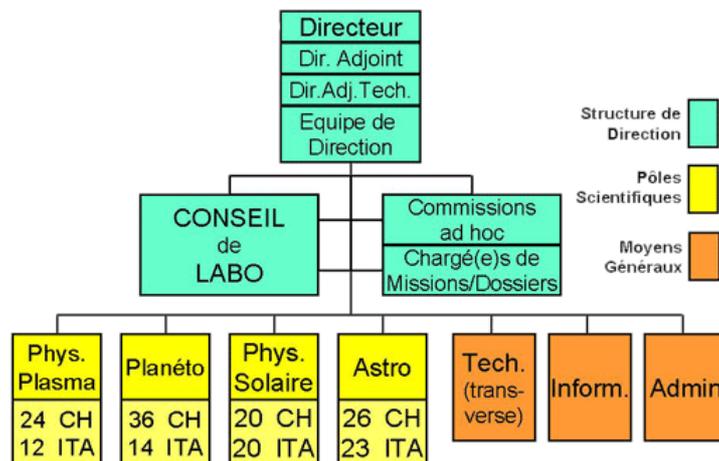


Illustration 2 : Organigramme du LESIA. Schéma Observatoire.

**Directeur** : Jean-Louis Bougeret.

**Directeurs Adjoint** : Antonella Barucci, Didier Tiphène.

**Administrateurs** : Jacqueline Thouvay, Nicolas de Kermadec.

**Responsable informatique générale** : Christian Renié.

**Coordinateurs scientifiques :**

- *Pôle Physique des plasmas* : Philippe Zarka,
- *Pôle Physique solaire* : Ludwig Klein,
- *Pôle Planétologie* : Pierre Drossart,
- *Pôle Astronomie* : Daniel Rouan.

Sa vocation première est la conception, la réalisation et le développement de l'instrumentation (au sol et spatial), ainsi que l'exploitation des observations.

Il comporte pour cela plusieurs pôles, avec chacun leurs thèmes scientifiques :

- Physique des plasmas :
  - Vent solaire et relations soleil-terre,
  - Émissions radio solaires,
  - Magnétosphères terrestre et planétaires,
  - Exoplanètes,
  - Pulsars, galaxie,
  - Théorie, modélisation, simulation numérique des plasmas astrophysiques.
  
- Planétologie :
  - Atmosphères planétaires : structure, composition,
  - Surface planétaires,
  - Astéroïdes et petits corps,
  - Atmosphères cométaires,
  - Dynamique du système solaire (théorie, observation),
  - Structure interne (théorie, observation),
  - Exoplanètes (théorie, observation).
  
- Physique solaire :
  - Magnétisme solaire, dissipation magnétique,
  - Structure de la couronne, et relations avec le milieu interplanétaire,
  - Perturbations coronales globales,
  - Milieu interplanétaire, héliosphère,
  - Relations soleil-terre (météorologie de l'environnement spatial),
  - MHD, plasmas, transfert polarisé, inversion des raies spectrales, physique atomique.
  
- Astronomie :
  - Étoiles évoluées, post AGB,
  - Noyaux actifs de galaxies,
  - Milieu interstellaire,
  - Systèmes planétaires,
  - Astérosismologie.

## *Chapitre 1 – L'Observatoire*

---

Le LESIA est particulièrement spécialisé dans l'optique adaptative (dont les tip-tilts) et l'interférométrie à fibres. En ce sens, la haute résolution angulaire (HRA) est l'une des priorités actuelle et, comme nous allons le voir, le projet 'OHANA regroupe ces trois domaines de l'optique astronomique.

## Chapitre 2 - 'OHANA

Le projet 'OHANA , qui s'inscrit dans la lignée HRA, est en phase 2. Nous verrons dans ce chapitre ce qu'est le projet 'OHANA ainsi que son principe de fonctionnement, pour terminer sur la ligne à retard, sous-ensemble qu'il fallait automatiser.

**Remarque** : Nous respecterons ici les conventions de vocabulaire utilisées en astronomie :

- Le terme "Optique" désigne les longueurs d'onde du rayonnement électromagnétique dans le domaine du visible qui s'étend du proche infrarouge ( $\approx 800$  nm) à l'ultraviolet ( $\approx 400$  nm).
- L'unité d'angle couramment utilisée est la seconde d'arc :

$$1 \text{ arcsec} \approx 4,85 \cdot 10^{-6} \text{ rad} = 4,85 \text{ } \mu\text{rad}$$

et son sous-multiple, la milliseconde d'arc :

$$1 \text{ mas} = 10^{-3} \text{ arcsec} \approx 4,85 \cdot 10^{-9} \text{ rad} = 4,85 \text{ nanoradian}$$

- 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 (voir *Illustration 3*).

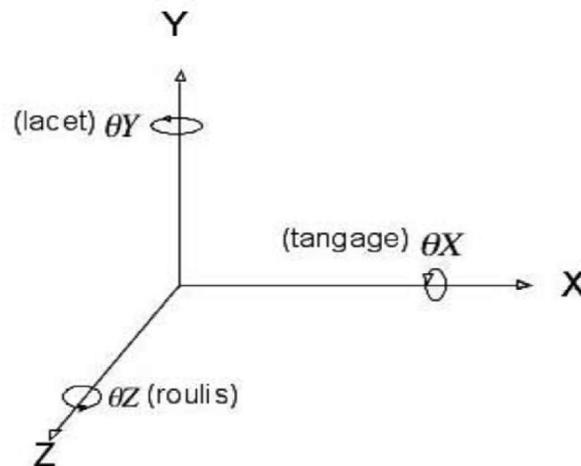


Illustration 3 : Convention d'orientation des axes. L'axe Z pointe dans la direction de propagation du faisceau.

## Chapitre 2 - 'OHANA

### 1. Présentation de 'OHANA

'OHANA signifie "famille" en hawaïen. C'est aussi l'acronyme de "Optical Hawaiian Array for Nanoradian Astronomy" (1 nanoradian =  $10^{-9}$  rad  $\approx 5,7.10^{-8}$  degrés).

Le principe d'OHANA est de construire un interféromètre large base reliant des télescopes déjà existants au sommet du Mauna Kéa, à Hawaï (voir *Illustration 4*). À terme, l'objectif est de faire un réseau reliant six télescopes du Mauna Kéa à Hawaï : Keck I, Keck II, CFHT, UKIRT, Subaru et Gemini (voir *Illustration 6*).

Cette technique s'inscrit dans la lignée HRA (**H**aute **R**ésolution **A**ngulaire) qui consiste à regarder le plus loin possible dans l'univers. On peut alors accéder à la physique extra galactique et à la physique stellaire du noyau des galaxies.

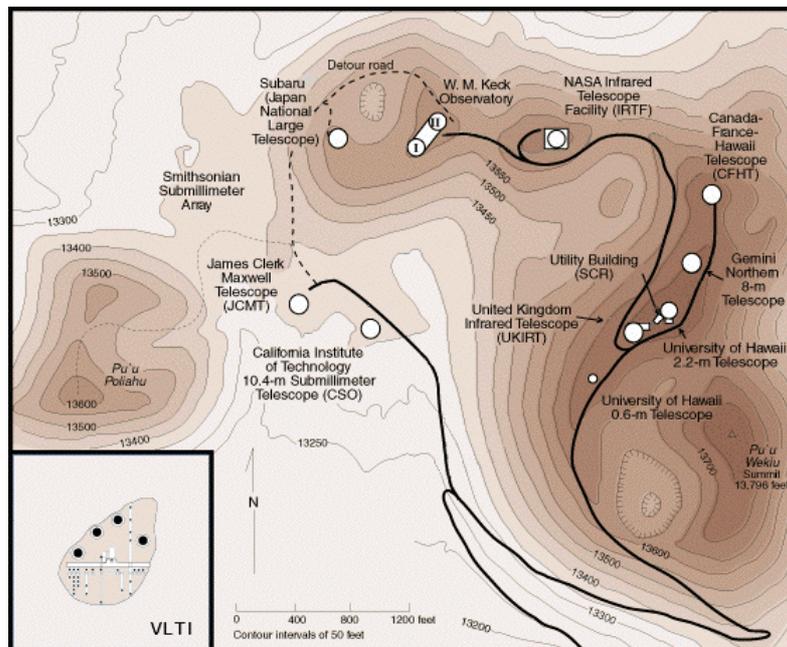


Illustration 4 : Site du Mauna Kéa, à Hawaï. En encart, le site du VLT I à la même échelle, au Cerro Paranal

En effet, la finesse des détails d'une image astronomique est caractérisée par la résolution angulaire du système optique utilisé pour l'obtenir. Plus la résolution angulaire est importante et plus l'on voit des structures fines dans l'image (notion de netteté). La résolution maximale des systèmes optiques est proportionnelle à leur taille et, pour un télescope, elle est inversement proportionnelle au diamètre du miroir primaire.

*Résolution angulaire  $R$  d'un télescope*

$$R = \frac{\lambda}{D} \approx 45 \text{ mas}$$

*Diamètre du miroir primaire  $D = 10 \text{ m}$*

*Longueur d'onde d'observation  $\lambda = 2,2 \mu\text{m}$*

Pour dépasser cette limite, on peut faire interférer de manière cohérente les faisceaux collectés par plusieurs télescopes sur un même objet astronomique. La résolution n'est alors plus donnée par la taille des télescopes mais par la distance qui les sépare. Ainsi, deux télescopes distants de 100 m conduiront à une résolution équivalente à celle d'un télescope unique de 100 m de diamètre.

*Résolution angulaire  $R'$  d'un interféromètre*

$$R' = \frac{\lambda}{B} \approx 3 \text{ mas}$$

*Base (distance entre les deux télescopes)  $B = 150 \text{ m}$*

*Longueur d'onde  $\lambda = 2,2 \mu\text{m}$*

Précisons que l'interférométrie, avec seulement deux télescopes, ne permet pas d'obtenir une image, mais seulement une figure de franges d'interférences. Cependant, le contraste des franges (la visibilité  $V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$ ) permet de déterminer la taille de l'objet observé à la longueur d'onde utilisée.

En effet, en utilisant plusieurs bases, on obtient plusieurs mesures de visibilité, ce qui permet de déterminer une contrainte forte sur la courbe de la visibilité et donc la répartition spatiale (la taille) de la source (voir *Illustration 5*). La connaissance du diamètre des étoiles permet ensuite de déterminer leur température et, a fortiori, leur structure, selon les longueurs d'ondes d'observation.

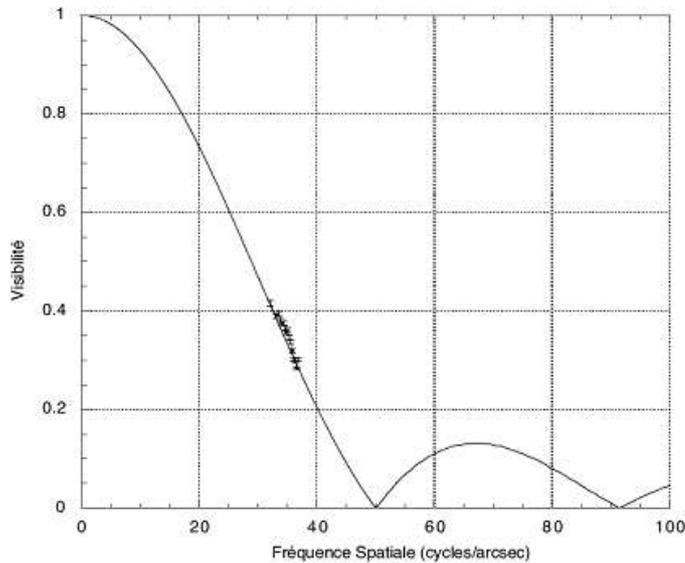


Illustration 5 : Courbe de visibilité en fonction des fréquences spatiales. Pour un disque, le premier zéro est à  $1,22/d$  (diamètre de la source).

L'interférométrie en astronomie existe déjà (par exemple, le VLTI, pour Very Large Telescope Interferometer au Chili, ou l'interféromètre de Keck 1 – Keck 2 à Hawaï).

Cependant, dans le cas de 'OHANA , le faisceau venu du ciel est injecté dans une fibre optique monomode, pour s'affranchir des pertes survenues lors de la propagation du signal dans l'air et ainsi augmenter encore la taille de la base. Les interféromètres existants arrivent à leurs limites car la propagation du signal (faible car on regarde loin) dans l'air entraîne de nombreuses pertes.

De plus, on a vu que 'OHANA doit pouvoir s'intégrer sur des télescopes existants, qui n'ont pas été construits spécialement pour l'interférométrie (contrairement au VLTI et aux deux Keck).

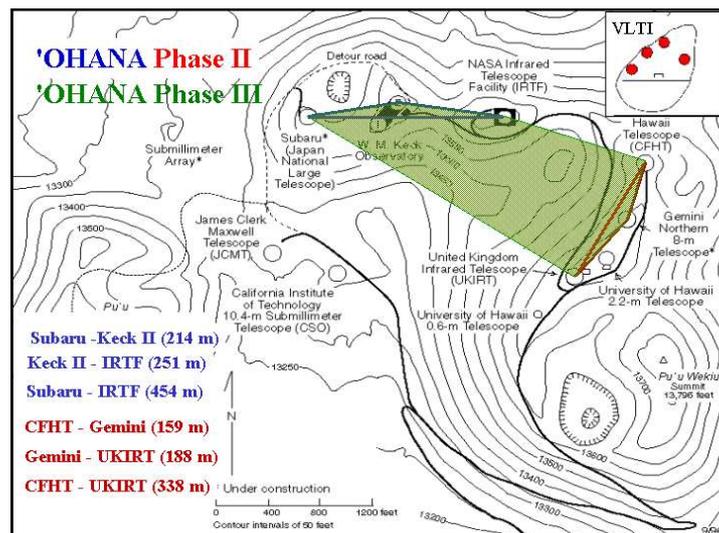


Illustration 6 : Projet du réseau 'OHANA au sommet du Mauna Kéa à Hawaï. Ce projet date d'avril 1995 et est issu de l'article de Mariotti et al. : Interferometric connection of large ground-based telescopes.

Le projet 'OHANA se déroule sur 8 ans et est organisé en trois phases :

- Phase 1 : • Conception et réalisation des platines d'injection (pour injecter le signal dans les 2000 fibres monomodes).  
 ↓  
 2003 • Tests sur les télescopes du Mauna Kéa à Hawaï.  
 • Mesure du taux d'efficacité et de la stabilité des images vis-à-vis des différentes optiques adaptatives.  
 • Étude de la polarisation.
- Phase 2 : • Validation expérimentale : obtention de franges sur une des plus petite base (Gemini – CFHT).  
 ↓  
 2004 • Démonstration de l'intérêt scientifique.  
 2006 • Cela implique la construction d'une ligne à retard et permettra, grâce à la démonstration scientifique et technique, l'obtention du financement pour le réseau entier.
- Phase 3 : • Observations et mise en place du réseau complet.  
 2006  
 ↓  
 2007

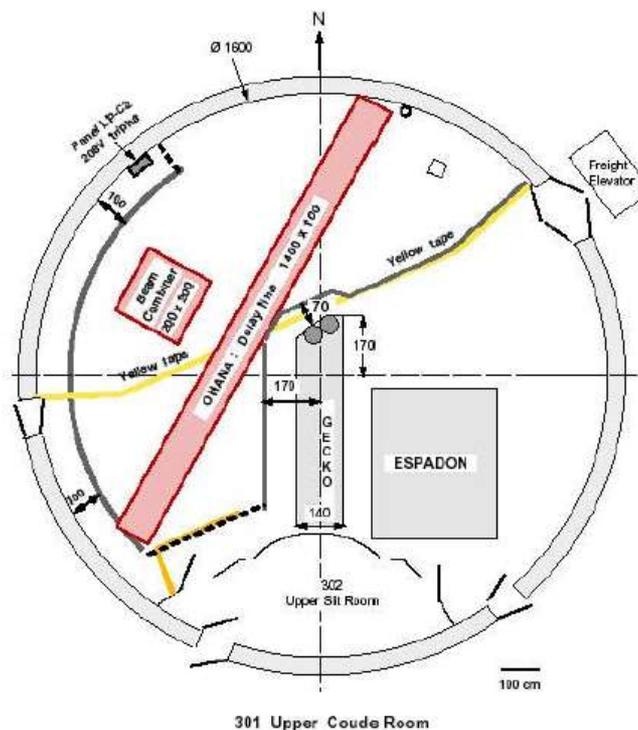


Illustration 7 : Implantation de la ligne à retard dans la salle coude du CFHT. Schéma 'OHANA.

## 2. Principe de fonctionnement

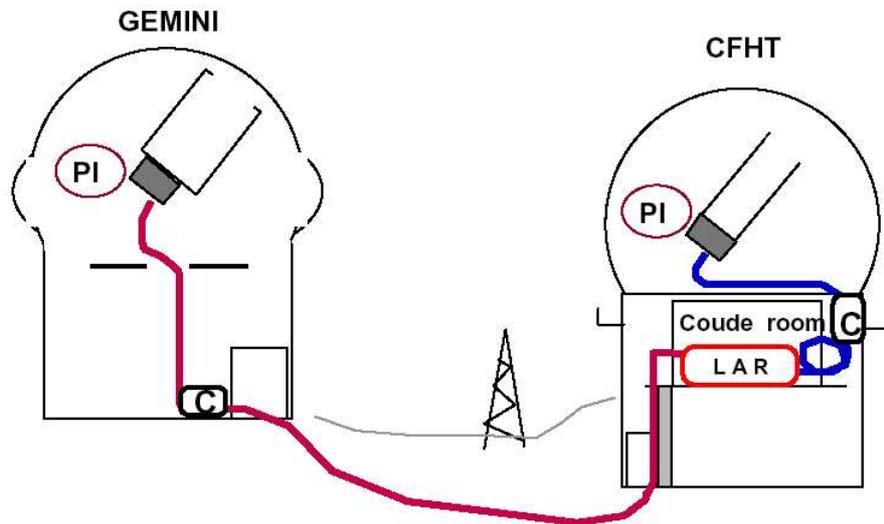


Illustration 8 : Schéma d'utilisation d'OHANA sur les télescopes Gemini et CFHT à Hawaï. Schéma 'OHANA.

Aux foyers des télescopes, le signal venu du ciel est injecté dans les fibres optiques par l'intermédiaire des platines d'injection (PI, voir Annexe 4).

Une ligne à retard optique (LAR) permet ensuite d'égaliser la longueur des chemins optiques avant la recombinaison des faisceaux. Ceci est particulièrement délicat car 'OHANA est monté sur des télescopes différents, qui ont donc une optique adaptative différente, une construction interne différente, etc. Tout ces facteurs augmentent donc l'incertitude sur les chemins optiques et le déphasage entre les faisceaux.

La recombinaison permet enfin de créer des franges d'interférence en recombinaison les deux faisceaux en un seul.

### 3. La ligne à retard (LAR)

La ligne à retard comporte principalement trois parties (*voir Illustration 9*):

- Une table à retard simulé (TRS),
- Une table à retard continu (TRC),
- Un chariot central (CC).

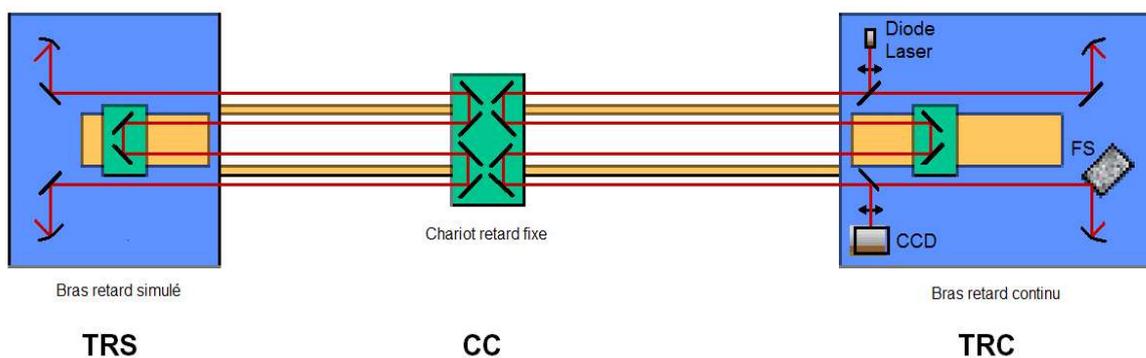


Illustration 9 : Schéma de la ligne à retard avec ses trois sous-ensembles : la table à retard simulé (TRS), le chariot central (CC) et la table à retard continu (TRC).

Sa fonction principale est d'égaliser la longueur des chemins optiques dans chacun des deux bras de l'interféromètre pour obtenir une différence de marche nulle et ainsi observer des franges d'interférence. Pour cela, la position des différents chariots doit être connue à une fraction de longueur d'onde près.

La ligne à retard doit aussi permettre de suivre le paquet de franges grâce à un retard continu (rôle de la table à retard continu TRC), l'objet astronomique observé étant en mouvement apparent du fait de la rotation de la Terre.

Chacun des éléments de la ligne à retard supporte un ensemble d'optiques mobiles, qu'il faut pouvoir commander à distance, puis automatiser ces commandes pour optimiser le temps de réglage (alignement et égalisation des chemins optiques).

L'objectif du stage étant la réalisation des commandes, l'importance sera donc donnée aux éléments mobiles et à leurs caractéristiques plutôt qu'à l'optique, tout en sachant que la mobilité de la ligne à retard est à son service. (*voir la liste des moteurs en Annexe 11*)

### 3.1. La table à retard simulé (TRS)

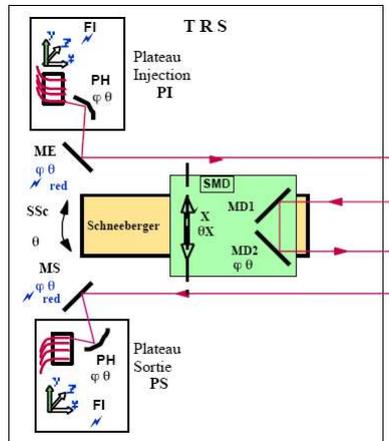


Illustration 10 : Schéma de la table à retard simulé (TRS) avec ses composants.

La table à retard simulé supporte le chariot Schneeberger dont la fonction est de simuler un retard variable (c'est à dire un déplacement des franges) en mode d'auto-collimation. Cela permet de valider les procédures de recherche de franges en laboratoire et de vérifier, lors de l'observation, le bon fonctionnement de la ligne à retard indépendamment du reste de l'interféromètre. Concrètement, ceci correspond au cas où on ne trouve pas les franges lors de l'observation. Une recherche en mode d'auto-collimation permet alors de savoir si la ligne à retard est mal réglée ou si le problème vient d'ailleurs (fibres optiques, télescopes, etc.).

Le signal arrive sur la table à retard simulé par la platine d'injection (PI) et effectue deux aller/retour dans la ligne à retard avant de sortir par le plateau de sortie (PS) pour être dirigé vers le recombineur.

L'alignement motorisé doit donc être fait à plusieurs endroits :

- sur la platine d'injection **PI**,
- sur les miroirs d'entrée **ME** et de sortie **MS** de la ligne à retard,
- sur la platine de sortie **PS**.

### 3.2. La table à retard continu (TRC)

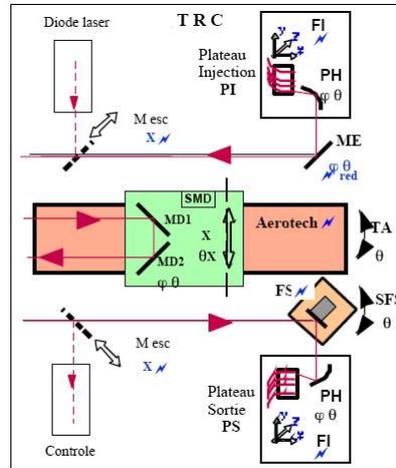


Illustration 11 : Schéma de la table à retard continu (TRC) avec ses composants.

La table à retard continu supporte le chariot Aerotech, chariot de translation permettant de suivre les franges lors de l'observation. Ce chariot doit être d'une grande précision de position et de vitesse. Lors de l'observation, le chariot Aerotech "suit" les franges. Une commande de vitesse lui est envoyée à chaque instant, en fonction des observations faites. Il doit donc pouvoir répondre rapidement à chaque nouvelle commande.

Le signal arrive sur la table à retard continu par la platine d'injection (PI) et effectue plusieurs aller/retour dans la ligne à retard avant de sortir par le plateau de sortie (PS) pour être dirigé vers le recombineur.

L'alignement motorisé doit donc être fait de la même façon que sur la TRS :

- sur la platine d'injection **PI**,
- sur le miroir d'entrée **ME** de la ligne à retard,
- sur la platine de sortie **PS**.

Le miroir de sortie est ici un ensemble indépendant, le FastScan (**FS**), qui fait varier la différence de marche continuellement et régulièrement autour de la différence de marche nulle d'une centaine de micromètres ( $\approx 100 \mu\text{m}$ ). Il balaie ainsi l'image autour de la différence de marche nulle pour visualiser les franges.

Enfin, un système d'alignement par un faisceau laser ajoute deux miroirs escamotables **Mesc**.

### 3.3. Le chariot central (CC)

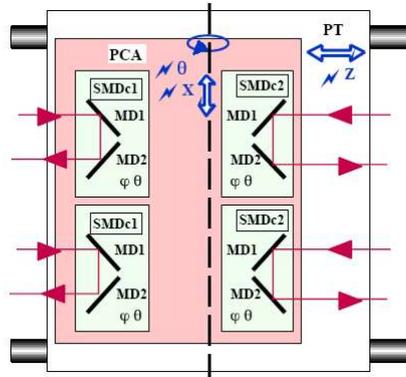


Illustration 12 : Schéma du chariot central (CC) avec ses composants.

Le chariot central est posé sur des rails d'une longueur de 12 mètres entre les deux tables TRS et TRC. Les faisceaux effectuent chacun 2 aller/retour (4 fois le trajet dans chacun des deux bras), il peut donc générer un retard fixe pouvant aller jusqu'à 48 mètres. Il permet ainsi une recherche rapide des franges pour trouver la position où la différence de marche entre les faisceaux est nulle.

L'alignement sur le chariot central se fait en translation selon  $X$ , et en rotation selon  $\theta X$  (tangage) pour corriger l'altitude des faisceaux.

Le chariot central est aussi motorisé pour le déplacement sur les rails. Le choix a été porté sur un moteur à courant continu et l'entraînement est à courroie.

Enfin, ce chariot possède un capteur de position à ruban d'une précision de 100  $\mu\text{m}$  (MeterDrive), soit une précision de 400  $\mu\text{m}$  sur la différence de marche, dont il faudra lire l'information pour corriger la position du chariot.

## Chapitre 3 - Le contrôle - commande

Ce chapitre a pour objectif d'expliciter le travail effectué au cours du stage. Nous verrons donc les contraintes imposées, puis le fonctionnement des différents moteurs (moteur pas-à-pas et chariot Aerotech). Nous aborderons ensuite l'explication des VIs de commande des moteurs d'alignement et de leur documentation. Une partie de ce chapitre sera consacrée à l'étude du chariot Aerotech et nous terminerons sur l'approche du chariot central.

### 1. Présentation

L'objectif du stage était, comme nous l'avons vu, l'étude et la réalisation de l'ensemble de contrôle et de commande des parties mobiles de la ligne à retard. Ce travail se déroulait en trois parties : commande des moteurs pas-à-pas, documentation des VIs et rapport d'exécution, et enfin pilotage de la table Aerotech.

Cette ligne à retard (ainsi que l'ensemble de 'OHANA) doit être pilotable par LabVIEW (de National Instrument). Ce logiciel, qui est un choix collectif pour le pilotage d'OHANA, permet d'écrire des programmes sous formes de modules, ce qui est nécessaire dans le projet 'OHANA car nous avons vu que son but est de s'intégrer dans différents environnements le plus facilement possible.

Enfin, le programme de contrôle – commande de la ligne à retard doit pouvoir s'intégrer dans l'ensemble de pilotage et de contrôle de toute l'expérience 'OHANA (injection et recombinaison).

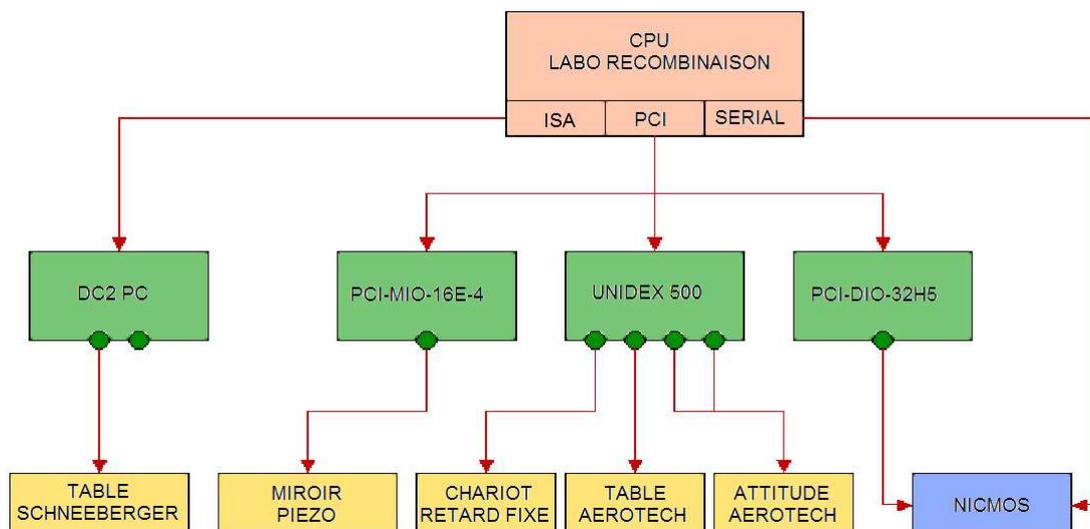


Illustration 13 : Architecture de contrôle de la ligne à retard. Récapitulatif des différentes liaisons. Schéma 'OHANA .

## Chapitre 3 - Le contrôle - commande

### 2. Cahier des charges

On a vu qu'il fallait réaliser l'ensemble de contrôle et de commande de cette ligne à retard en écrivant des programmes sous LabVIEW.

Les différentes contraintes étaient :

- Des programmes écrits sous forme de modules pour en faciliter l'utilisation et la compréhension,
- Une structure-type des VIs de haut niveau : Ouverture – Commande(s) et Lecture – Fermeture,
- Une documentation claire et facile d'accès pour ces programmes (VIs) et leurs sous-programmes (sous-VIs) (*voir exemple en Annexe 9*),
- La création et l'enregistrement d'un rapport d'exécution contenant toutes les actions effectuées (*voir exemple en Annexe 10*).

Le choix a été porté sur une documentation au format standard HTML, accessible depuis l'aide en ligne de LabVIEW, et similaire à celle-ci. Le choix du format pour le rapport d'exécution a été le même après la mise en évidence de ses avantages (standard, facilité de lecture et de modification).

De plus, ces commandes devaient s'appliquer aux différents moteurs, selon leur type et leur utilisation :

- Les moteurs pas-à-pas montés sur les miroirs pour l'alignement,
- Le moteur du chariot de translation Aerotech,
- Le moteur à courant continu du chariot central.

Une lecture de l'information du capteur MeterDrive, synchronisée avec la commande du chariot central, était aussi nécessaire.

#### 2.1. Architecture du contrôle – commande de la ligne à retard

Actuellement, la structure des VIs de commande de la LAR est définie comme suit :

LAR Main OS.vi					
LAR TRS.vi		LAR CC.vi		LAR TRC.vi	
LAR TRS Schneeberger	LAR TRS Motor	LAR CC Chariot	LAR CC Motor	LAR TRC Aerotech	LAR TRC Motor

On pourra noter qu'il reste encore à inclure la génération du rapport d'exécution et la gestion des configurations. En effet, le meilleur moyen de les utiliser n'a pas encore été trouvé (un seul VI de 2<sup>ème</sup> niveau ou plusieurs VIs de bas niveau utilisés plusieurs fois ?).

**Note** : La version actuelle du VI **LAR Main OS.vi** (1.2) utilise plusieurs appels des VIs de génération de rapport et de chargements des configurations.

Nous allons maintenant décrire les différents VIs de commandes présentés ci-dessus. Chacun des trois sous-ensemble de la LAR possède son propre VI de contrôle. Cela permet plus de souplesse au niveau de l'utilisation, notamment lors des tests, pour ne tester qu'un seul sous-ensemble.

### 3. Les moteurs pas-à-pas des miroirs d'alignement

La première étape du développement était l'écriture des VIs de commande des moteurs pas-à-pas. Ces moteurs sont commandés par l'intermédiaire d'un micro-contrôleur branché sur le port série RS-232 de l'ordinateur de contrôle. L'électronique de commande est enfermée dans un rack électronique moteur (REM) et permet le contrôle de six moteurs par un seul port série. Chaque rack contient trois contrôleurs.

Cette électronique de commande a été fabriquée sur place.

#### 3.1. Fonctionnement des moteurs pas-à-pas

La communication avec les moteurs pas-à-pas des miroirs d'alignement se fait via le port série RS-232 de l'ordinateur de commande. Les commandes sont envoyées sous formes de chaînes de caractères ASCII, et les réponses sont de même nature.

La documentation des moteurs pas-à-pas était disponible mais à mettre à jour. On y trouvera liste de toutes les commandes, mais nous récapitulons ici les principales :

- **SEL  $x$**  : sélection du moteur  $x$ ,
- **INIT** : initialisation du moteur sélectionné,
- **MVT  $x$**  : mouvement de  $x$  micropas,
- **STOP** : arrêt du moteur sélectionné,
- **?POS** : demande de la position actuelle du moteur sélectionné,
- **?ST** : lecture de l'état du moteur sélectionné en zone mémoire XRAM (mémoire "vive"),
- **?ETAT** : lecture de l'état du moteur sélectionné en zone mémoire EEPROM (mémoire "morte"),
- **??** : demande de la dernière action effectuée,
- **?INFO** : lecture des paramètres de tous les moteurs branchés sur le port,
- **TAB** : réinitialisation des paramètres de tous les moteurs branchés sur le contrôleur à leur valeur par défaut.

### Chapitre 3 - Le contrôle - commande

Ce sont principalement ces commandes qui seront utilisées pour l'alignement, et donc dans les VIs de commande.

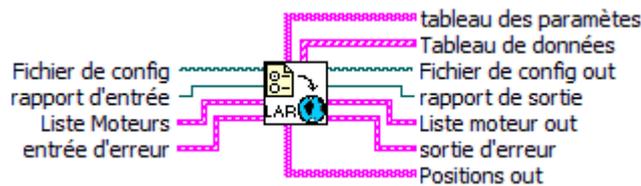
### 3.2. Principe de fonctionnement de *LAR Motor.vi*

Ce type de moteur ayant déjà été utilisé pour l'alignement des platines d'injection, certains modules de bas niveau des VIs de commande des platines ont pu être réutilisés (**MotorOpen**, **MotorClose**, **MotorQuery**,... ). D'autres ont dû être intégralement écrits. Il a aussi fallu établir la liste de tous les moteurs concernés par ces commandes d'après les différentes documentations (voir la *liste des moteurs en Annexe 11*).

Le fonctionnement des trois VIs de commandes des moteurs d'alignement est identique (**LAR TRS Motor**, **LAR CC Motor** et **LAR TRC Motor**). Seul le nombre de moteurs utilisés change.

Ces VIs fonctionnent, comme on l'a vu, de la façon suivante : Ouverture - Commande(s) et lecture – Fermeture. La séquence de commande/lecture est enfermée dans une boucle pour permettre un nombre d'actions indéfinis (jusqu'à l'arrêt volontaire par l'utilisateur ou l'apparition d'une erreur).

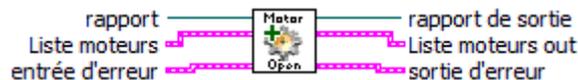
#### LAR LoadConfig



La première étape consiste à charger les données du fichier de configuration dans la variable globale utilisée. Le fichier de configuration est un fichier texte : C:\OHANA\LAR\Config\Motorsous-ensemble.txt.

Ce VI gère aussi la répartition des différents paramètres entre les différentes variable globales.

#### LAR MotorOpen



L'étape suivante est l'ouverture des moteurs. Elle correspond à l'initialisation des ports série en fonction des paramètres des moteurs chargés précédemment (nombre de moteur, adresse du/des port(s), position de référence des différents moteurs, etc.). Ce VI ouvre aussi la session VISA utilisée pour la communication par liaison série.

**Remarque** : La session VISA ouverte par LabVIEW est une session exclusive (aucune autre information ne peut transiter sur le port). On veillera donc à ce que la fermeture (voir **LAR**

MotorClose) soit effectuée correctement.

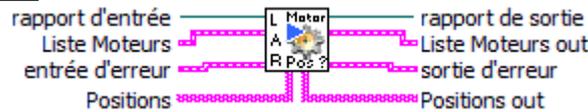
LAR SendConfig



Une fois la communication établie, ce VI envoie les données nécessaires aux moteurs (Vmin, Vmax, OFFSET,...).

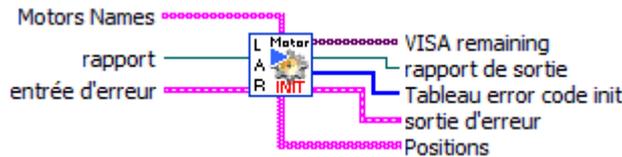
Il n'est pas nécessaire d'effectuer cette action à chaque fois car elle est longue et les données sont enregistrée en zone de mémoire EEPROM du contrôleur.

LAR Motor Ask Positions



Ce VI interroge tous les moteurs présents par la commande ?POS pour enregistrer leurs positions courantes dans les variables globales.

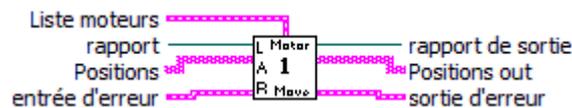
LAR Init Multi Motor



Le choix peut être fait, en face avant, d'initialiser les moteurs. Cela correspond à la recherche du fin de course puis au positionnement à la position zéro, décalé du fin de course home (-) d'un **OFFSET**.

Cette étape n'est pas effectuée à chaque fois mais permet, après le transport et le démontage de la ligne à retard, de retrouver rapidement les positions exactes des miroirs.

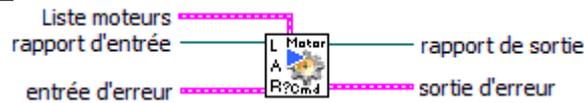
LAR MotorMove



Ce VI ouvre une face avant pour permettre à l'utilisateur de déplacer un moteur. Le moteur à déplacer se choisit dans une liste et la longueur de déplacement est à définir.

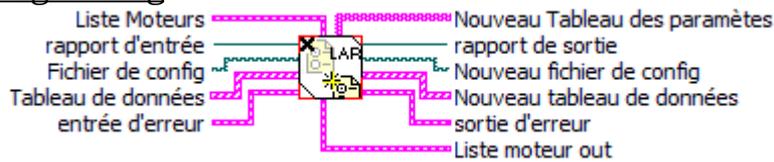
Chapitre 3 - Le contrôle - commande

LAR CommandeMoteur



Ce VI sert à envoyer une commande quelconque à un des moteurs. La face avant ouverte permet de choisir le moteur, la commande et, si besoin, le paramètre associé à cette commande.

LAR ManualChangeConfig



Ce VI permet de changer la configuration et d'en enregistrer une nouvelle, soit dans un autre fichier de config, soit d'écraser celui existant.

**ATTENTION** : La nouvelle configuration n'est pas envoyée au moteur ni aux variables globales.

LAR Motor Free et LAR MotorClose



À la fin de la manipulation, il faut libérer les moteurs et fermer la session VISA. La libération correspond à la sélection du moteur 0 (zéro) sur chaque rack électronique. Ceci a pour effet l'annulation du courant de maintien dans le moteur. La fermeture de la session VISA arrête la communication entre le moteur et le contrôleur.

Tout ces VIs appellent d'autres sous-VIs de bas niveau, notamment pour la communication avec le rack électronique (voir les documentations respectives de chaque VI). Mais ceux ci sont les fonctions de base qui pourront être réorganisé sans en changer le fonctionnement interne, si le besoin se fait sentir.

## 4. Le chariot Aerotech

Après la réalisation des VIs de commande des moteurs pas-à-pas, l'étape suivante était la commande du chariot Aerotech. Le contrôle de cette table se fait via plusieurs cartes d'interface et ces dernières devraient permettre de commander aussi le chariot central. Ces commandes sont toujours à réaliser avec LabVIEW mais nous allons voir qu'un logiciel d'interface peut faciliter la prise en main de la communication avec cette table.

### 4.1. Présentation du matériel Aerotech

Le chariot de translation Aerotech a été acheté pour répondre au cahier des charges (voir *Annexe 8*). Il comporte un CD-Rom de logiciels, deux cartes électroniques d'interface entre l'ordinateur de commande et le moteur lui même, et un amplificateur de puissance.

La première carte est une carte d'extension (Unidex 500) à brancher dans l'ordinateur de commande et qui comporte un processeur. Elle peut être pilotée de différentes façon : grâce à l'interface **U500 MMI** fournie par le constructeur, ou bien par l'intermédiaire de VIs LabVIEW.

La seconde (BB 501) est une simple carte d'interface entre l'U500 et l'amplificateur de puissance du moteur. Elle permet de connecter les 4 axes (Output + Feedback, moteurs Aerotech ou autres) pilotables avec une seule carte U500. Pour notre application, un seul axe était utile et nous avons décidé d'en utiliser un deuxième pour piloter le chariot central (Output) et lire l'information du MeterDrive (Feedback).

**Remarque** : L'unité de déplacement du chariot Aerotech est 1 pas = 4 nm

### 4.2. Le logiciel U500 MMI

Le CD fourni par Aerotech comporte une interface logicielle pour la commande de la carte U500. Cette interface permet un contrôle en temps réel (du type déplacement avec un joystick) ou l'écriture d'un programme, dans un langage propre à cette interface, qui n'est qu'un flux de données.

L'utilisation de la table Aerotech dans le cadre de 'OHANA , à savoir une commande de vitesse qui évolue en permanence en fonction des observations, empêche l'utilisation d'un flux de données. Chaque nouvelle commande doit être prioritaire sur la précédente. Cependant, ce logiciel peut être utile pour les phases d'essais grâce à la fenêtre de « Diagnostics » qui permet de visualiser l'état du moteur et des cartes d'interface.

## Chapitre 3 - Le contrôle - commande

### 4.3. Les drivers LabVIEW

Le CD de logiciels fourni par Aerotech contient aussi quelques VIs LabVIEW d'exemple et de bas niveau (appels de fonctions dans une librairie DLL). L'idée initiale était de s'appuyer sur ces VIs existants pour créer les nôtres spécifiques ayant la même structure (Ouverture – Lecture/Écriture - Fermeture). Mais il s'est rapidement révélé que ceux-ci ne répondaient pas au cahier des charges. Ces programmes n'étaient pas assez clairs à la compréhension, ni très modulaires. Enfin, l'insertion de la documentation posait quelques problèmes pour ces mêmes raisons.

### 4.4. Principe de fonctionnement de *LAR TRC Aerotech.vi*

La structure de ce VI est la même que précédemment, c'est à dire Ouverture - Commande(s) et lecture - Fermeture. La carte U500 nécessite en effet une ouverture et une initialisation avant toute utilisation, ainsi qu'une fermeture après la fin des opérations.

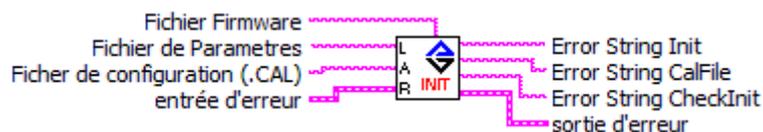
Tous les VIs présentés ci-dessous utilisent les fonctions incluses dans la bibliothèque de fonction **Win50032.dll** fournie avec le CD-Rom de logiciels (voir *Note sur les VIs Appeler une fonction d'une DLL en Annexe 7*). Ils constituent les principales fonctions utiles à notre utilisation du chariot Aerotech.

#### LAR TRC Open



La carte U500 nécessite d'être ouverte avant d'être utilisée. Ce VI utilise la fonction **WAPIAerOpen** incluse dans la bibliothèque **Win50032.dll**.

#### LAR TRC Init



Après l'ouverture, la carte U500 doit être initialisée. Cette initialisation se fait en trois phases :

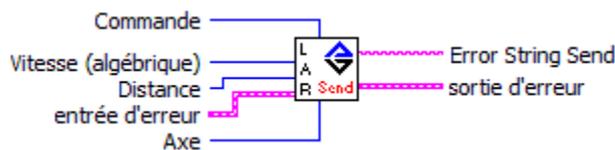
- L'initialisation *standard* charge le fichier de paramètres et le fichier Firmware dans la carte grâce à la fonction **WAPIAerInitialize**. Le fichier de paramètres a été personnalisé pour notre application et notre chariot.
- Avant de continuer, la fonction **WAPIAerCheckInitz** vérifie que cette initialisation s'est

effectuée correctement.

- Le chargement du fichier de calibration par **WAPILoadCalFile** termine l'étape d'initialisation.

Les deux fichiers personnels (fichiers de paramètres et de calibration) ont été commandés pour pouvoir diminuer au maximum l'erreur de vitesse et de position dans la boucle d'asservissement du moteur. On peut par exemple y trouver les coefficients de la fonction de transfert de la boucle d'asservissement ( $K_{pos}$ ,  $K_i$ , etc. dans le fichier de paramètres) ainsi qu'une correction de linéarité grâce à des coefficients de corrections spécifiques à ce chariot (fichier de calibration).

### LAR TRC Send

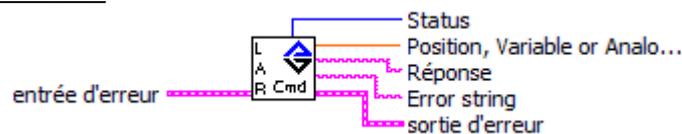


Le VI **LAR TRC Send.vi** permet d'envoyer une des commandes listée dans le menu déroulant *Commande*. Cette commande peut être associée à son paramètre (le plus souvent *Axe*, *Vitesse* et/ou *Distance*). La fonction utilisée est ici **WAPIAerSend**.

La première commande à envoyer après l'initialisation est l'activation (**ENABLE**) de l'axe concerné (ici l'axe *X*, celui qui est concerné par les fichiers de correction). Il faut ensuite envoyer la commande de vitesse et permettre sa mise à jour en temps réel. La commande qui permet cette action est **FREERUN axe vitesse**.

La commande **ABORT** arrête le mouvement en cours.

### LAR TRC ChoixCommand



Ce VI, comme le précédent, utilise **WAPIAerSend** pour envoyer un commande. Mais pour cela, il ouvre une face avant où l'utilisateur est invité à taper lui-même cette commande.

**Remarque** : Il faut faire attention à la syntaxe de la commande ainsi que de ses arguments. Se référer au manuel de la carte U500 (*The UNIDEX 500 Motion*, chapitre 7).

### LAR TRC ReadPosition



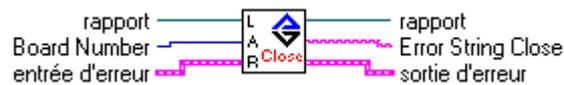
### Chapitre 3 - Le contrôle - commande

Le chariot Aerotech peut renvoyer 4 types d'information de position :

- la position relative demandée,
- la position absolue demandée,
- la position réelle actuelle (renvoyée par le Feedback du chariot),
- la position demandée en temps réel.

Ce VI permet de lire au choix une de ces quatre informations, pour chacun des axes.

#### LAR TRC Close



A la fin de la manipulation, la carte U500 doit être fermée en utilisant la fonction **WAPIAerClose** de la bibliothèque **Win50032.dll**.

De la même façon que pour les moteurs pas à pas, ces VIs peuvent être utilisés en *stand-alone* pour une réorganisation du programme de contrôle, l'important étant de conserver la structure indispensable Ouverture – Commandes – Fermeture nécessaire pour utiliser la carte U500.

## 5. La connection DataSocket

Lors de l'installation du chariot Aerotech, la configuration matérielle a révélée que l'ordinateur de contrôle de la manip devrait se trouver au pied de la LAR. En effet, le câble qui relie la carte U500 à la TRC (OP500-12) est trop court et ne peut pas être allongé.

Nous avons donc proposé de déporter le contrôle et utiliser le réseau local pour piloter la LAR à distance.

### 5.1. Le principe de client/serveur

La mise en contrôle distant de la LAR utilise le principe de client/serveur.

Dans notre cas, le serveur est l'ordinateur se trouvant au pied de la LAR et qui fait les acquisitions, envoie les commandes, etc. Le client est donc l'ordinateur se trouvant dans la salle de contrôle de la salle Coudé et auquel on a un accès physique.

Le serveur utilise les VIs présentés ci-dessus auxquels on a simplement ajouté la publication des données de la face avant en local.

En effet, le serveur *publie* ses données (en local) pour que le client puisse *souscrire* ces données en venant lire ces informations.

Le client utilise alors des VIs qui ne contiennent que les commandes de face avant. Celui-ci souscrit aux données pour les utiliser et les afficher.

Les VIs clients sont des copies des faces avant des VIs serveur nécessitant des interventions en face avant. Les VIs travaillant en *background* (tâche de fond, sans ouvrir de face-avant) n'ont pas d'équivalent client.

**Remarque** : Les VIs basés sur la technologie DataSocket sont en version 0.1. Ils n'ont pas été testé et ne fonctionnent qu'en local (sur un seul ordinateur).

Pour les déporter réellement, il suffira d'installer les VIs clients sur l'ordinateur distants et de changer les adresses de publication : remplacer `dstp://localhost/...` par `dstp://123.123.123.123/...`, où 123.123.123.123 est l'adresse IP du serveur.

Cependant, certaines configuration du manager DataSocket peuvent nécessiter des changements d'autorisation (voir `C:\Program Files\National Instruments\DataSocket\cwndssmgr.exe`).

### 6. La documentation des VIs

Une partie importante du stage a été dédiée à la documentation des VIs écrits et à écrire. L'objectif fixé était de créer une documentation claire pour chaque VI et sous-VI, accessible depuis l'aide en ligne LabVIEW et similaire à celle existante. Le deuxième impératif portait sur la création d'un rapport d'exécution qui permettrait un dépouillement des données plus aisé (quelles étaient les configurations ?, quelles sont les erreurs apparues ?, etc.).

#### 6.1. L'aide en ligne

L'aide en ligne des VIs devait être claire, concise, et similaire à celle de LabVIEW. Elle comprend donc une petite explication du rôle du VI et une description de chacun des connecteurs (entrées et sorties) (*voir Annexe 9*).

Le format choisi pour cette documentation est le format standard HTML, pour différentes raisons :

- LabVIEW contient une fonctionnalité permettant de générer cette aide en ligne directement au format HTML,
- C'est un format standard, facilement lu par un logiciel de type navigateur internet,
- Il permet une mise en page claire et des modifications faciles.

La création de l'aide est accessible par le menu d'impression de LabVIEW, qui permet de choisir le format de sortie (HTML, texte, sortie papier, ...) et le type d'impression (complète, personnalisée, orientée sous-VI, ...). Le fichier de sortie est ensuite à compléter avec les rôles des connecteurs.

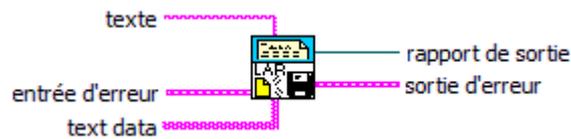
Cette documentation est idéalement faite *en temps réel*, c'est à dire au fur et à mesure de l'écriture des programmes et de leurs modifications

#### 6.2. Le rapport d'exécution

Pour permettre une utilisation plus facile, il était nécessaire d'inclure dans les VIs la création d'un rapport d'exécution. Pour les mêmes raisons que précédemment, le choix a été porté sur le format HTML.

L'écriture du rapport d'exécution suit les mêmes règles d'organisation que les autres VIs, à savoir le schéma Ouverture – Écriture – Fermeture.

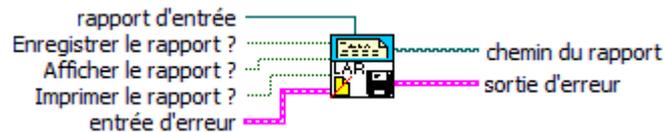
### Créer Rapport



*Créer Rapport.vi* crée un nouveau rapport au format HTML ayant pour titre l'heure et la date courante (horodatage), ainsi que la version du logiciel utilisé (lu dans le fichier *version.txt*). On peut y inclure du texte et un tableau de chaîne de caractères.

Il est possible d'ajouter du texte à ce rapport en utilisant la fonction LabVIEW existante *Ajouter du texte au rapport.vi*, ou un tableau en utilisant *Ajouter une table au rapport.vi*.

### Fermer Rapport



La fermeture du rapport est effectuée grâce à *Fermer Rapport.vi* qui enregistre le rapport, l'affiche et/ou l'imprime selon les valeurs des arguments. Le nom de fichier du rapport est l'horodatage de création (*Rapport\_du\_date\_a\_heure.html*), ce qui permet de ne jamais en avoir deux portant le même nom, et ainsi de ne pas en effacer accidentellement.

## 7. Le chariot central

L'intégration de la ligne à retard dans le hall de l'INSU (Institut National des Sciences de l'Univers) impliquant plusieurs équipes, la commande du chariot central n'a pas pu être effectuée. En effet, le montage des parties mécanique n'était pas terminé : l'installation du moteur à courant continu, de la courroie d'entraînement et des fin de course mécaniques reste à faire. Le ruban du MeterDrive vient quand à lui d'être installé avec sa gouttière de protection, mais le câble du connecteur n'est pas encore réalisé.

La lecture du MeterDrive devrait utiliser l'interface U500 + BB501 du chariot Aerotech. Il est en effet possible de lire les valeurs des *pins* des connecteurs à l'aide des fonctions de la bibliothèque **Win50032.dll** utilisée pour le chariot Aerotech.

La commande du moteur à courant continu du chariot central devrait aussi utiliser ces cartes grâce à la possibilité d'envoyer une valeur binaire sur 4 des *pins* d'un des connecteurs.

## 7.1. Le MeterDrive

Le MeterDrive renvoie deux signaux incrémentaux A et B en  $0/V_{Alim}$  ( $10V < V_{alim} < 30V$ ), déphasés de  $\pi/2$ . Un signal d'erreur complète la fiabilité du capteur.

Ce signal devant être transporté sur une longue distance (jusqu'à 14 mètres environ), il est nécessaire de fabriquer une carte électronique qui permettra ce transport. De plus, La carte BB501 n'admet pas ce type d'entrée, il faut donc adapter ces signaux en TTL standards 0/5V.

Cette carte et les connecteurs associés sont actuellement en cours de réalisation et devraient être disponible à la fin du mois de septembre.

La lecture de l'état des *pins* 13 à 16 du connecteur J11 (sur la BB501, reliés respectivement aux *pins* 62 à 59 du connecteur P1 de la U500) s'effectue grâce à la commande **IN0 bit1,bit2,..** (ou **\$INbit#**). La valeur est enregistrée dans une variable grâce à la fonction **WAPIAerSend**, puis lue par la fonction **WAPIAerReadVariable** de **Win50032.dll**.

Enfin, comme ces commandes transitent par la carte U500, il faudra utiliser les fonctions **Open** et **Close** comme pour le chariot Aerotech (**LAR TRC Open** et **LAR TRC Close**).

Contrairement à ce qui était prévu, on ne pourra pas utiliser un deuxième axe de la BB501. Le connecteur J11 sur lequel on peut lire les états des *pins* est un connecteur supplémentaire. Cela nécessitera donc une adaptation de la boîte de la BB501.

En plus des VIs déjà réalisés, peu de VIs seront nécessaires. On utilisera **LAR TRC Open** et **LAR TRC Close** pour ouvrir et fermer la carte, ainsi que **LAR TRC Initialise**.

La commande à envoyer est **VI=\$IN0 + \$IN1 + \$IN2 + \$IN3**, qui stocke la valeur du nombre binaire *bit1\_bit2\_bit3\_bit4* dans la variable *VI* qui est ensuite lue. Ces actions doivent être enfermées dans une boucle dont la cadence d'exécution est suffisante pour ne rater aucun front de signal.

### Remarques :

- Le VI existant (**LAR CC MeterDriveRead**) utilise le VIs **Unidex\_500,CIN**. Il n'est pas très modulaire et n'est pas encore documenté car il n'a servi que pour les premiers tests en statique. Il sera peut être utile de réécrire le programme totalement.
- Par défaut, les *pins* sont à l'état haut (+5V). Un inverseur logiciel ou hardware sera peut être nécessaire.

Une contrainte est apparue lors de la conception de ces programmes : celle de la fiabilité de la lecture. En effet, le MeterDrive envoie des impulsions et c'est l'ordinateur de contrôle qui s'occupe du comptage. Il faudra néanmoins vérifier qu'aucune des impulsions ne peut être oubliée (par faiblesse du CPU, par erreur de LabVIEW,...) au risque de perdre la précision de 100  $\mu$ m donnée par le capteur.

## 7.2. Le moteur à courant continu du chariot à retard fixe

De la même façon, la commande du moteur à courant continu devrait s'effectuer en envoyant une valeur codée sur 4 bits (*pins* 21 à 24) sur le connecteur J11. Ce dernier servirait donc à la fois à la lecture des informations du capteur et à l'envoi de commande codée sur 4 bits au moteur à courant continu du chariot à retard fixe.

Le moteur à courant continu n'a pas encore été acheté mais le choix devrait porter sur un moteur pilotable par impulsions, la largeur des impulsions déterminant la vitesse. Ceci permettrait de se contenter des 4 bits disponibles pour la commande.

## 8. Et ensuite ...

Mon travail s'est arrêté là mais sera repris ensuite pour finir l'intégration du contrôle - commande d'OHANA.

Il reste principalement trois versions des programmes LabVIEW :

- la version 1.0 (appelée **LAR VIs\_23-07**)
- les versions 1.1 et 1.2

Ces trois répertoires contiennent un fichier **README.txt** qui en explique l'arborescence. Le fichier **ToDoList.txt** résume les objectifs d'amélioration des programmes.

Il est conseillé de lire la page **AIDE VIs.html** placé dans **Fichiers d'aide**, c'est un récapitulatif des VIs réalisés contenant des liens vers les aides en ligne des sous-VIs.



## **Conclusion**

L'ensemble de contrôle et de commande des parties mobiles de la ligne à retard de 'OHANA a été en grande partie réalisé pendant ce stage. Cependant, certaines commandes restent à effectuer pour les éléments suivants :

- le chariot central,
- la lecture de l'information donnée par le MeterDrive.

Celles-ci n'ont pas pu être effectuées pour différentes raisons que nous avons vues, principalement à cause du chevauchement des différentes équipes dans le hall d'intégration de la DT/INSU.

Actuellement, le projet 'OHANA est en prolongation de phase 1, parallèlement au début de la phase 2. Les platines d'injection ont été montées sur les deux télescopes Keck 1 et Keck 2. Cela a donc décalé le calendrier de l'expérience et focalisé les intérêts de l'équipe sur les platines d'injection plutôt que sur la ligne à retard. Il faudra néanmoins que tout soit prêt lorsque la priorité reviendra sur la ligne à retard.

On peut observer aussi que le projet 'OHANA commence à être reconnu. En effet, les tests des platines sur le Keck n'était pas prévus et sont dus aux bons résultats de la phase 1 (essais des platines sur les différents télescopes du Mauna Kéa).

De plus, l'ESO mentionne, dans ses projets à longs termes, un interféromètre successeur du VLTI baptisé OLA, qui aurait jusqu'à 2 km de base, la liaison pouvant s'effectuer par fibres optiques monomodes. Il relierait des télescopes de classe 8 mètres.



## **Annexes**

Ce chapitre regroupe les différents documents aidant à la compréhension de ce rapport mais qui n'ont pas trouvé leur place dans le corps même de celui-ci. Il contient donc certains documents utilisés ou réalisés, les photos d'illustration et autres schémas.

## 1. La ligne à retard en cours de fabrication



Illustration 14 : La ligne à retard en cours de fabrication à la DT/INSU, vérification de l'alignement. Photo DT/INSU.

## 2. Structure de la ligne à retard

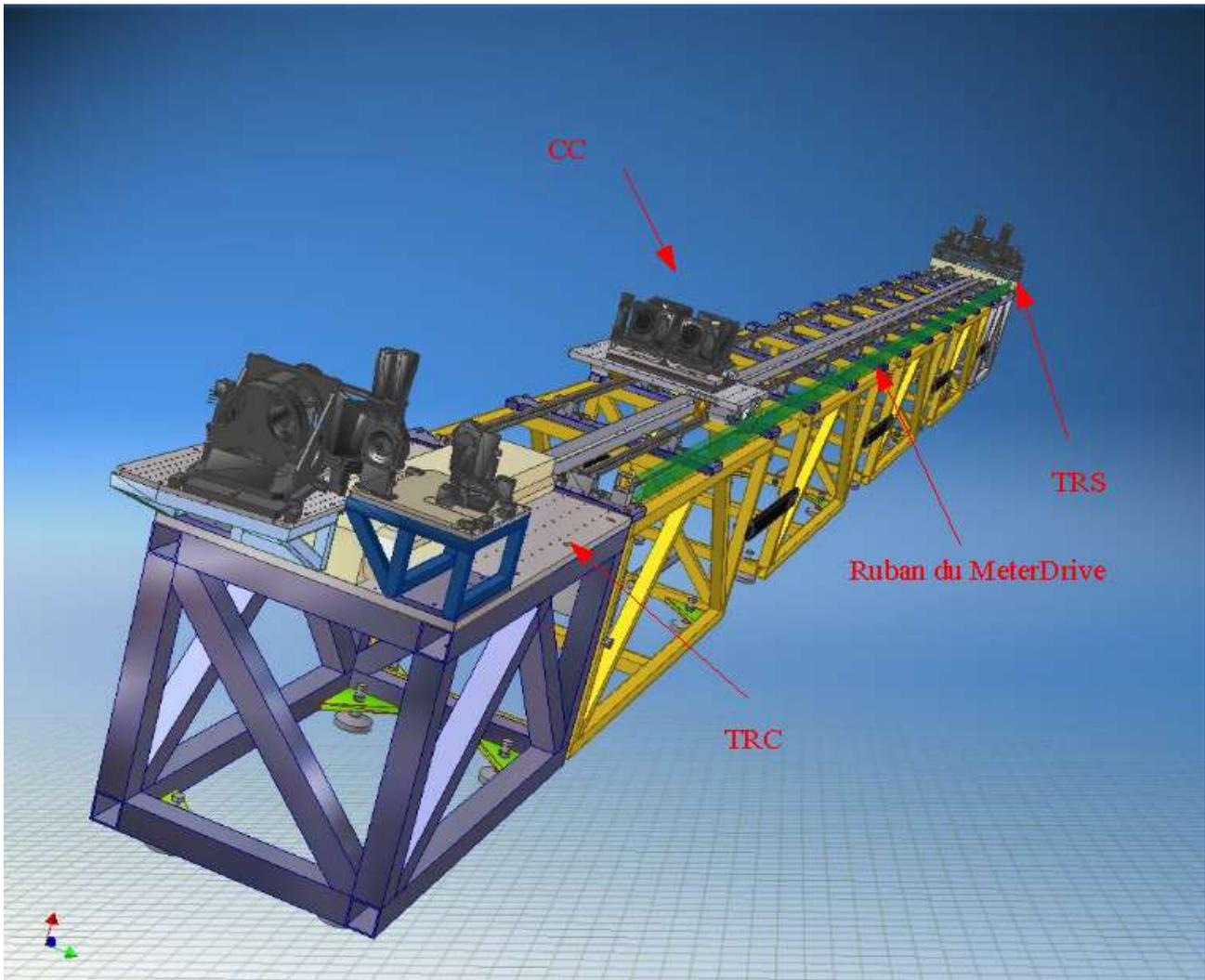


Illustration 15 : Dernière prévision de la structure de la ligne à retard. Image DT/INSU.

### 3. Structure de la table à retard continu (TRC)

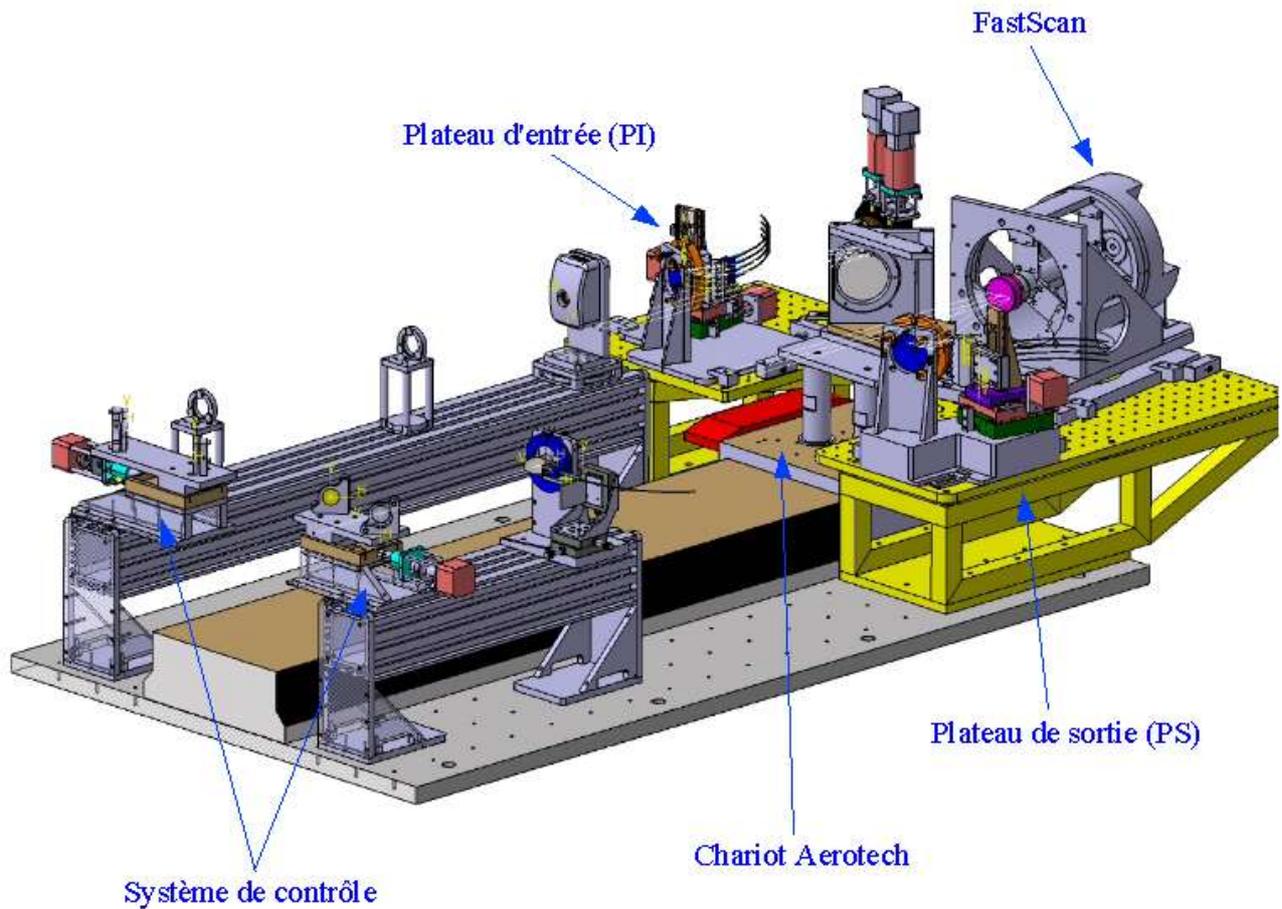


Illustration 16 : Vue mécanique de la TRC. On peut y voir le chariot Aerotech et le FastScan, ainsi que les plateaux d'entrée et de sortie des fibres d'injection.

#### 4. Platine d'injection



Illustration 17 : Test de montage de la platine d'injection sur l'ISS (Instrument Support Structure) du télescope Gemini, à Hawaï. Photo Observatoire.

### 5. Architecture de contrôle de l'ensemble 'OHANA

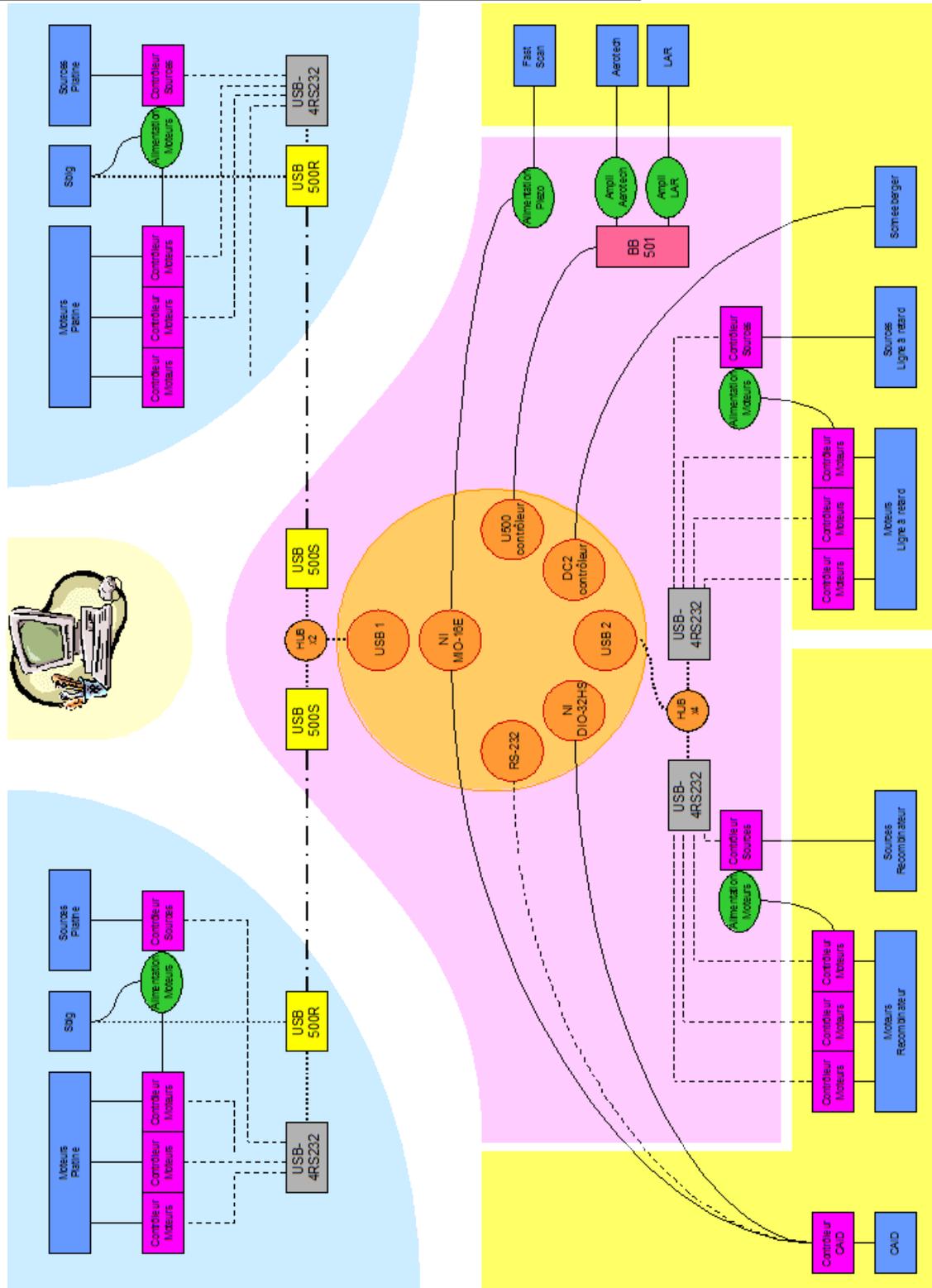
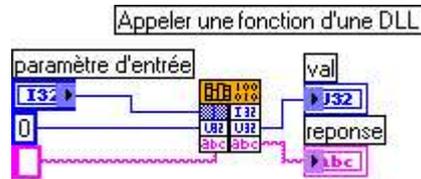


Illustration 18 : Architecture de contrôle de l'ensemble de 'OHANA . Récapitulatif des différentes liaisons. Schéma 'OHANA.



## 7. Note sur les VIs *Appeler une fonction d'une DLL*



Icône du sous-VI **Appeler une fonction d'une DLL** avec son argument (paramètre d'entrée) et ses valeurs retournées (val et reponse) initialisées à 0 et chaîne vide.

Une partie des VIs de contrôle de la table Aerotech, ainsi que ceux de lecture du MeterDrive utilisent des fonctions LabVIEW bas niveau appelées **Appeler une fonction d'une DLL**. J'essaie ici d'expliquer ce choix et de simplifier l'approche de leur programmation.

Les VIs de commande du chariot Aerotech basés sur le VI **Unidex\_500,CIN.vi** ne fonctionnaient pas correctement. La solution proposée a donc été d'utiliser **Appeler une fonction d'une DLL** à la place de **CIN.vi**.

Les fonctions utiles pour commander la carte U500 par LabVIEW sont disponibles dans la table **U500 CIN VI table**. Grâce à celle-ci et à l'aide trouvée sur le CD-Rom fourni par Aerotech, on peut facilement configurer ces VIs.

Le menu local permet de choisir la bibliothèque utilisée, la fonction, de configurer les arguments (paramètres d'entrée) et les valeurs retournées (paramètres de sortie). On obtient alors un prototype de la fonction, dans le champ en bas de la boîte de dialogue, qui doit correspondre à celui présenté dans l'aide de Aerotech (dans **C:\u500\mmi\help\wapi.hlp**).

## 8. Cahier des charges du chariot Aerotech

### Spécification technique de besoin « Table à retard continu 'OHANA »

**Besoin** : platine de positionnement motorisée pour rétroreflécteur afin de réaliser une ligne à retard pour un interféromètre astronomique.

**Spécifications** :

<i>Moteur</i>		
Type de moteur	Moteur linéaire	
<i>Positionnement du chariot</i>		
Course	1	[m]
Résolution	0,01	[ $\mu\text{m}$ ]
Répétabilité en position ( $3\sigma$ )	$\pm 1$	[ $\mu\text{m}$ ]
Précision en position incluant la répétabilité ( $3\sigma$ )	$\pm 6$	[ $\mu\text{m}$ ]
<i>Vitesse du chariot</i>		
Vitesse maximale en mode positionnement (consigne en position seulement)	75	[mm/s]
Vitesse maximale en mode suivi des franges (consigne en position <u>et</u> en vitesse)	10	[mm/s]
Stabilité en vitesse en mode suivi de franges (consigne en position <u>et</u> en vitesse)	50	[ $\mu\text{m/s}$ ]
<i>Qualité de guidage du chariot</i>		
Horizontalité, rectitude	$\pm 6$	[ $\mu\text{m}$ ]
Lacet, tangage, roulis	$\pm 10$	[arcsec]
Défaut d'orthogonalité des guides	5	[arcsec]
<i>Spécification du chariot</i>		
Poids supportable	50	[kg]

**Coût** : Le coût devra être inférieur à 300 kF.

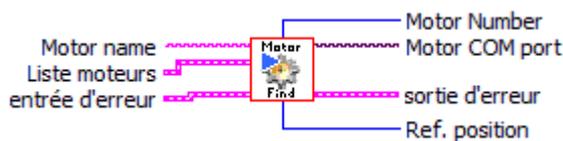
**Délais** : Le matériel devra être livrable en 20 semaines à compter de la date de réception de la commande.

## 9. Exemple d'aide en ligne LabVIEW

### LAR MotorFind.vi

Renvoie les paramètres **Ref. position**, **Motor COM port** et **Motor Number** du moteur choisi dans **Motor Name**. Ces paramètres sont listés dans **Liste moteurs**.

#### Cadre connecteur



#### Commandes et indicateurs

-  **Motor name** est une chaîne de caractères. C'est le nom du moteur et il doit exister dans la variable globale **Liste moteur LAR**.
-  **Liste moteurs** est un cluster de tableaux semblable à la variable globale du même nom et contient les noms, ports COM, numéros et positions de référence des moteurs.
-  Le cluster d'**entrée d'erreur** reçoit les informations d'erreur venant des VIs précédemment appelés. Si une erreur était présente, ce VI ne s'exécute pas et transmet l'erreur en **sortie d'erreur**.
  -  **status** est soit VRAI (X) pour pas d'erreur, soit FAUX (coche) pour une erreur ou une mise en garde.
  -  Le **code** identifie l'erreur ou la mise en garde reçue.
  -  La chaîne de **source** décrit l'origine de l'erreur ou de la mise en garde reportée.
-  **Motor COM port** est le port de sortie sur lequel est branché le moteur choisi dans **Motor name**.
-  **Motor Number** est le numero du moteur tel qu'il est enregistré dans la variable globale **Liste moteur LAR**.
-  **Ref. position** est la position de référence définie dans la variable globale **Liste moteur LAR** et dans le fichier de configuration.
-  **sortie d'erreur** contient des informations sur l'erreur. Si une erreur était présente avant l'exécution du VI, elle se retrouve à la sortie.
  -  **status** est soit VRAI (X) pour pas d'erreur, soit FAUX (coche) pour une erreur ou une mise en garde.
  -  Le **code** identifie l'erreur ou la mise en garde reçue.
  -  La chaîne de **source** décrit l'origine de l'erreur ou de la mise en garde reportée.

## 10. Exemple de rapport d'exécution

### **Rapport d'exécution du 29/09/2004 à 14h45**

Version 1.2

Chargement du fichier de config : C:\Ohana\LAR\Config\MotorCC.txt

Données :

Motor Name	COM Port	Numéro moteur	Ref. Pos	OFFSET	INT	MPAS	JE U	ACC	VMAX	VMIN
LAR CC PCA-X	COM1	1	23	100	2	5	0	20	600	300

Ouverture des moteurs effectuée correctement.

Les moteurs ouverts sont les suivants :

Name	Port COM	Motor Number	Ref. pos
LAR CC PCA-X	COM1	1	18000
LAR CC PCA-ThetaX	COM1	2	245000

Positions actuelles des moteurs :

LAR CC PCA-X	183
LAR CC PCA-ThetaX	moteur non connecté

Données de configuration envoyées aux moteurs depuis le fichier : C:\Ohana\LAR\Config\MotorCC.txt

Déplacement du moteur LAR CC PCA-X : 22  $\mu$ pas.

Position actuelle : 205

Moteurs libérés

Modification des paramètres :

Moteur : LAR CC PCA-X

Fichier : C:\Ohana\LAR\Config\MotorCC29-09-2004.txt

Chargement du fichier de config : C:\Ohana\LAR\Config\MotorCC29-09-2004.txt

Données :

**Annexes**

Motor Name	COM Port	Numéro moteur	Ref. Pos	OFFSET	INT	MPAS	JE U	ACC	VMAX	VMIN
LAR CC PCA-X	COM1	1	18000	100	2	5	0	20	600	300
LAR CC PCA-ThetaX	COM1	2	245000	100	2	5	0	20	600	300

**Modification des paramètres : Un nouveau fichier de configuration a été créé : C:\Ohana\LAR\Config\MotorCC29-09-2004.txt**

Name	Port COM	Motor Number	Ref. pos
LAR CC PCA-X	COM1	1	21

Edition du fichier de config : C:\Ohana\LAR\Config\MotorCC29-09-2004.txt

Chargement du fichier de config : C:\Ohana\LAR\Config\MotorCC29-09-2004.txt

Données :

Motor Name	COM Port	Numéro moteur	Ref. Pos	OFFSET	INT	MPAS	JE U	ACC	VMAX	VMIN
LAR CC PCA-X	COM1	1	21	100	2	5	0	20	600	300

Modification des paramètres :

Moteur : LAR CC PCA-X

Fichier : C:\Ohana\LAR\Config\MotorCC29-09-2004.txt

Chargement du fichier de config : C:\Ohana\LAR\Config\MotorCC29-09-2004.txt

Données :

Motor Name	COM Port	Numéro moteur	Ref. Pos	OFFSET	INT	MPAS	JE U	ACC	VMAX	VMIN
LAR CC PCA-X	COM1	1	21	100	2	5	0	20	600	300

**Modification des paramètres : Le fichier de paramètres a été**

**modifié : C:\Ohana\LAR\Config\MotorCC29-09-2004.txt**

Name	Port COM	Motor Number	Ref. pos
LAR CC PCA-X	COM1	1	18000

Edition du fichier de config : C:\Ohana\LAR\Config\MotorCC29-09-2004.txt

Chargement du fichier de config : C:\Ohana\LAR\Config\MotorCC29-09-2004.txt

Données :

Motor Name	COM Port	Numéro moteur	Ref. Pos	OFFSET	INT	MPAS	JE U	ACC	VMAX	VMIN
LAR CC PCA-X	COM1	1	18000	100	2	5	0	20	600	300

Initialisation :

LAR CC PCA-X	OK
--------------	----

Moteurs libérés

Déplacement du moteur LAR CC PCA-X : 600  $\mu$ pas.

Position actuelle : 600

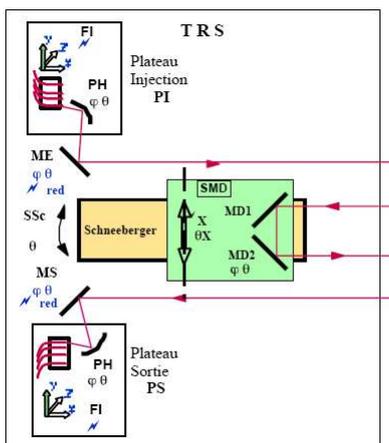
Moteurs libérés

Session VISA fermée

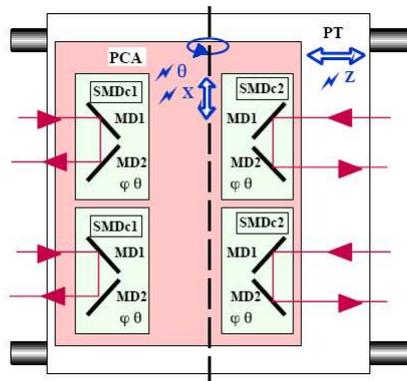
LAR CC PCA-X 600

## 11. Exemple de documentation réalisée

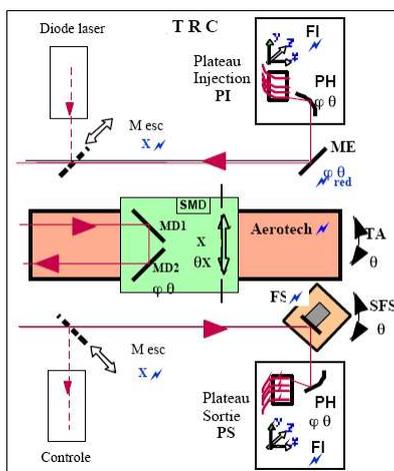
### Liste des moteurs de la LAR



1. TRS Table à retard statique	1.1. Plateau d'injection <b>PI</b>		
	1.1.1. Porte fibre <b>FI</b>	LAR TRS PI FI-X	
		LAR TRS PI FI-Y	
		LAR TRS PI FI-Z	
	1.2. Miroir d'injection <b>ME</b>	LAR TRS ME-Phi	avec réducteur
		LAR TRS ME-Theta	avec réducteur
	1.3. Chariot de simulation	<i>Moteur Schneberger, Z</i>	
	1.4. Miroir de sortie <b>MS</b>	LAR TRS MS-Phi	avec réducteur
		LAR TRS MS-Theta	avec réducteur
	1.5. Plateau de sortie <b>PS</b>		
	1.5.1. Porte fibre <b>FI</b>	LAR TRS PS FI-X	
		LAR TRS PS FI-Y	
		LAR TRS PS FI-Z	
	1.5.2. Obturateur <b>Obt</b>	LAR TRS PS-Obt	Fonctionnement ON/OFF



2. CC Chariot Central	2.1. Plateau de translation <b>PT</b>		
	2.1.1. Motorisation	<i>Moteur d'entraînement à courroie, Z</i>	Moteur à courant continu sur BB501
	2.1.2. Mesure de position	<i>MeterDrive</i>	Retour sur BB501
	2.2. Plateau correcteur d'attitude <b>PCA</b>	CC PCA-X	
		CC PCA-ThetaX	



3. TRC Table à retard continu	3.1. Plateau d'injection <b>PI</b>		
	3.1.1. Porte fibre <b>FI</b>	LAR TRC PI FI-X	
		LAR TRC PI FI-Y	
		LAR TRC PI FI-Z	
	3.2. Miroir d'injection <b>ME</b>	LAR TRC ME-Phi	avec réducteur
		LAR TRC ME-Theta	avec réducteur
	3.3. Chariot de translation		
	3.3.1. Table Aerotech <b>TA</b>	<i>Moteur Aerotech, Z</i>	sur BB501
	3.4. FastScan	<i>Ensemble FastScan</i>	Monté et indépendant
	3.5. Plateau de Sortie <b>PS</b>		
	3.5.1. Porte fibre <b>FI</b>	LAR TRC PS FI-X	
		LAR TRC PS FI-Y	
		LAR TRC PS FI-Z	
	3.5.2. Obturateur	LAR TRC PS-Obt	Fonctionnement ON/OFF
	3.6. Système d'alignement		
	3.6.1. Entrée du faisceau		
3.6.1.1. Miroir escamotable	LAR TRC Mesc-Laser	Fonctionnement ON/OFF	
3.6.2. Contrôle de sortie			
3.6.2.1. Miroir escamotable	LAR TRC Mesc-Controle	Fonctionnement ON/OFF	

## 12. Les différentes bases du projet 'OHANA au Mauna Kéa

	CFHT	Gemini	IRTF	Keck 1	Keck 2	Subaru	UKIRT
CFHT	<b>3,6 m</b>	162 m	344 m	630 m	600 m	800 m	347 m
Gemini	2,8 mas	<b>8,2 m</b>	400 m	630 m	610 m	790 m	202 m
IRTF	1,32 mas	1,1 mas	<b>3,0 m</b>	287 m	237 m	430 m	450 m
Keck 1	0,7 mas	0,7 mas	1,58 mas	<b>10,9 m</b>	80 m	147 m	610 m
Keck 2	0,8 mas	0,7 mas	1,91 mas	6,3 mas	<b>10,9 m</b>	222 m	610 m
Subaru	0,6 mas	0,6 mas	1,06 mas	3,09 mas	2,05 mas	<b>8,3 m</b>	760 m
UKIRT	1,31 mas	2,25 mas	1,0 mas	0,7 mas	0,7 mas	0,6 mas	<b>3,8 m</b>

### Bases / Diamètres des télescopes / Résolutions angulaires dans la bande K

On peut observer que la plus grande base mesure environ 800 mètres (Subaru – CFHT) et que celle testée pendant la phase II mesure 160 mètres (Gemini – CFHT). Ces bases sont supérieures à celles des deux Keck (80 mètres) ou du VLTI.

Rappelons que la résolution angulaire est donnée par  $R = \lambda/B$  où B est la base entre les deux télescopes et  $\lambda$  la longueur d'onde d'observation.



## Lexique

Dans cette partie sont consignés les termes spécifiques et les acronymes nécessitant une brève définition.

- x **CC** : Chariot Central. Voir *Chapitre 2*.
- x **CFHT** : Canada – France – Hawaiï Telescope. Télescope canadien – franco – hawaïen de 3,60 m installé au Mauna Kéa.
- x **Classe d'un télescope** : Les télescopes sont définis par le diamètre de leur miroir primaire. On dit aussi leur classe.
- x **DT/INSU** : Direction Technique de l'Institut National des Sciences de l'Univers. La DT/INSU s'occupe de l'intégration mécanique de la ligne à retard de 'OHANA .
- x **ESO** : European Southern Observatory. Observatoire européen situé dans l'hémisphère sud et fondé en 1962. Il dispose d'un site sur le mont La Silla et du site du VLTI au Cerro Paranal, au Chili. Les pays membres sont l'Allemagne, la Belgique, le Danemark, la France, la Hollande, l'Italie, la Suède, la Suisse et le Portugal.
- x **Gemini** : Télescope de 8 m installé au Mauna Kéa.
- x **IRTF** : InfraRed Telescope Facility. Télescope infrarouge de la NASA installé au Mauna Kéa.
- x **Keck** : Deux télescopes américains (Keck 1 et Keck 2) de 10 mètres de diamètre, les plus grands du monde actuellement. Ces deux télescopes peuvent être couplés pour faire de l'interférométrie.
- x **Lacet** : Rotation autour de l'axe *Y*, axe vertical. Le lacet influe sur l'alignement par le décalage à gauche ou à droite qu'il entraîne.
- x **LAR** : Ligne À Retard. Ligne à retard optique qui permet de faire varier de façon différentielle la longueur des chemins optiques de chacun des faisceaux de l'interféromètre, et ainsi trouver la différence de marche nulle qui permettra d'observer des franges d'interférence.
- x **'OHANA** : Optical Hawaiian Array for Nanoradian Astronomy (Réseau optique hawaïen pour l'astronomie au nanoradian). Projet de réseau interférométrique utilisant les télescopes existants du sommet du Mauna Kéa à Hawaiï. Quatre des télescopes sont de classe 8-10 mètres et trois de classe 4 mètre.
- x **Optique adaptative** : Instrument placé au foyer du télescope permettant de corriger le front d'onde des turbulences dues à l'atmosphère.
- x **Platine d'injection** : Table optique permettant d'injecter le signal dans une fibre optique monomode. La réalisation des platines d'injection était l'objectif de la phase 1 de 'OHANA .
- x **Recombinaison** : Réunion des deux (ou plus) faisceaux issus de l'interféromètre en un seul pour former des franges d'interférence.
- x **Roulis** : Rotation autour de l'axe *Z*, axe de propagation du faisceau. Dans le cas des faisceaux gaussiens (qui est le cas pour 'OHANA ), le roulis n'a pas d'influence sur l'alignement.

## Lexique

---

- x **Subaru** : Télescope national japonais de 8 m installé au Mauna Kéa.
- x **Tangage** : Rotation autour de l'axe  $X$ , axe horizontal. Le tangage influe sur l'altitude du faisceau.
- x **Tip-tilt** : Instrument d'optique adaptative. Le tip-tilt est un miroir déformable (ou une lame de verre) qui corrige le front d'onde turbulent en temps réel grâce à une boucle d'asservissement.
- x **TRC** : Table à **R**etard **C**ontinu. Voir *Chapitre 2*.
- x **TRS** : Table à **R**etard **S**tatique. Voir *Chapitre 2*.
- x **UKIRT** : **U**nited **K**ingdom **I**nfra**R**ed **T**elescope. Télescope britannique de 4 m travaillant dans l'infrarouge installé au Mauna Kéa.
- x **VI** : **V**irtual **I**nstrument. Instrument virtuel, nom donné aux programmes écrits avec le logiciel LabVIEW.
- x **VLTI** : **V**ery **L**arge **T**elescope **I**nterferometer. Interféromètre européen utilisant le réseau des très grands télescope du VLT au Cerro Paranal, au Chili.

## **Bibliographie – sources internet**

- x *Les noyaux actifs de galaxie en interférométrie optique à très longue base. Projet 'OHANA*, Julien Woillez, thèse 2004.
- x *'OHANA : Spécifications Système d'Alignement Automatique de la Ligne à Retard*, 2004.
- x *'OHANA : Spécifications Ligne à Retard*, 2004.
- x *Couplage 'OHANA / Keck 1 - Keck 2*, Jean Guerin, 2004, document interne.
- x <http://www.obspm.fr>, site de l'Observatoire de Paris.
- x <http://www.lesia.obspm.fr>, site du LESIA.
- x <http://www.cfht.hawaii.edu/~lai/OHANA.html>, site 'OHANA du CFHT.
- x <http://www.dt.insu.cnrs.fr/OHANA/OHANA.html>, site 'OHANA de la DT/INSU.
- x *Description technique d''OHANA*, Guy Perrin.
- x *'OHANA, project plan*, équipe 'OHANA, 2004.
- x *Projet 'OHANA, intégration des modules d'injection et de la ligne à retard*, Samir El Khouloudi, rapport de stage d'IUP 2004.
- x *'OHANA phase II : a prototype demonstrator of fiber linked interferometry between very large telescopes*, Guy Perrin et al., 2003, SPIE.
- x *Interferometric connection of large ground-based telescopes*, J.-M. Mariotti et al., 1996, Astronomy & Astrophysics.
- x Articles et documents internes écrits par les membres de l'équipe 'OHANA : Guy Perrin, Jean Guerin, Pierre Fedou, Denis Ziegler, Julien Woillez.