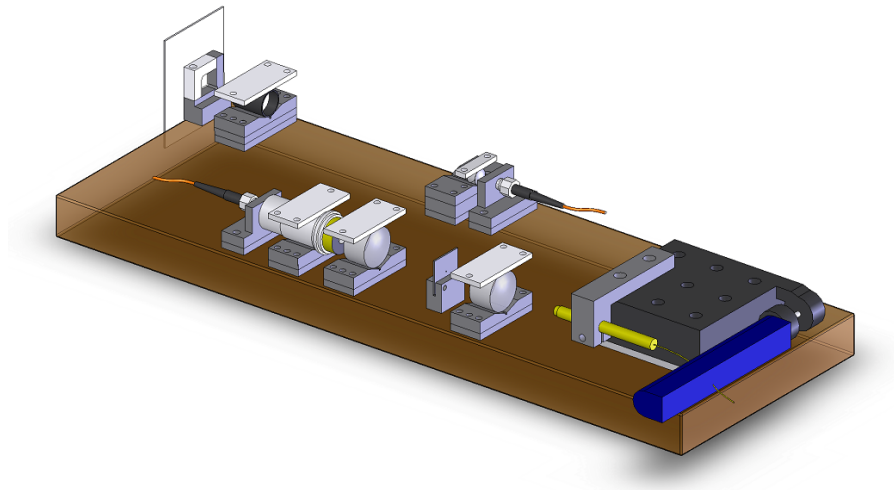


Travail de diplôme

Année 2005

Banc d'essais de fibres de spectrographe à vitesses radiales



Diplômant : Pablo Antolinez

Professeur : Dr. François Wildi

Travail proposé par : Observatoire Astronomique de l'Université de Genève
Dr. Francesco Pepe

Département : Systèmes Industriels et Microtechniques

Filière : Microtechniques, orientation Mécatronique

Table des matières

1	Introduction	4
2	Résumé	5
2.1	Performances recherchées	5
2.2	Principes du système	6
3	Design optique	7
3.1	Partie injection.....	7
3.1.1	Injection near field	8
3.1.2	Injection far field.....	9
3.2	Partie imagerie.....	10
4	Design mécanique	11
4.1	Montage des lentilles et des objectifs.....	12
4.2	Montage de la caméra CCD	13
4.3	Montage de la fibre source	14
4.4	Montage des connecteurs de la fibre de test.....	15
4.5	Calculs de la stabilité thermique du banc optique.....	15
4.5.1	Variation thermique en flexion du système d'imagerie	16
4.5.2	Variation thermique de la hauteur de l'axe optique du système d'imagerie	16
4.6	Procédure d'alignement.....	17
4.6.1	Alignement de la partie imagerie	18
4.6.1.1	Alignement du near field.....	18
4.6.1.2	Alignement du far field	19
4.6.2	Alignement de la partie injection	20
4.6.2.1	Alignement du near field.....	20
4.6.2.2	Alignement du far field	21
5	Software	22
5.1	Traitement des images.....	22
5.1.1	Capture et correction des images	22
5.1.2	Création du masque de correction.....	23
5.2	Automatisation des mesures.....	25
5.3	Système de sauvegarde et d'archivage.....	26
6	Analyse des résultats.....	27
6.1	Test configuration imagerie near field.	27
6.2	Test configuration imagerie en far field.....	30

7	Conclusion	33
8	Annexes.....	34
8.1	Cahier des charges.....	34
8.2	Bibliographie.....	35
8.3	Remerciements	36
8.4	Résultats de la sessions de test	37
8.5	Datasheet	38
8.6	Fichiers sources MATLAB	39

1 Introduction

En astronomie, un des défis majeurs de ces dernières années est la découverte de planètes extra-solaires dans les systèmes lointains. L'approche optique directe n'étant pour le moment pas encore approprié en raison de la résolution demandée ainsi que le peu de lumière que renvoie une planète même géante. Les astronomes utilisent donc une autre approche, celle du spectromètre à vitesses radiales, elle consiste grâce à la spectrographie de mesurer le déplacement de l'astre observé, étant donnée que, par les lois de Newton et Kepler, le soleil attire par gravitation les planètes, mais les planètes attire aussi, dans une autre mesure le soleil. Ceci conduisant à un mouvement oscillatoire de grande période, ce qui se traduit par la déviation du spectre reçu sur le spectrographe à cause de l'effet Doppler.

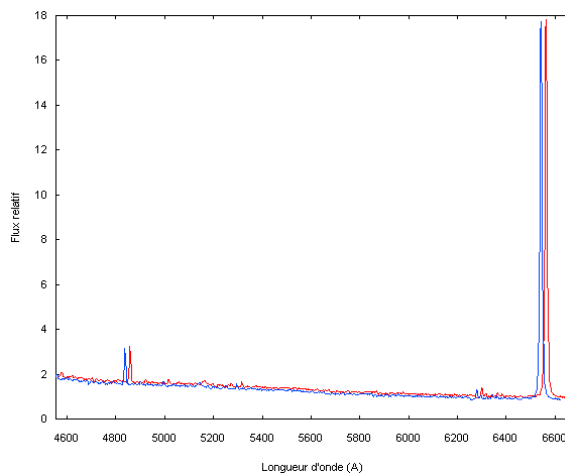
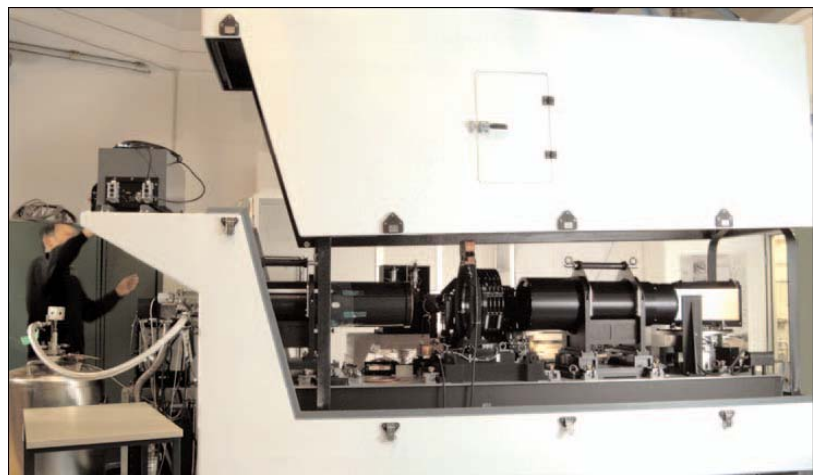


Figure 1 : Dérivation du spectre due à l'effet Doppler

Les mesures effectuées, actuellement avec les nouveaux spectrographes entrés en fonctions, sont de l'ordre de 1 m/s/nuit en mode différentiel sur des étoiles de magnitude 6.

Figure 2 : Une vue de GIRAFFE en cours de tests dans les locaux de l'ESO à Munich et juste avant son départ vers le Chili. Les dimensions de l'instrument sont de 4 m x 1,1 m x 2 m, sa masse 2 200 kg.

© Observatoire de Paris. ESO



Le spectrographe, en lui-même, nécessite une grande stabilité mécanique et thermomécanique, pour cela il est séparé de la partie télescope, mis dans une enceinte régulée et posée sur une table horizontale. La lumière provenant de la cible observée est amenée par une fibre optique afin d'être séparée par le réseau, le flux amené par la fibre doit, par conséquent, être d'une grande stabilité et homogénéité. Ainsi, de simples variations du barycentre du flux sortant de la fibre, ayant les mêmes conséquences que l'effet Doppler sur le spectrographe, entraînerait des erreurs de mesures de l'ordre de plusieurs dizaines de m/s/nuit.

2 Résumé

Comme évoqué précédemment, la variation du barycentre du flux sortant de la fibre en provenance du télescope peut avoir des effets désastreux sur les mesures. Ce travail de diplôme, s'inscrivant dans la continuité du travail de semestre (en annexe), consiste à élaborer un système d'injection et d'imagerie pour fibres optiques, dans le but d'étudier ces dites variations du barycentre, en fonction de la position, de l'angle et du type d'entrée de la lumière dans la fibre. Il devra être possible, dans le montage optique, de choisir entre une injection de lumière de type champ proche (near field) ou champ lointain (far field), en interchangeant rapidement des éléments optiques. Il en sera de même pour le système d'imagerie de la sortie de la fibre. Les éléments principaux, comme les connecteurs de fibre et le capteur CCD, ne doivent être déplacés que le moins possible.

De plus, la prise et la gestion des données devront être automatisées à l'aide d'une interface sur PC afin d'effectuer des campagnes de mesures de plusieurs heures, voir plusieurs jours, sans intervention externe. L'ensemble des données récupérées doivent être sauvegarder à l'aide d'un protocole robuste, pour éviter la perte intempestives de données en cas d'erreurs systèmes. une méthode d'archivage automatique des données devra être mise en place, avec dates et heures des sauvegardes.

2.1 Performances recherchées

Pour valider le travail de diplôme, le système doit remplir un certain nombre d'exigences de performances :

- le système doit être capable de mesurer des variations du barycentre du flux lumineux en sortie de la fibre de test, de l'ordre du $1/1000^{\text{ème}}$ du diamètre du noyau (core) de la fibre, soit pour une fibre de $70\ \mu\text{m}$. une variation de $70\ \text{nm}$.
- La taille de l'image de la source lumineuse sur l'entrée de la fibre de test doit être d'environ le $1/10^{\text{ème}}$ du diamètre du core de la fibre, pour la configuration near field, soit pour la même fibre, un spot de $7\ \mu\text{m}$. sur la surface de la fibre.
- Le montage doit être stable à longue durée. Les variations, ou instabilités mécaniques et thermomécaniques totales du banc, lors des sessions de mesures de plusieurs heures, ou même jours, de doivent pas induire d'erreurs suffisamment importantes pour sortir des spécifications de précision.

2.2 Principes du système

Le schéma-bloc suivant décrit les différentes parties du banc optique du système développé lors du travail de semestre et de diplôme.

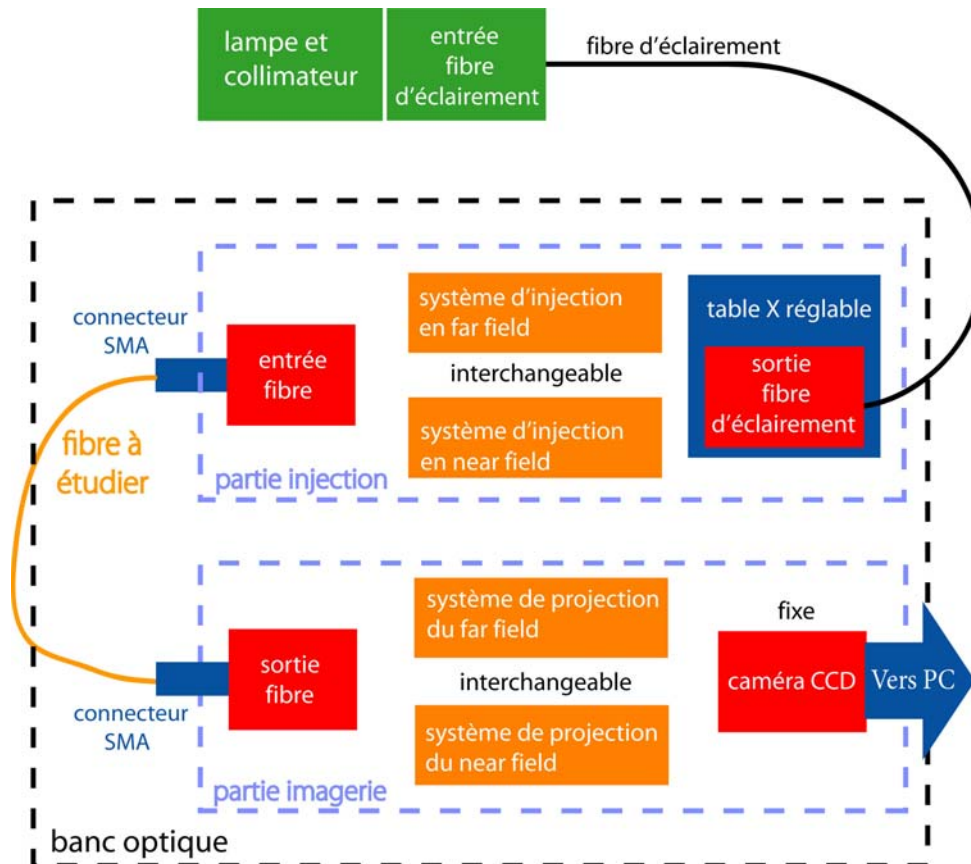


Figure 3: schéma d'ensemble du système optique

Les couleurs du schéma précédent, représentent le niveau de stabilité mécanique demandé pour atteindre les performances requises pour les mesures :

- Les éléments rouges demandent une stabilité thermomécanique de l'ordre du micron, 2 microns tout au plus.
- Les éléments oranges demandent des tolérances de placement de l'ordre du centième ou plus.
- Les éléments en verts, représentent ceux dont on ne demande pas de stabilité particulière.

A la sortie du système optique, l'image de la sortie de la fibre de test est capturée par la caméra CCD, puis envoyée vers le PC, afin d'être traitée à l'aide d'une interface Matlab, pour en calculer son barycentre.

L'interface permet aussi de récupérer les données des capteurs de position de la table X et de température situés sur le banc, pour effectuer des corrélations entre la courbe du barycentre et les courbes de variation des autres paramètres, lors des analyses ultérieures. L'ensemble des données d'une session de mesures sont archivées automatiquement, sous forme de fichier .mat, dans le but de faciliter les analyses à posteriori.

Le projet sera donc séparé en quatre parties distinctes :

- le design optique, effectué en utilisant le logiciel de simulation de système optique ZEMACS.
- Le design mécanique, réalisé en regard des résultats obtenus avec ZEMACS et des contraintes de construction imposées par le cahier des charges. Le modèle virtuel ainsi, que les pièces mécaniques, ont été réalisés à l'aide du logiciel de construction SOLIDWORKS.
- La programmation, dans le but d'automatiser la prises des données, leurs traitements, et leur stockage. Tout ceci à été coordonné à l'aide d'une interface graphique créée grâce au logiciel MATLAB.
- La campagne de test de stabilité, effectué dans une salle régulée en température et humidité. L'étude des résultats, pour la validation du projet, se fera donc dans cette dernière partie

3 Design optique

Le design optique du banc doit répondre à un ensemble de contraintes imposées par le cahier des charges, que ce soit sur le plan de la qualité et du piqué des images créées, que sur le plan des distances imposées.

Il peut se séparer en deux partie distinctes :

- Une partie injection, simulant un télescope imageant une étoile située à l'infini, sur l'entrée de la fibre de connexion du spectrographe.
- Une partie imagerie, développer lors du travail de semestre, ayant pour but de créer une image de la sortie de la fibre sur le capteur CCD, afin d'en détecter son barycentre.

3.1 Partie injection

Le but premier du système d'injection est de simuler les effets produits sur l'entrée de la fibre par des erreurs d'alignement d'un télescope visant une étoile située à l'infini. De plus, dans la pratique le télescope possède à son plan focal image, un système permettant d'invertir la configuration d'entrée (near field ou far field) de la lumière dans la fibre.

En effet, dans un système réel, le système de tracking ou les vibrations de la structure du télescope peuvent entraîner un décentrage de l'étoile par rapport à son axe optique propre ayant pour conséquence un déplacement du spot ou une inclinaison du faisceau lumineux injecté dans la fibre, suivant le type de configuration.

Pour recréer un télescope en miniature, nous avons utilisé un objectif de microscope corrigé à l'infini pour le système de focalisation, la pupille d'entrée créée normalement par le miroir primaire est simulé par un trou circulaire de 0.6 mm. dans une plaque métallique.

L'étoile est, pour sa part, élaborer à l'aide d'une fibre optique de 50 μm . de core placée sur le plan focale objet d'une lentille afin de renvoyer son image à l'infini.

Ensuite, pour reproduire le décentrage de l'étoile, nous avons monté la sortie de la fibre « étoile » sur une table linéaire micrométrique. En fait, pour copier le mouvement exact du télescope, il faudrait effectuer un tilt sur un axe vertical, situé au centre de l'objectif, de la fibre de lumière ou du système de projection complet (objectif, stop et fibre de test), mais en

vue de l'étendu des déplacements demandés (300 μm .), et des instabilités causées pas un tel système, un déplacement transversale linéaire a été préféré.

Le système d'injection est donc composé de deux configurations interchangeables, une configuration d'injection en near field et une d'injection en far field. Les principaux défis du design ont été de conserver la distance entre la surface de la fibre d'illumination et celle de la fibre de test constante, et d'obtenir des ouvertures d'entrée de la lumière proche des ouvertures des systèmes réels soit environ $f/10$.

3.1.1 Injection near field

Le principe de l'injection de lumière en near field consiste, dans la réalité, à créer l'image de l'étoile visée directement sur la surface de l'entrée de la fibre.

Dans notre cas nous avons créé une image de la fibre de lumière directement sur la surface de la fibre de test. Le cahier des charges impose que le spot sur la fibre ne doit pas être plus large que le 1/10 ème du diamètre de la fibre de connexion soit un spot de 7 μm . pour la fibre de test de 70 μm .

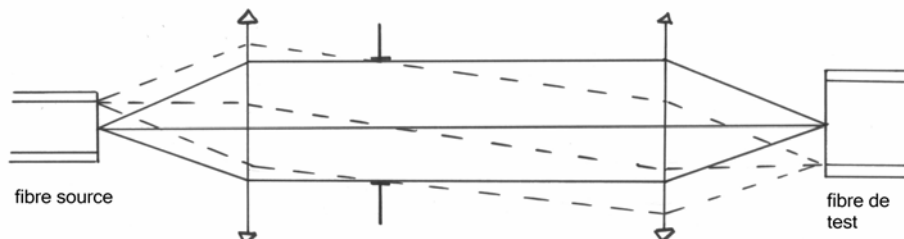


Figure 4: schéma de principe de l'injection near field

Après plusieurs itérations, afin d'obtenir un spot de la taille adéquate et permettant de balayer toute la largeur de la fibre en déplaçant la fibre source, nous obtenons sous Zemax le montage suivant :

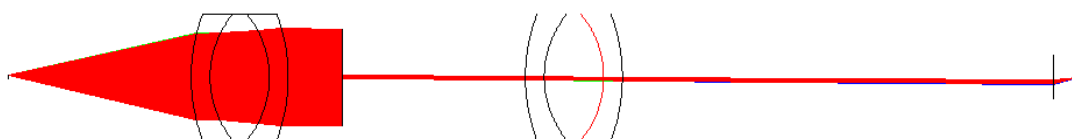


Figure 5: schéma Zemax du montage d'injection near field
(longueur du système 200 mm.),
la deuxième lentille ne possède pas de matière

Pour collimater le faisceau de sortie de la fibre d'illumination, nous utilisons un triplet de type Hastling, en plaçant la fibre sur le plan focale objet soit 34 mm. de la surface de la lentille.

Le stop sert ensuite à réduire l'ouverture du faisceau entrant dans la fibre.

Finalement, la focalisation du faisceau sur l'entrée de la fibre de test s'effectue à l'aide d'un objectif de microscope corrigé à l'infini.

Le spot obtenu possède, par simulation, un diamètre théorique de 5.5 μm .

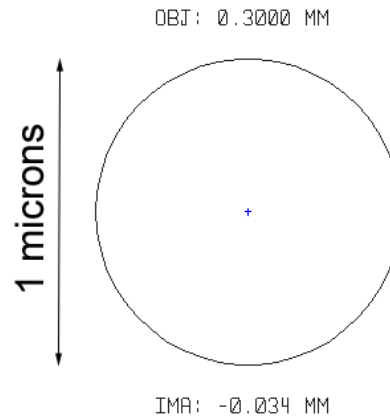


Figure 6: figure représentant l'image d'un point de la source sur la surface de la fibre de test

Sur cette figure représentant l'image d'un point de la fibre de lumière sur la fibre de test, on peut noter que l'image obtenue par la combinaison triplet-objectif est de très bonne qualité, en vu du diamètre du cercle d'Airy (en noir) de 1 micron de diamètre.

Calcul de la valeur réelle du diamètre du spot avec la diffraction de l'objectif :

La résolution du microscope sachant que le rayon de la tache d'Airy est donnée par la formule :

$$r = \frac{1.22 \cdot \lambda}{2 \cdot NA} = 0.61 \mu m.$$

Avec : $\lambda = 650 \cdot 10^{-9} nm$.

$NA = 0.65$ pour l'objectif X40 corrigé à l'infini

Ce qui nous donne un diamètre de la tache d'Airy de $1.22 \mu m$.

On obtient donc un spot total de **$6.72 \mu m$** .

On peut voir, ci dessous, les conséquences du déplacement de la fibre source de 0.3 mm. grâce à la table linéaire :

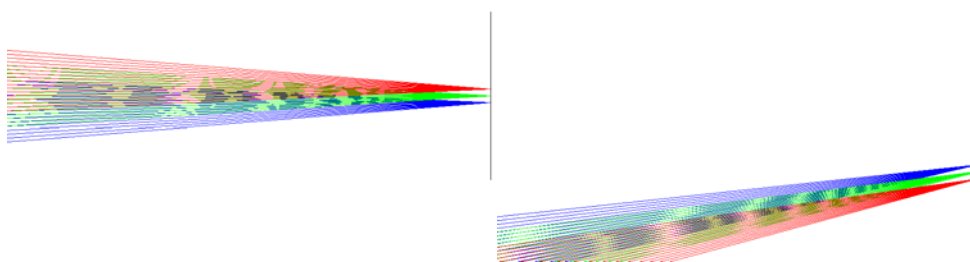


Figure 7: schéma Zemax montrant les effets du déplacement de la source sur le flux d'injection

Dans la simulation, un déplacement de 0.6 mm. permet de balayer toute la largeur de surface de la fibre à tester. On observe aussi une inclinaison moyenne du faisceau de 15° , lorsque le spot d'entrée se situe sur la périphérie du core.

3.1.2 Injection far field

Dans la pratique, le télescope du spectrographe possède à sa sortie un système interchangeable permettant de créer une image du miroir primaire sur la totalité de la surface du core de la fibre de connexion, en d'autres termes le flux lumineux en provenance de l'étoile visée est réparti sur la surface de la fibre.

Le problème, dans notre cas, est que la distance entre l'objectif de microscope et l'entrée de la fibre est d'environ de 0,5 mm. ce qui rend impossible l'intercalage d'un système optique, à moins de déplacer le connecteur, déplacement exclu par le cahier des charges. Nous avons donc choisi d'intercaler entre le stop circulaire et l'entrée de l'objectif, une lentille supplémentaire, dans le but de créer une image virtuelle du stop à l'infini, afin de la projeter sur l'entrée de la fibre de test.

Le système stop-lentille-objectif-fibre étant fixe, les effets causés par la lentille sont

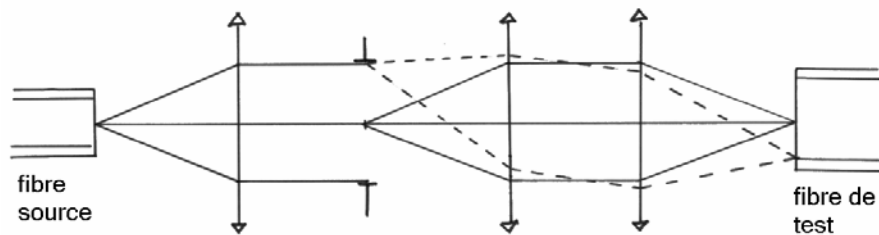


Figure 8: schéma de principe de l'injection far field

identiques à un système apposés à la sortie de l'objectif.

Nous obtenons donc avec le simulateur ZEMACS le montage suivant:

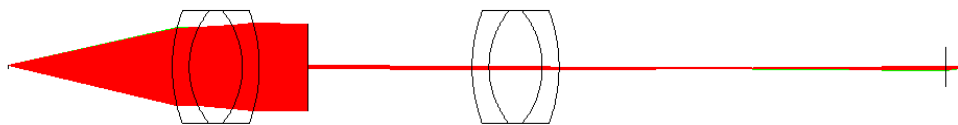


Figure 9: schéma Zemax du montage d'injection far field
(longueur du système 200 mm.)

Nous pouvons remarquer l'utilisation d'un deuxième triplet Hastings (choisis pour leurs qualités d'imagerie et de collimation pour les faibles ouvertures) afin de renvoyer le stop à l'infini. Il suffira donc de retirer ce triplet pour retomber dans la configuration near field.

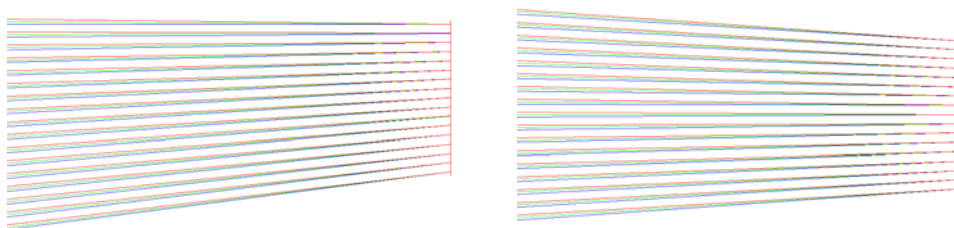


Figure 10: figure ZEMACS montrant l'effet d'un déplacement de 0.3 mm. de la fibre de lumière sur le flux entrant

On note que pour un mouvement longitudinal de 0,3 mm. par rapport à l'axe optique de la source lumineuse n'entraîne donc pas de déplacement de la position de l'image du stop, par contre entraîne une déviation angulaire de environ 4° .

3.2 Partie imagerie

L'étude de la partie imagerie du système a fait partie du travail de semestre, tant pour le design optique, que pour le choix de la caméra. L'intégralité de ce travail est fourni dans les annexes.

4 Design mécanique

Le design mécanique du système du système doit répondre à deux critères principaux :

- Une modularité du montage, les éléments du système doivent pouvoir être changés et alignés facilement avec une intervention minimale sur les modules principaux (les connecteurs de fibre, la caméra CCD, ainsi que leurs supports), afin d'intervertir les configurations (near field et far field) rapidement.
- Le système doit posséder une très grande stabilité mécanique et thermomécanique, l'axe optique du système devra donc être à une hauteur minimale afin de minimiser l'épaisseur de matière pouvant induire des déplacements par dilatation.

Le choix des matériaux est aussi prépondérant dans les performances du système, ils doivent posséder une bonne stabilité mécanique pour tenir les éléments sans engendrer de problème de flexion, et ils doivent aussi posséder des coefficients de dilatation les plus faibles possibles, pour éviter au maximum les instabilités thermiques du montage. Nous nous sommes donc tournés vers l'utilisation de matériaux connus pour leur grande stabilité et déjà grandement éprouvé dans les montages optiques de haute précision, l'Invar pour les pièces métalliques à usiner, et le Zerodur pour le plateau de support du montage.

L'invar est un alliage ferronickel contenant 36% de nickel, inventé à l'origine, pour les pièces mécaniques d'instrument de métrologie, utilisé par la suite dans l'horlogerie, est connu pour sa faible dilatation et sa grand rigidité. En effet il possède un coefficient de dilatation à 20°C de $\alpha=1\cdot 10^{-6} / \text{K}$, donc dix à douze fois inférieur à celui de l'acier, et un module d'élasticité de 145 Gpa, équivalent à un acier inox standard.

Le Zerodur est un type de verre possédant un coefficient de dilatation proche de zéro pour des températures ambiantes $\alpha = 0.02\cdot 10^{-6} / \text{K}$. Il servira de substrat stable pour le montage, les différents éléments seront en effets collés à même la plaque de Zerodur, sans usinage.

Le système, une fois monté, prend la forme suivante :

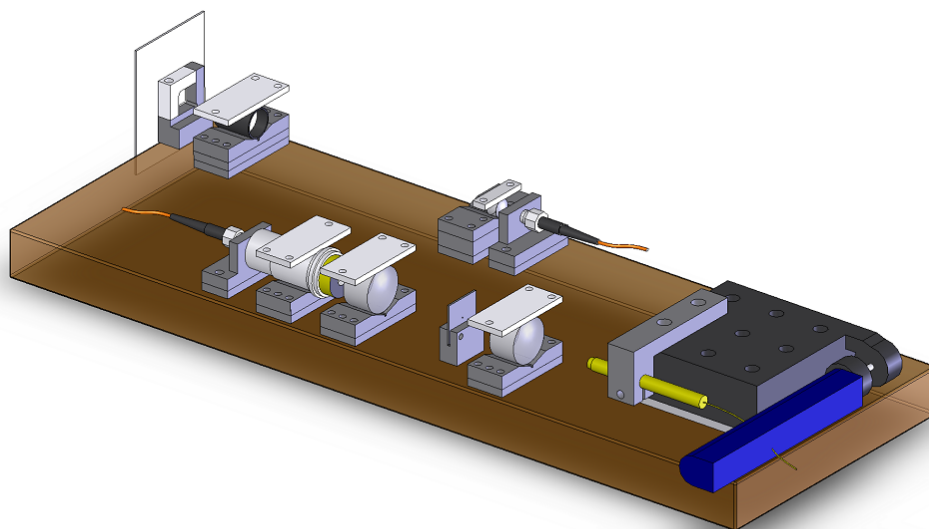


Figure 11: vue d'ensemble du système monté

4.1 Montage des lentilles et des objectifs

Dans le but de faciliter le montage des éléments optiques, les lentilles seront placées dans un sillon en V pour garantir le positionnement axial et permettre un déplacement longitudinale pour les réglages éventuels des distances. Afin d'obtenir un maintien efficace en trois points d'appui, une plaquette d'aluminium vissée permet l'appui de la lentille sur le fond du sillon. Ensuite, l'ensemble des pièces nécessitant un démontage pour changer les configurations du système, seront vissées sur une plaquette de fixation collée à l'Araldite directement sur le support en Zerodur.

Afin de garantir, la hauteur de l'axe des éléments des cales ont été ajoutées entre le V et la plaquette de fixation, pour le montage de la petite lentille et du barillet de doublets

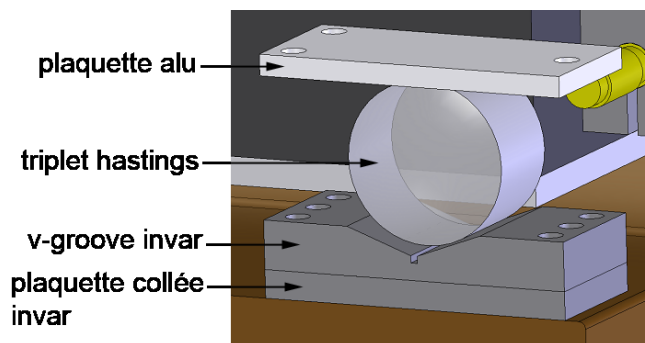


Figure 12: montage des triplets Hastings

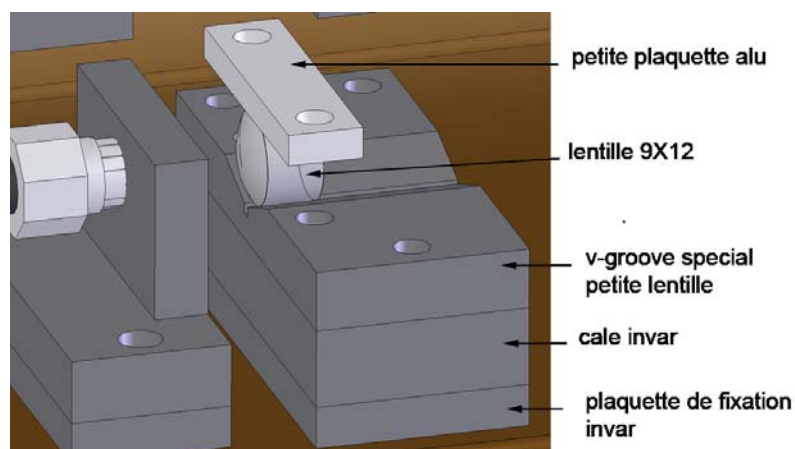


Figure 13: montage de la lentille 9X12

Pour faciliter le montage de la paire de doublet, nous les avons d'abord placés dans un système de barillet, afin de garantir leurs espacements et leurs alignements avant des les fixer sur le V.

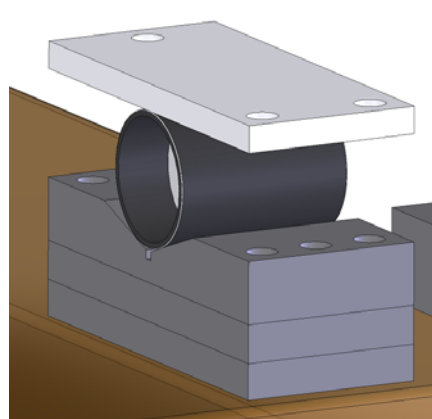


Figure 14: montage du barillet contenant la paire de doublets

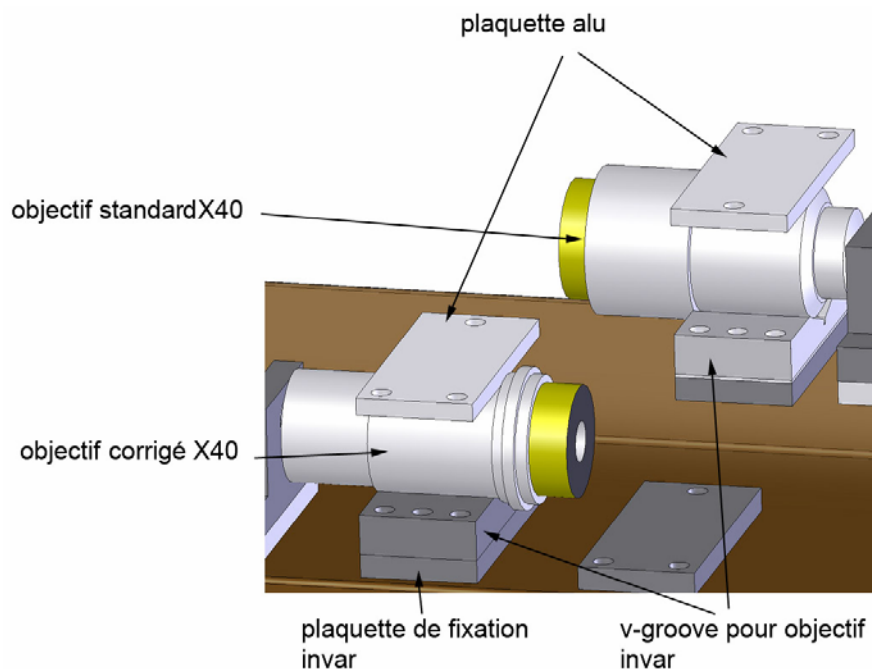


Figure 15 : montage des objectifs de microscope

Les objectifs ont été fixés de la même manière que les lentilles, dans un sillon en V, d'épaisseur spécifique. Le positionnement longitudinal est garanti par la géométrie même des objectifs.

4.2 Montage de la caméra CCD

Le cahier des charges exige un montage de la caméra permettant de garantir la stabilité de l'image sur une longue durée. En vue des déplacements permis pour atteindre les performances requises (moins de $1\mu\text{m}$.), l'utilisation du système de fixation intégré de la caméra est à bannir, à cause du jeu dans le pas de vis et de l'échauffement assez prononcé du boîtier. Nous avons donc décidé de construire des pièces permettant de tenir directement, dans une sorte d'étau, le chip de la caméra.

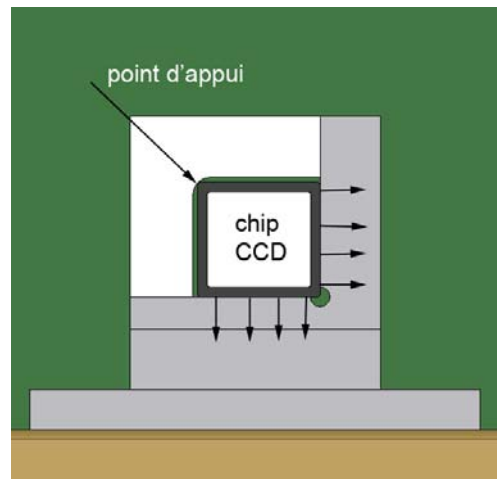


Figure 16: montage du chip CCD

Le système permet donc de maintenir le chip appuyé sur une équerre en Invar solidaire du support en Zerodur par collage.

Pour éviter les problèmes de court-circuits, nous avons recouvert la face en contact avec la plaque du circuit intégré, ainsi que les faces intérieures de l'étau de scotch isolant électrique.

4.3 Montage de la fibre source

Sur une première approche, nous avons décidé d'effectuer le scanning de la surface de la fibre en déplaçant le connecteur de la fibre de test, grâce à une table deux axes piézoélectrique, mais cela créait des incohérences avec le modèle réel et rendait impossible la création d'un système d'injection en far field.

En prenant pour hypothèse, que le comportement de la fibre vis à vis de la position du point d'entrée du flux sur sa surface est symétrique par rapport à son centre, un déplacement linéaire transversal de 0.3mm. par rapport à la position centrée est suffisant pour scanner l'intégralité du rayon du core de la fibre de test.

Finalement, nous avons décidé de rendre solidaire le connecteur de la fibre de test avec l'ensemble du système de projection, et de scanner la largeur de la fibre en déplaçant la source lumineuse à l'aide d'une table linéaire commandé par un vérin motorisé.

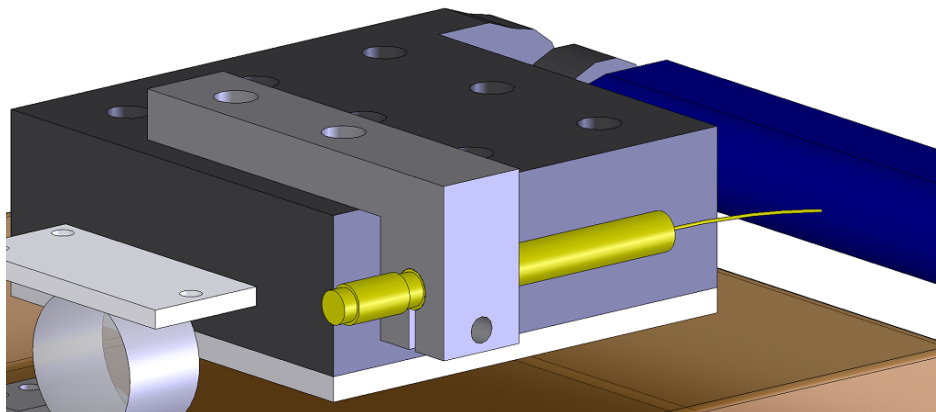


Figure 17: montage du connecteur chuck de la fibre source sur la table linéaire

Nous avons choisi, pour le maintien de la fibre source de 50 μm . de core, l'utilisation du connecteur de type chuck pour sa facilité de montage et le bon positionnement garanti de la fibre. Ce connecteur cylindrique se retrouve donc vissée sur la partie supérieure de la table linéaire grâce à une équerre en invar. La table motorisée elle-même fixée sur la plaque en Zerodur à l'aide d'un jeu de plaquette collée.

Cette table motorisée nous permettra donc d'effectuer des mouvements suivant l'axe X, commandés par le vérin électrique de 12 mm. de course (amplement suffisant en vue des 0.3 mm. nécessaires), la précision du positionnement transversale de la source est d'environ 4 μm . (cf. datasheet du vérin électrique en annexe).

Le manque de temps, et de ressources extérieures ne nous a pas permis d'intégrer la commande du vérin dans le programme, en attendant une carte de commande, nous utiliserons une vis micrométrique pour effectuer les déplacements de la table. Ce qui n'est pas dérangeant vu que les tests s'effectueront seulement sur la stabilité du système.

4.4 Montage des connecteurs de la fibre de test

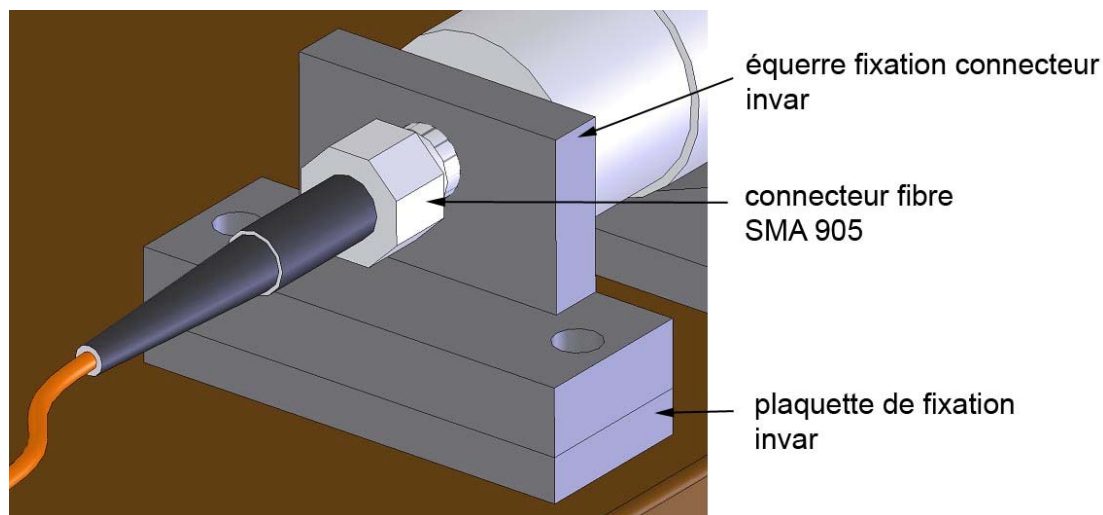


Figure 18: montage des connecteurs SMA de la fibre de test

La hauteur et le positionnement de la fibre sont garantis à l'aide du support de connecteur équerre en invar. Pour permettre l'alignement du système, le support doit pouvoir être retiré, il est donc vissé, comme la plupart des éléments, sur une plaquette en invar collée sur la plaque de base.

4.5 Calculs de la stabilité thermique du banc optique

Dans ce paragraphe nous allons étudier, par le calcul, les conséquences des variations thermiques du système sur l'alignement du système optique.

Le système d'imagerie étant le plus critique, à cause des distances de projection, notamment en configuration near field, sera étudié en détail. Si les résultats sont concluants, on pourra en déduire que la partie injection ne devra pas poser de problèmes particuliers de stabilité.

4.5.1 Variation thermique en flexion du système d'imagerie

Nous étudions dans ce cas la flexion du banc, en prenant pour hypothèse qu'il se crée un Δt de 1°C entre la face inférieure et supérieure de la plaque de support en Zerodur.

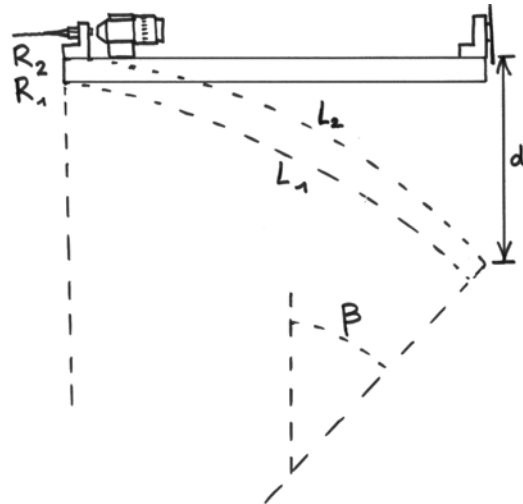


Figure 19: schéma d'étude de la flexion du système d'imagerie

On prend pour le Zerodur un coefficient de dilatation $\alpha = 0.02 \cdot 10^{-6} / \text{K}$.

Pour un ΔT de 1°C le dessus de la plaque s'allonge de :

$$\Delta l = \alpha \cdot \Delta T \cdot l_0 = 3.9 \cdot 10^{-9} \text{ m.}$$

avec $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ et $l_0 = 195 \text{ mm}$.

Ce qui nous donne, après le calcul des rayons des surfaces de la plaque et en considérant que la surface inférieure de la plaque ne bouge pas : $\beta = 30.42 \cdot 10^{-9} \text{ rad}$.

Par conséquent, on trouve : $d = R_2 - R_1 \cdot \cos \beta = 2.84 \cdot 10^{-9} \text{ m}$.

Ce qui correspond, en rapportant la distance à l'échelle des pixels du capteur CCD, à une variation d'environ $1/2500^{\text{ème}}$ de pixels sur la hauteur de l'image, nous entrons largement dans les spécifications demandée qui sont de l'ordre de $1/10^{\text{ème}}$ de pixels.

4.5.2 Variation thermique de la hauteur de l'axe optique du système d'imagerie

Une dilatation thermique des pièces de support des éléments du banc peut entraîner une déviation de l'axe optique, et par conséquent un déplacement de l'image.

Dans le système d'imagerie, le point le plus problématique est la création d'une différence de hauteur entre la sortie de la fibre et objectif de microscope servant à la projection de l'image, dans la configuration near field. En effet, la moindre variation se trouve amplifiée par le grandissement du système (40 fois dans notre cas).

Dilatation du support du connecteur de fibre dans l'axe Y:

$$\Delta l_c = \alpha \cdot \Delta T \cdot l_0 = 0.02 \cdot 10^{-6} \text{ m.}$$

avec : $\alpha = 1 \cdot 10^{-6} / \text{K}$ pour l'Invar
 $\Delta T = 1^\circ\text{C}$

$$l_0 = 20 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Dilatation du support de l'objectif de microscope suivant l'axe Y :

$$\Delta l_o = \alpha \cdot \Delta T \cdot l_0 = 0.007 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

avec : $\alpha = 1 \cdot 10^{-6} / K$ pour l'Invar

$$\Delta T = 1^\circ C$$

$$l_0 = 7 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Ce qui nous donne un déplacement différentiel de $\Delta l_c - \Delta l_o = 0.013 \cdot 10^{-6} \text{ m}$.

Par conséquent, au niveau du CCD un déplacement de $40 \cdot 0.013 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 0.52 \cdot 10^{-6}$

De plus, la dilatation du support de capteur CCD ne fait qu'accentuer le phénomène.

Dilatation du support du CCD suivant l'axe Y :

$$\Delta l_o = \alpha \cdot \Delta T \cdot l_0 = 0.015 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

avec : $\alpha = 1 \cdot 10^{-6} / K$ pour l'Invar

$$\Delta T = 1^\circ C$$

$$l_0 = 15 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

On obtient donc, en cumulant les effets de la dilatation des différentes pièces un déplacement de $0.52 \cdot 10^{-6} + 0.015 \cdot 10^{-6} = 0.53 \cdot 10^{-6} \text{ m}$. de l'axe optique sur le CCD, le tout correspondant à environ $1/10^{\text{ème}}$ de pixels de déplacement de l'image.

Ce résultat étant trop proche des caractéristiques critiques, il sera préférable de placer le système dans un environnement régulé en température.

4.6 Procédure d'alignement

Dans le but de faciliter la réutilisation ultérieure du banc pour une phase de caractérisation réelle des fibres, nous avons édité une procédure d'alignement des éléments optiques en précisant les points garantis du système.

Nous avons utilisé, pour permettre l'alignement des éléments même en présence de lumière extérieure, une source laser externe injectée directement dans la fibre de test (penser à prévoir à l'avenir, la conception d'un module externe d'injection laser plus fiable qu'un alignement manuel du laser avec la fibre).

Nous avons utilisé directement le logiciel de capture fourni avec la Lumenera, il permet d'obtenir une image dynamique de la sortie ce qui évite des corrections trop importantes. Par contre, pour un alignement directement depuis l'interface Matlab, il est conseillé d'effectuer les captures d'image en mode 8 bits, le mode 16 bits effectuant des séries de calculs supplémentaires se révèle assez lents (nous avons vite tendance à perdre patience en attendant l'affichage de l'image).

Il faut signaler que les distance entrant en jeu pour le placement des éléments sont de l'ordre des centièmes, en raison de l'absence de systèmes de réglage optique traditionnels, il faudra donc faire preuve de beaucoup de patience et de minutie dans les phases de focalisation avec les objectifs par exemple.

4.6.1 Alignement de la partie imagerie

Pour l'alignement de la partie imagerie, nous avons injecté directement un laser à l'entrée de la fibre de test, dans le but d'augmenter le contraste et de faciliter les opérations de montage, même dans un environnement lumineux.

4.6.1.1 Alignement du near field

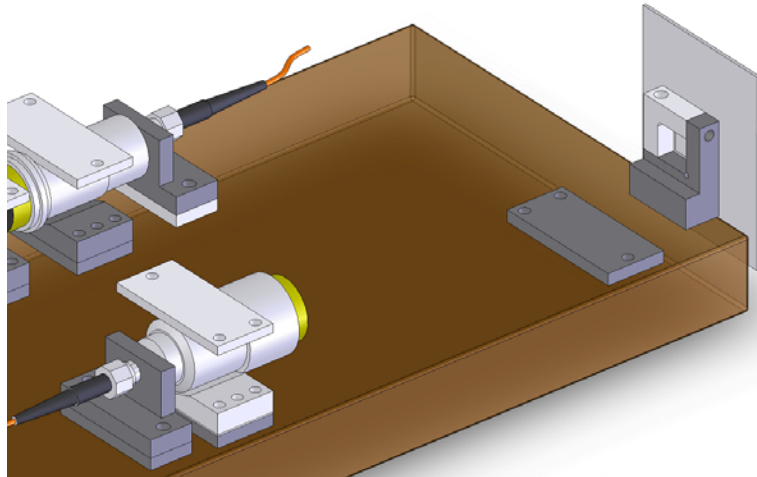


Figure 20: montage du système pour l'imagerie en near field

Pour effectuer une image du near field, il faut simplement monter l'objectif de microscope sur la plaque proche du support du connecteur.

Il faut tout d'abord placé le connecteur SMA de la fibre de test sur le support, normalement la distance de focalisation (195 mm. entre la surface de la fibre et le capteur CCD) est garantie si le connecteur et le support sont bien vissés, ensuite il faut aligner l'objectif, l'alignement de l'axe s'effectue assez facilement, en utilisant le programme fourni avec la caméra Lumenera, pour trouver le bon point de focalisation de l'objet il faut déplacer l'objectif suivant l'axe optique (pas évident ...) jusqu'à l'obtention de speckles et du contour de l'image bien nets, tout en sachant que la distance de travail de l'objectif utilisé est de 0.57 mm. (l'utilisation de cale d'épaisseur est risquée et pourrait occasionner des rayures sur la surface de la fibre).

Une fois le système entier aligné l'image obtenue doit ressembler à ceci :

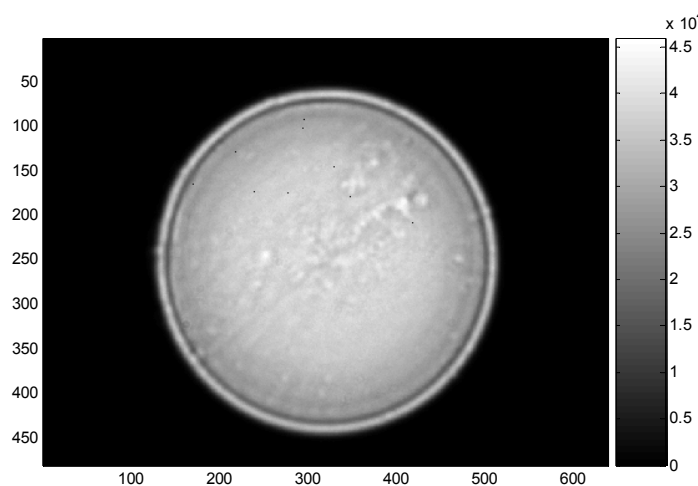


Figure 21: image obtenue en configuration imagerie nearfield

4.6.1.2 Alignement du far field

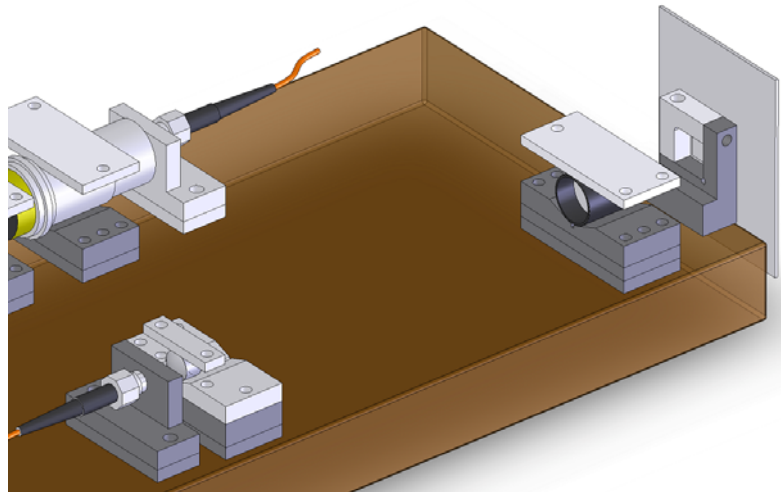


Figure 22: montage du système d'imagerie en far field

La difficulté principale pour l'alignement du far field, réside dans le fait que nous devons projeter une image aérienne sur le CCD. La petite lentille sert à réduire l'ouverture du faisceau de la fibre, pour diminuer la taille de l'image du far field, la paire de doublet sert ensuite, à projeter cette même image sur le CCD.

Pour l'alignement, de la petite lentille il faut d'abord créer un faisceau divergent de petite ouverture, la surface de la fibre doit se trouver à 7.83mm. de la surface de la petite lentille 9X12 mm. .

Ensuite pour le placement du barillet, ne pouvant par déterminer la position exacte de l'image aérienne, nous avons placé une mire transparente sur le plan de l'image du far field (15mm. de la deuxième surface de la lentille). La distance focale est atteinte lorsque l'image de la mire apparaît nette sur le capteur. Voici les principales distances à respecter pour le placement des éléments (des cales d'épaisseur réglables peuvent être utilisées en prenant gare de ne pas rayer les lentilles).

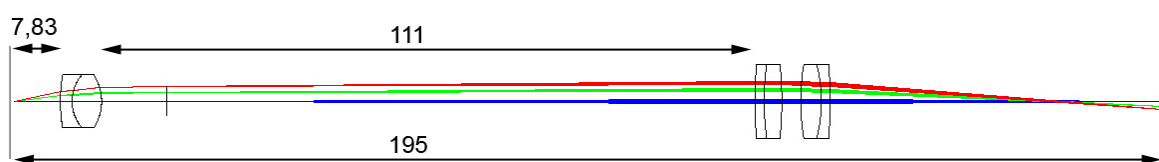


Figure 23 : distances à respecter pour le placement des éléments

Voici un exemple d'image obtenue pour une introduction du laser avec un angle par rapport à la normale de la surface de la fibre :

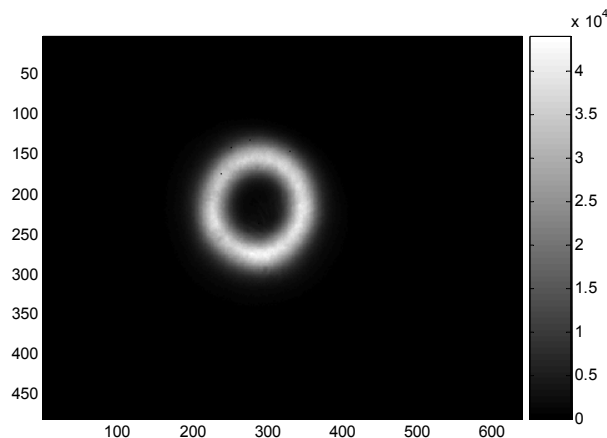


Figure 24: image de la projection du far field sur le CCD

4.6.2 Alignement de la partie injection

Pour l'alignement de la partie injection, nous avons aussi injecté le laser dans la fibre de test mais sur la sortie de la fibre. Ensuite, nous avons utilisé le principe de conjugaison d'un système optique, disant que si on crée une image d'une surface objet sur une surface image, le système fonctionne aussi dans le sens inverse.

4.6.2.1 Alignement du near field

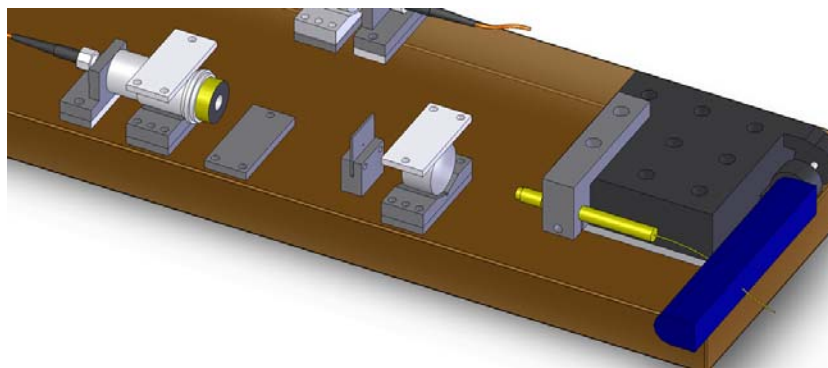


Figure 25 : montage du système d'injection en near field

Pour la première partie de l'alignement il faut d'abord garantir que la source et le premier triplet de collimation soit sur le même axe.

Il faut dans un premier temps retirer le support du connecteur et l'objectif de microscope, puis placer le triplet à 34 mm. de la surface de la fibre de lumière à l'aide d'une cale d'épaisseur réglable (vérifié que le faisceau est bien collimater, diamètre de la tache constant même à grande distance).

Ensuite, pour aligner l'objectif, il faut placer un panneau réflecteur à une bonne distance du banc (1 m. pour nos essais), en utilisant la lumière (assez faible) émise par la fibre source une tache est créée. Puis déplacer l'objectif jusqu'à ce que la tâche soit aligner avec les trois éléments (pour indication, la distance de travail de cet objectif est de 0.49 mm.).

Il faut maintenant placer le stop après le triplet, en gardant la même configuration, la tâche créée sur l'écran se rétrécit, il faut maintenant faire en sorte que la nouvelle tache soit aussi aligner avec les composants (attention, il faut aussi effectuer l'alignement en hauteur, ce qui

est plus difficile, nous avons utilisé un pointeur laser à disposition visant l'écran, en essayant de conserver un parallélisme entre les axes des éléments et le faisceau laser, ensuite par un report de distance, nous avons aligné la hauteur).

Finalement pour aligner la fibre, nous avons injecté un laser à sa sortie, comme évoqué précédemment, en utilisant le principe de conjugaison, une image de la fibre de test se forme sur la surface du connecteur, il faut maintenant déplacer le connecteur suivant l'axe optique pour que l'image créée soit la plus petite possible et centrée sur la sortie de la fibre source.

Nous pouvons vérifier de plusieurs manières la position au point de focalisation :

- En utilisant un radiomètre sur l'entrée de la fibre source, lorsqu'un maximum de puissance transmise est enregistré, c'est que la fibre de test est bien focalisée.
- En imagerie far field, l'image observée est une tache ne présentant pas d'effet de circularisation
- Un déplacement de la fibre source de 0.6mm. avec la table linéaire permet de traverser toute la fibre.

4.6.2.2 Alignement du far field

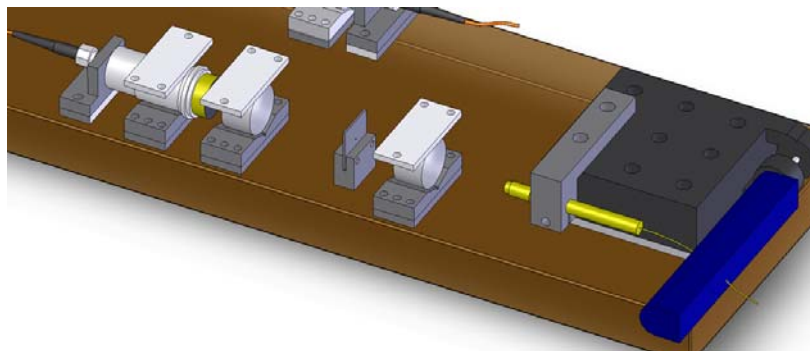


Figure 26: montage du système d'injection en far field

L'ajout du deuxième triplet permet donc de passer en configuration far field. Pour l'alignement du triplet supplémentaire nous avons testé deux méthodes différentes :

- Une méthode directe utilisant le système monté en imagerie far field, la lentille est déplacée jusqu'à ce que l'image sur le CCD ne présente plus qu'une tache circulaire, et possède la plus grande intensité.
- La deuxième méthode est inverse, nous créons une image du far field de la fibre de test sur le stop. La lentille est alignée lorsque le trou du stop se situe au centre de l'image et que le diamètre de l'image est minimum (cette deuxième méthode est moins efficace que la première et ne permet pas de garantir efficacement la focalisation du triplet).

L'alignement du système d'injection est facile à réaliser, par contre il est assez difficile de garantir une bonne focalisation du stop sur la surface totale de l'entrée de la fibre de test.

Voici, ci-dessous, les distances à respecter pour l'alignement des éléments du système d'injection, les distances non indiquées sur le schéma ne possèdent pas de contraintes nécessaires vu que théoriquement la majorité des faisceaux sont collimatés.

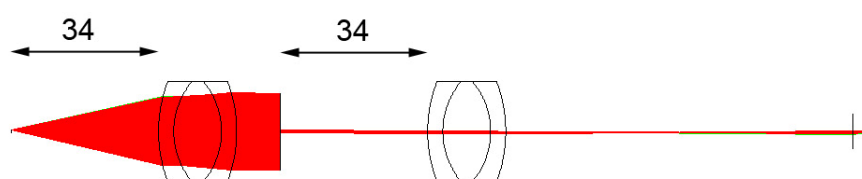


Figure 27: distances des éléments du système d'injection far field

5 Software

Etant donnés les temps de stabilisation du banc et la durée des campagnes de mesures, une automatisation complète du procédé d'expérimentation est nécessaire. C'est dans ce but qu'a été programmée une interface graphique utilisateur Matlab (GUI), permettant de régler tout les paramètres nécessaires à la prises des images, ainsi que d'afficher tous les résultats obtenus. Les valeurs des capteurs sont transmises à l'aide d'une carte d'acquisition National Instruments et de la data acquisition toolbox de Matlab.

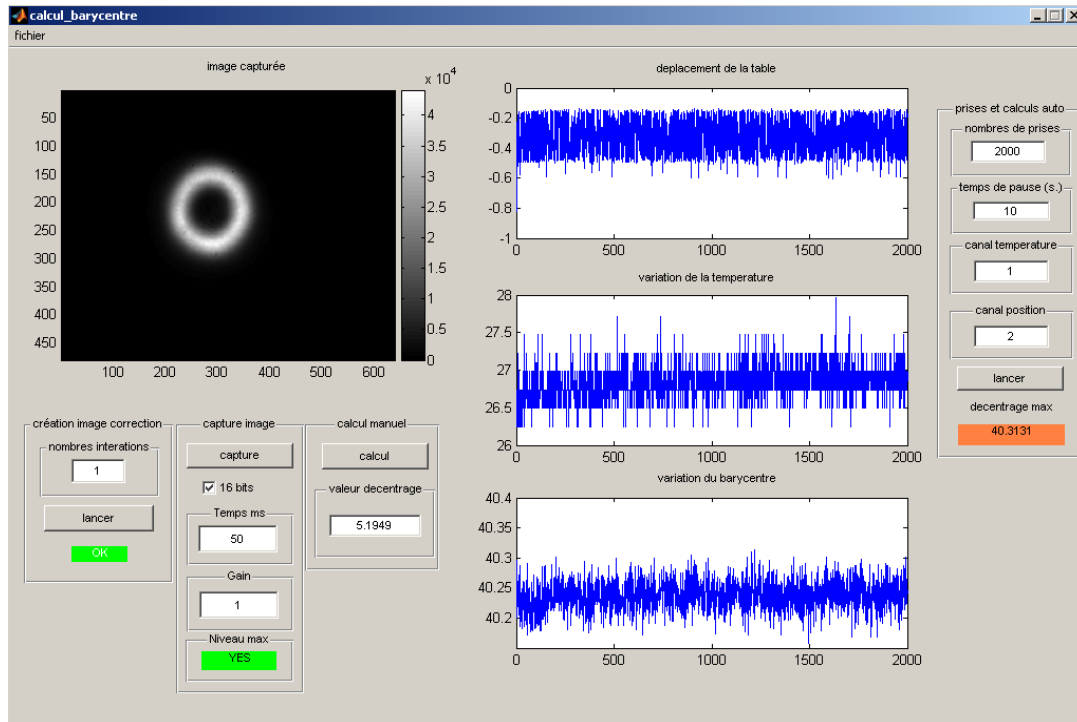


Figure 28: Capture d'écran de l'interface utilisateur créée sous Matlab

Ce software nous permet d'une part d'effectuer des mesures manuelles, mais aussi d'automatiser sur une période prédéfinie ces mêmes mesures en configurant le nombre d'itérations, ainsi que le temps de pause entre chaque séquence de prise d'image et de calcul.

5.1 Traitement des images

5.1.1 Capture et correction des images

La capture des images obtenues sur la caméra CCD Lumenera, s'effectue grâce à une série de fonctions Matlab créées par Sébastien Tanniger, pour le travail de diplôme nous nous sommes limité à l'utilisation des fonctions `lucamCameraOpen`, `lucamCameraClose` et `lucamTakeSnapshot` appelées depuis le module de capture. L'interface nous permet de régler les valeurs du temps d'exposition, du gain, et de la profondeur en bits des images capturées.

La configuration électronique de la caméra ne permettant pas de capturer les images directement en 16 bits, en effet, après analyse du code sources des plugins de la Lumenera, nous avons découvert qu'il n'était possible de remonter que des registres 8 bits depuis la caméra. Le problème a été résolu à l'aide d'une fonction supplémentaire nommée `ati` permettant de recomposer l'image, sachant que les images remontées directement depuis le

capteur CCD dans Matlab, dont la dimension de largeur est le double de la taille du capteur (1280 pixels contre 640 pour la taille du capteur) comporte en fait, alternativement deux colonnes de pixels représentant l'une le haut et l'autre le bas du registre de 16 bits de la colonne composant effectivement l'image. Nous avons donc recomposé l'image grâce à la fonction `ati` utilisant la formule : colonne (X) = 256 * colonne (X)+ colonne (X+1) en effectuant une boucle pour traverser toute l'image dans la largeur.

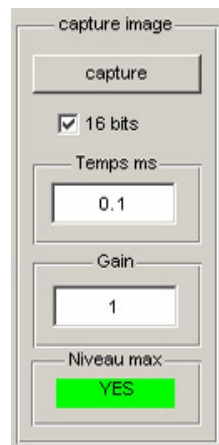


Figure 29 : panneau de configuration des paramètres de la prise d'image manuelle

Le temps d'exposition peut prendre des valeurs entre 0.1 ms. et 8000ms., et le gain peut varier entre 1 et 24. Le voyant niveau max. indique, en passant à rouge, si le niveau de saturation a été atteint lors de la prise de l'image. Ces valeurs sont stockées dans la structure prédéfinie de contrôle `snapshot_structure` utilisée dans la fonction de capture `lucamTakeSnapshot`.

Le bouton capture appelle la fonction `plotcamera` utilisant les paramètres de capture, permettant de créer une matrice de la taille de l'image qui est ensuite affichée dans l'interface.

Les images ainsi capturées sont corrigées par la multiplication pixel par pixel, par un masque pré calculé permettant d'éliminer les défauts de la caméra, afin de permettre un calcul plus précis et plus fiable du barycentre.

5.1.2 Création du masque de correction

Du premier abord la caméra Lumenera ne semblait pas posséder de défauts particuliers, mais c'est en effectuant les premières captures dans le format 16 bits que les problèmes ont commencé à apparaître. Des pixels, dit morts (dead pixels), nous renvoyaient des valeurs aberrantes, et non stables, pouvant perturber grandement la précision du calcul du barycentre. Nous avons donc décidé de créer un système de masque permettant d'annuler la valeur des pixels défectueux. Nous en avons profité pour corriger, de la même manière, les pixels présentant des variations trop importantes lors de plusieurs séquences d'image du noir (dark field).

Pour la détection des pixels morts, nous avons simplement créé une fonction de seuil utilisant une seule image du dark field afin de trouver la position des pixels morts, dans le but de créer un premier masque, sous forme d'une matrice, de taille identique à celle de l'image capturée, de 1 et de 0 dont la distribution est identique à celle des pixels morts.

Ensuite, la détection des pixels dont la dispersion des mesures de l'intensité sur un nombre (réglable depuis l'interface) d'images du noir est créée par l'appel de la fonction Matlab `variance` depuis l'interface. Pour ceci, nous avons effectué un seuillage sur la valeur de l'écart type de chaque pixel sur l'intégralité des images donnée par la formule statistique:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

en prenant :n = nombre d'images.

x_i = la valeur de l'intensité du pixel.

De la même manière que précédemment nous avons créé un masque permettant d'annuler la valeur des pixels détectés.

Le masque finale servant à la correction des images prises par la caméra a été obtenue en multipliant éléments par éléments les deux matrices obtenues précédemment.

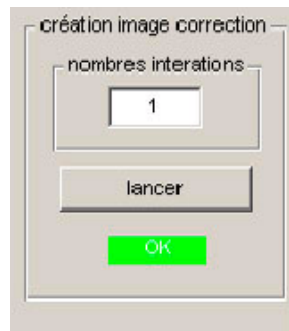


Figure 30: Panneau de l'interface permettant de régler le nombre d'itérations pour le calcul de l'image de correction (le voyant permet de savoir si un masque est déjà disponible)

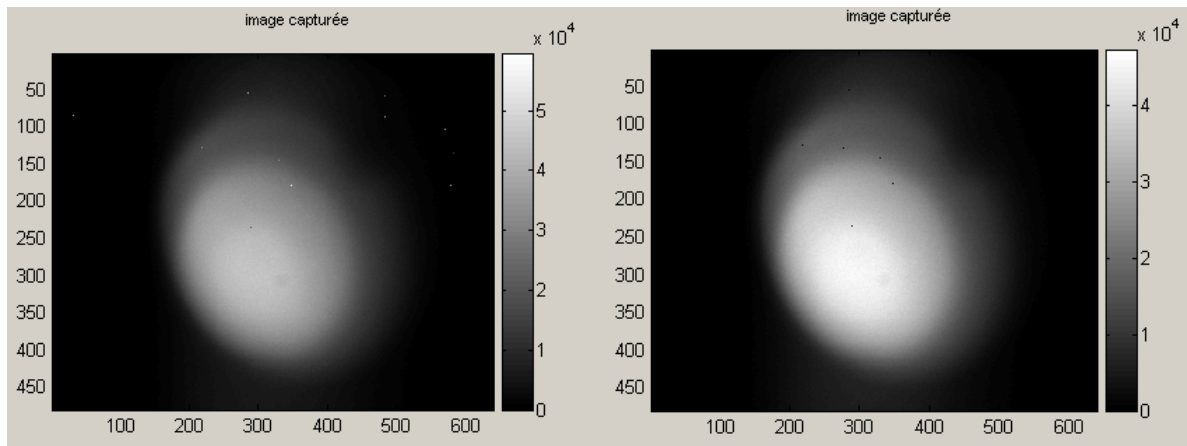


Figure 31: différence entre une image sans correction (à gauche) et une image avec correction (à droite)

Nous n'observons plus de pixels défailants sur l'image corrigée (le niveau maximum enregistré passe de 60000 à moins de 50000) nous obtenons donc, grâce à l'annulation des valeurs aberrantes de l'intensité des pixels, plus de stabilité et de fiabilité dans les mesures du barycentre.

5.2 Automatisation des mesures

L'interface permet, pour des réglages rapides de l'alignement, de calculer manuellement la distance entre le barycentre des intensités de tous les pixels de l'image, et le centre propre de la zone de capture, en appelant la fonction `barycentre` depuis l'interface.

Les durées des sessions de mesures rendent prohibitif l'utilisation manuelle du programme.

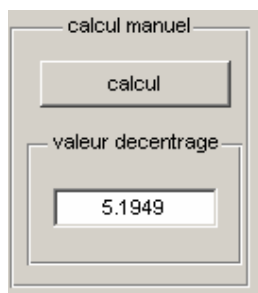


Figure 32: panneau de calcul manuel du barycentre

Nous avons donc décidé de rendre totalement automatique la prise des images, la capture des valeurs des capteurs, et les différents calcul de correction de l'image et du barycentre.

Il est donc possible de choisir pour chaque session le nombre de phase de captures et de calculs, ainsi que le temps de pause entre chaque prise (attention les temps de capture et de calcul ne sont pas pris en compte dans le temps de pause, nous appelons simplement la fonction pause de Matlab au début de chaque boucle). Nous pouvons aussi régler le numéro des canaux analogiques de la carte d'acquisition. Pour simple titre indicatif, la valeur maximale du décentrage pendant toute la série de mesures est affichée dans le cadre orange.

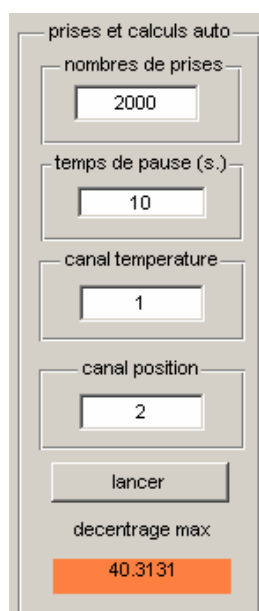


Figure 33: panneau de l'interface permettant le réglage des paramètres d'automatisation

5.3 Système de sauvegarde et d'archivage

En vue des temps de mesure à effectuer, le software devra utiliser un système de sauvegarde robuste permettant d'éviter la perte totale de données. Pour cela, nous effectuons une sauvegarde dans deux fichiers temporaires, `sauvegarde1.mat` et `sauvegarde2.mat`, alternativement à chaque phase acquisitions-calculs pour contrer le fait qu'une erreur puisse se produire pendant la phase de sauvegarde.

Ensuite, lors de la fin d'une session de mesure un fichier d'archivage, comportant dans le nom le jour et l'heure de fin de la session et contenant les valeurs des capteurs, des résultats des calculs de barycentre, et la dernière image capturée depuis le CCD, est créé par l'appelle de la fonction `save_data` depuis le programme principal. Le fichier de sauvegarde prend la forme : `sauvegarde@w j x h y m z s.mat`. et contient la variable `B` et une structure `Mesdatas` dont les champs contiennent les valeurs des capteurs et la dernière image.

L'ensemble de ces fichiers sont stockés dans le répertoire `donnees` initialisé au lancement de l'interface graphique `calcul_barycentre.m`.

La récupération des données s'effectue par l'appelle de la fonction `load` (`sauvegarde@w j x h y m z s.mat`) directement dans la console de commande Matlab. Les données peuvent ensuite être tracées pour une analyse ultérieure.

Malheureusement, le manque de temps ne nous a pas permis d'intégrer le capteur de position de la table sur le montage, il faudra donc en cas d'amélioration ultérieure du banc prévoir le montage d'un capteur analogique (inductif ou capacitif) de distance. Normalement, seulement une mise à l'échelle des valeurs retournées par le capteur devra être effectuée dans le programme Matlab.

6 Analyse des résultats

Dans cette partie, nous allons analyser les résultats obtenus pendant la session de test. Les points prépondérants des tests et servant de validation pour le projet sont la stabilité du système et la capacité à détecter des faibles variations sans que le bruit causé par la caméra vienne entraver la précision du système. Pour rappel, nous devons détecter des variations du barycentre du flux de l'ordre $1/1000^{\text{ème}}$ de la largeur de l'image de la sortie de la fibre de test, pour la configuration du système d'imagerie en near field, et de l'ordre du $1/1000^{\text{ème}}$ du Full With Half Max (FWHM) de l'image, pour une configuration en far field.

6.1 Test configuration imagerie near field.

La configuration near field est la plus facile à caractériser en terme de performances puisque l'image de la sortie de la fibre représente un disque de diamètre constant d'environ 400 pixels de diamètre. Pour rester dans les performances il faudrait donc que le système permette de mesurer des variations de l'ordre de 0.4 pixels.

Études des mesures du test lancer à 10 heures le 15 12 :

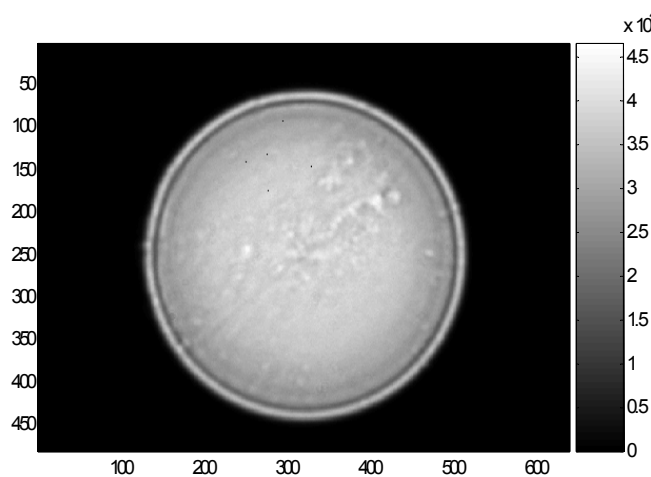


Figure 34 : image obtenue le 15 12 en configuration far pour l'injection et near pour l'imagerie

Pour la plupart des mesures nous avons configuré le temps d'exposition afin d'obtenir une valeur maximale de 45000 pour l'intensité de l'image représentant environ 75 % de la valeur de saturation du CCD, le gain, entraînant un bruit non linéaire et non caractérisé a été bloqué à sa valeur minimale 1.

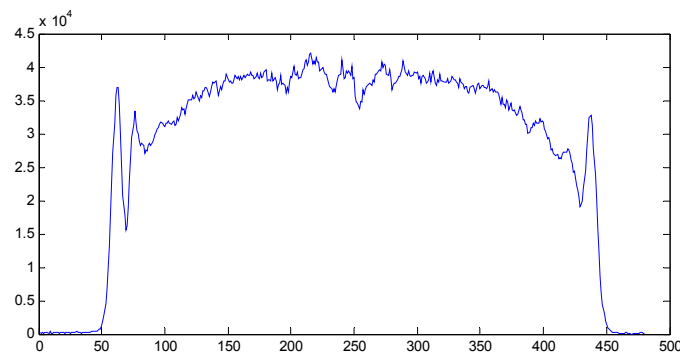


Figure 35 : coupe verticale de l'image au niveau de son barycentre.

Nous obtenons, dans ce cas, une largeur du FWHM de 390 pixels, donc la variation maximale ne doit pas dépasser 0.39 pixels.

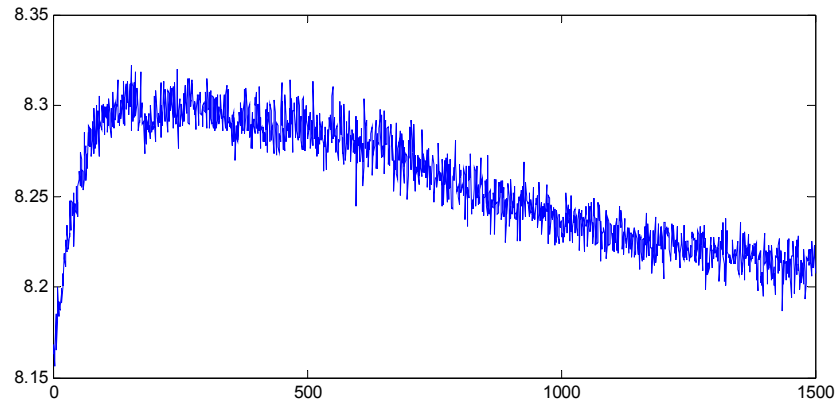


Figure 36 : déplacement du barycentre en pixels du flux par rapport au centre du capteur CCD en fonction du temps.

Nous pouvons observer un temps de stabilisation du système d'environ 4 heures. Ensuite sur les 2 heures 30 suivantes le système semble être stabilisé et on enregistre un déplacement moyen de moins de 0.05 pixels.

Le bruit de noir de la caméra semble constant et représente une incertitude de 0.03 pixels sur la position. Ce bruit pourra être éliminé ultérieurement à l'aide de filtre de type FIR ou moyenne glissante, si les variations du barycentre seront plus petite que les performances détectables à l'aide du système brute.

Pour cette première série de mesure, une fois le temps de stabilisation terminé, la variation totale du système représente des performances dix fois supérieures que celles requises par le cahier des charges.

Étude des mesures lancées le 16 12 à 10 heures :

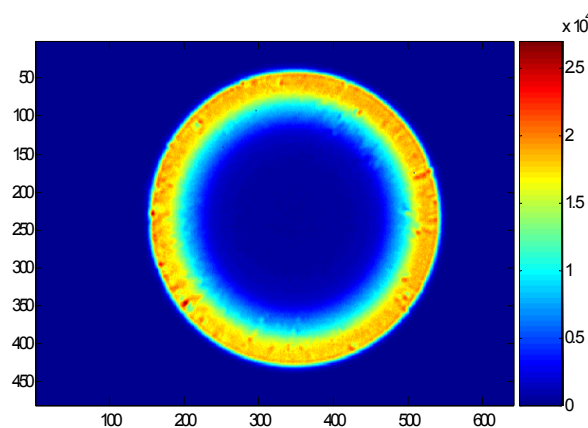


Figure 37: image obtenue le 16 12 avec configuration near pour l'injection et near pour l'imagerie

Le faisceau lors de l'injection a été décentré au maximum pour obtenir un anneau sur l'image, de plus nous avons diminuer l'intensité du flux d'injection dans le but d'augmenter le temps d'exposition. Tous ces changements ont été effectués dans le but d'augmenter le bruit de noir de l'image pour en caractériser ses effets. Le FWHM de l'image est toujours d'environ 400 pixels.

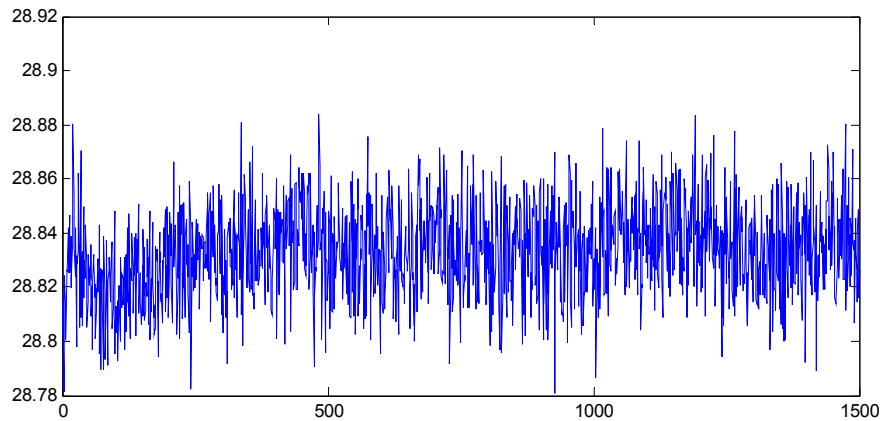


Figure 38 : variation en pixels du barycentre en fonction du temps

Nous pouvons effectivement mesurer comme prévu un bruit plus important sur les mesures, donnant une incertitude de l'ordre de 0.08 pixels dans le pire des cas. Le système semble être stable.

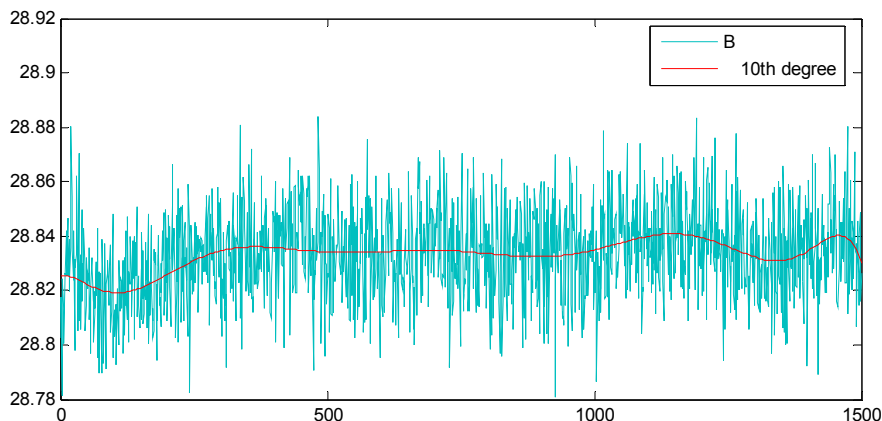


Figure 39 : variation du barycentre en pixels et interpolation par un polynôme de degré 10 et la méthode des moindres carrés

Nous avons choisi comme méthode pour éliminer le bruit de nos mesures une interpolation polynomiale par la méthode des moindres carrés, l'approximation faite par le polynôme semble bien se rapprocher de la réalité.

Avec l'approximation, nous obtenons une variation moyenne sur 6 heures de mesures d'environ 0.02 pixels, ce qui est toujours excellent en vue des 0.4 pixels de variation demandée. Une étude plus approfondie de la rigueur statistique de l'approximation pourra être réalisée ultérieurement dans le but de trouver d'autres types de filtrages plus sûrs.

Pour cette première partie, nous avons testé la configuration la plus sensible au niveau de la stabilité mécanique et thermomécanique. Nous avons remarqué un temps de stabilisation du système d'environ 4 heures après chaque manipulation. Une fois stabilisé, le système présente des performances en moyenne 10 à 20 fois supérieures aux exigences du cahier des charges pour les mesures brutes, et 100 à 200 fois pour les mesures filtrées.

6.2 Test configuration imagerie en far field.

Pour l'imagerie far field, la mesure de la performance peut s'effectuer soit en fonction du diamètre du FWHM de l'image, par conséquent pour une image de petit diamètre la variation permise devra être plus petite, soit en fonction de la largeur du FWHM le plus grand obtenu pendant les mesures, correspondant au décentrage maximum du flux à l'entrée de la fibre de test, le FWHM de l'image la plus grande obtenue est de 350 pixels.

Étude des mesures lancées le 12 12 à 17 heures :

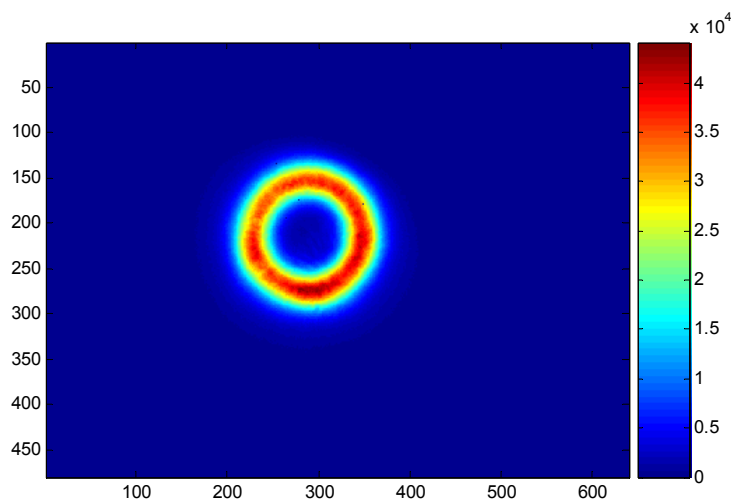


Figure 40 : image obtenue avec une configuration far pour l'imagerie et far pour l'injection

Pour obtenir un anneau de petit diamètre, nous avons décalé la fibre source de 0.1 mm. de l'axe, ce qui entraîne une inclinaison du flux d'entrée dans la fibre de test et engendre la formation d'un anneau sur l'image de la sortie.

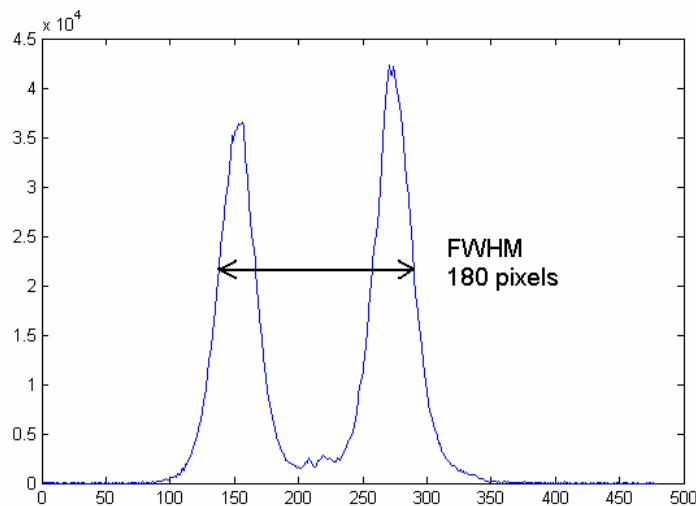


Figure 41 : coupe verticale de l'image au niveau du barycentre

Nous obtenons une largeur de FWHM de 180 pixels, donc si nous calculons, en suivant la première hypothèse, la performance admise, la variation détectable doit être de 0.18 pixels.

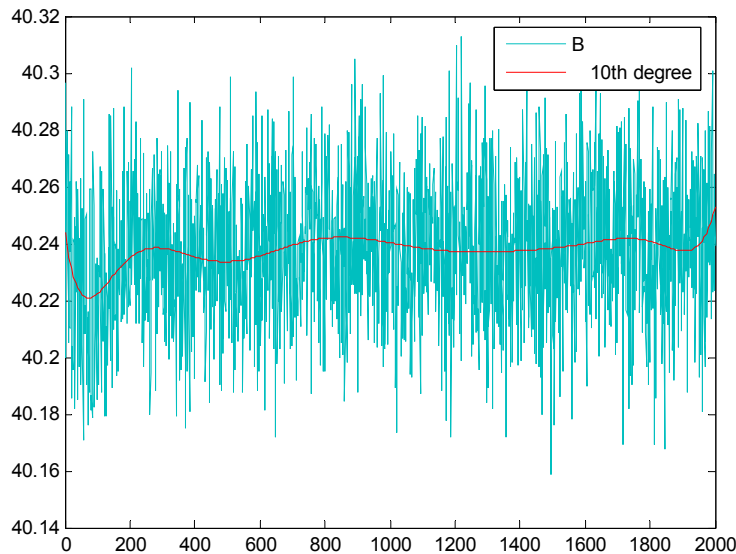


Figure 42 : variation de la position du barycentre du flux en fonction du temps

La surface couverte par l'image étant petite, nous obtenons un bruit de mesure plus important, il représente environ 0.1 pixels peak to peak. Nous restons même avec le bruit dans des performances acceptables. De plus si nous effectuons, comme précédemment, une interpolation d'ordre 10, la variation de la valeur RMS (Root Mean Square) de la position varie dans un échelon de 0.04 pixels, ce qui nous renvoie à 5 fois les performances requises

Étude des mesures lancées le 13 12 à 17 heures :

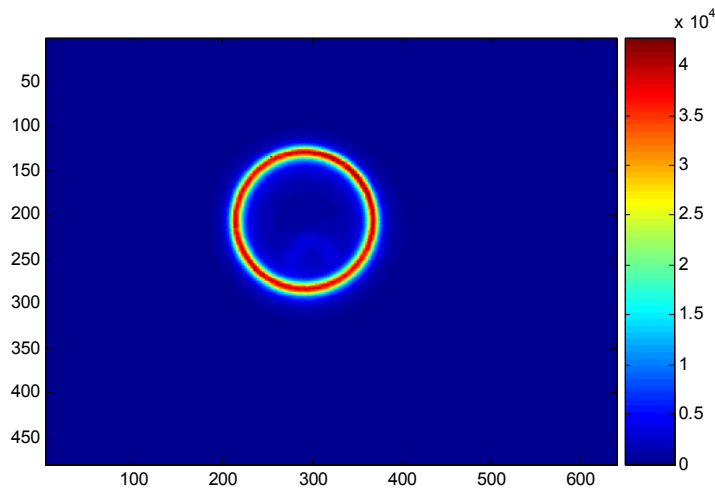


Figure 43 : image obtenue avec une configuration far pour l'imagerie et far pour l'injection

L'image obtenue sous cette configuration possède un fort contraste et ne nécessite pas grand temps d'exposition (40 ms.) par contre l'anneau obtenu est de faible épaisseur et la surface couverte par le flux lumineux est très petite, donc ce type de mesures aura tendance à posséder un fort bruit.

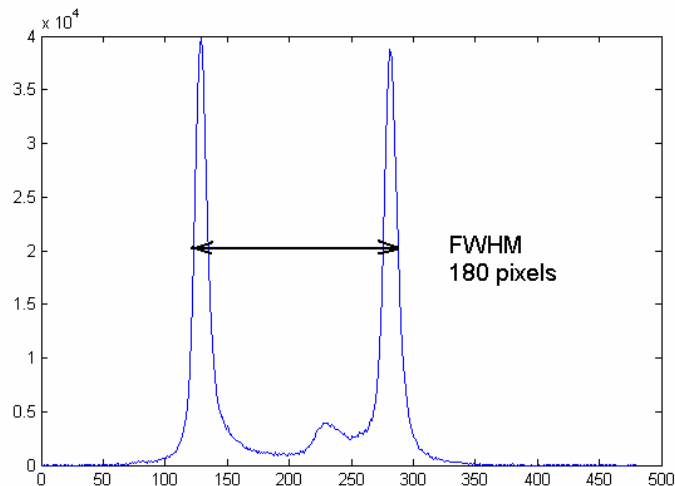


Figure 44 : coupe verticale de l'image au niveau du barycentre

Le FWHM de l'image précédente est de toujours 180 pixels, ce qui nous donne, comme dans le cas précédent une variation acceptable de 0.18 pixels.

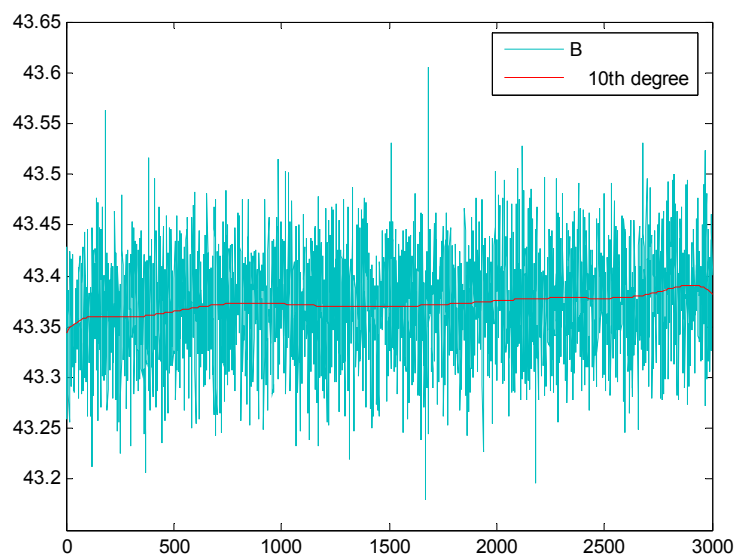


Figure 45 : variation du barycentre de l'image en fonction du temps

Il faut tout d'abord noter que le bruit de mesure semble être bien proportionnel, comme l'indique la théorie du signal sur bruit, à la surface couverte par l'image.

Si nous utilisons la première hypothèse de calcul, le bruit est plus important que la variation minimum à mesurer, 0.25 pixels de variation peak to peak.

Il faudra donc utiliser la valeur RMS du signal, qui pour sa part reste dans une fenêtre de variation de moins de 0.05 pixels.

Dans tous les cas, pour la configuration far field, si nous calculons la performance du système par rapport à l'image la plus grande observable, nous obtenons des performances 50 fois meilleures que celles requises par le cahier des charges.

7 Conclusion

Pour conclure de travail de diplôme, nous pouvons déjà annoncer que la plus grande partie des objectifs fixés par le cahier des charges et les simulations effectués durant le travail de semestre ont été largement atteints même dépassés. En effet les tests de stabilité, servant de validation finale au projet, se sont révélés très bon malgré les quelques problèmes de luminosité ambiante (réglés par l'ajout d'un drap noir sur le montage), de desserrage des vis et de temps de stabilisation assez importants. Le cahier des charges exigeait la détection de variation de l'ordre du $1/1000^{\text{ème}}$ du diamètre du core de la fibre, nous avons obtenus des précisions allant du $1/5000^{\text{ème}}$ pour la configuration d'imagerie near field, et même de l'ordre du $1/20000^{\text{ème}}$ en utilisant un système d'approximation RMS. En ce qui concerne la méthode d'imagerie far field, suivant les hypothèses prises pour le calcul de la précision, nous sommes en possibilité de détecter des variations de l'ordre du $1/2000^{\text{ème}}$ sans approximation, et du $1/4000^{\text{ème}}$ en RMS.

Personnellement, ce projet très multidisciplinaire, m'a permis de profiter de la large palette de compétence offerte par la formation microtechnique (conception mécanique et optique, programmation, traitement du signal et de l'information, électronique,...). Il m'a aussi servi à l'approfondissement de mes connaissances en imagerie CCD, en optique et dans l'utilisation des fibres optiques en général.

Malgré le succès du projet, il reste encore quelques points à finaliser, dans un premier temps dans le but d'utiliser le banc optique pour des phases de caractérisation de fibre, il faudrait prévoir l'intégration de la commande du vérin électrique depuis l'interface Matlab, pour déplacer automatiquement la table linéaire pendant les séries de mesure.

Ensuite il faudrait rectifier quelques pièces mécaniques, dans le but de garantir l'alignement de l'axe sans l'ajout de cale en clinquant, notamment les supports des objectifs de microscope, de plus il faudrait modifier les supports des connecteurs de la fibre, pour permettre un ajustement plus rigoureux de la ferrule, limitant ainsi sa sensibilité au déplacement de la fibre.

Finalement, l'ajout d'une deuxième fibre de référence utilisant le même système d'imagerie, permettrait d'effectuer des mesures de caractérisation en mode différentiel, on s'affranchirait par la même occasion des problèmes de stabilité mécanique et thermomécanique.

20 décembre 2005 , Pablo Antolinez

8 Annexes

8.1 Cahier des charges

8.2 Bibliographie

- a) Jeff Hecht, *understanding fibre optics*, Howard W. Sams & Company, 1987.
- b) Robert G. Seippel, *Fiber Optics*, Reston Publishing Company INC., 1984.
- c) Paul R. Yoder, *Opto-Mechanical System Design*, Marcel Dekker INC., 1986.
- d) Micheal W. Burke, *Image Acquisition*, Chapman & Hall, 1996
- e) http://ofl.phys.polymtl.ca/fibres_html/fibres.html , Copyright 1995 Suzanne Lacroix
- f) <http://www.astrosurf.com/aaco/html/techccd.htm>

8.3 Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier le Dr François Wildi, pour le soutien théorique apporté et son engagement dans le projet.

Je remercie ensuite le Dr Francesco Pepe pour sa disponibilité, ses judicieux conseils pour le design général de système et surtout pour la proposition du projet.

Je remercie la société Schott Guinchard pour le don de la plaque de support en ZERODUR, sans laquelle les performances du banc n'auraient pas été aussi élevées.

Je remercie M. Cyril Ottonin et toute l'équipe de la mécanique pour la réalisation très rapide et sans failles des pièces mécaniques.

Je remercie l'European Southern Observatory pour la fourniture des fibres optiques de test.

Et je remercie finalement toute ma famille, pour sa grande patience et son soutien moral, mais malheureusement, pas technique.

8.4 Résultats de la sessions de test

tableau de la campagne de test							
date	heure de démarrage	duree	nombre de mesure	temps exposition	gain	configuration	remarques
7 12	20 h	7 h	1800	60	1	near far	pas de régulation en température
8 12	17 h	7h	1800	200	1	near near	juste apres déménagement le banc n'est pas en température
9 12	17 h	50 h	7500	160	1	near near	drole de fluctuation => problème d'étanchéite a la lumière
12 12	10 h	6 h 30	1200	250	1	near far	toujours pas stable
12 12	17h	7h	2000	100	1	near far	super mesure stable => ajout du drap noir et carton
13 12	10h 30	6h	1400	40	1	far far	tout ok
13 12	17 h	12h	3000	40	1	far far	ok, un peu de bruit
14 12	11 h	5h40	1200	260	1	far near	petit temps de stabilisation
14 12	17h	12h20	3000	260	1	far near	vague ... pas de mesure, prob memoire mais screen shot
15 12	10h 30	6h30	1500	260	1	far near	toujours un léger temps de stabilisation après manipulation
15 12	17h	12h	3000	350	1	near near	bon temps de stabilisation, manipulation importante avant lancement, test avec peu de lumiere
16 12	10h 30	6h30	1500	350	1	near near	relancée pour voir si système stabilisé
16 12	17h	50 h	7500	380	1	far near	mesure effectuée avec source décalée et faible, pour plus de bruit. Mais desserage du CCD donc par utilisable

 mesures non exploitables : problèmes diverses

 mesures étudiées dans le rapport

8.5 Datasheet

8.6 Fichiers sources MATLAB

Module principale du programme : les fonctions de ce module sont lancées par interactions avec l'interface graphique. Une initialisation du chemin et des variables s'effectue au lancement de l'interface.

```
function ma_proc(param)
% fonction ma_proc(param)
% fonction générale appelée depuis le GUI permettant l'automatisation des
% prises de mesures, de la création de l'image de correction et de la
% correction de l'image de la caméra
% de capture à la volée en 8 ou 16 bits , et de calcul manuel du barycentre

global zq
global correction_image

switch param

    case 'lancer'

        %initialisation de la variable de sauvegarde
        Mesdata.barycentre=0;
        MesData.temperature=0;
        MesData.position=0;
        MesData.image=0;
        B=0;

        % lancement de l'automatisation des mesures
        % on peut choisir dans le GUI directement le nombre de mesures et
        % le temps de pause entre chaque prises

        handle_du_champ = findobj('tag','nbr_iteration')
        nbr = str2num(get(handle_du_champ,'string'));
        h_bar = waitbar(0,'calcul auto');

        % ajout des entrées des capteurs de température et position;
        %initialisation de la carte d'acquisition
        AI = analoginput('nidaq',1);

        %créations des canaux
        canal_temp = str2num(get(findobj('tag','canal_temp'),'string'));
        canal_position =
str2num(get(findobj('tag','canal_position'),'string'));
        addchannel(AI,canal_temp);
        addchannel(AI,canal_position);
        set(AI,'SamplesPerTrigger',1);

        for C = 1 : nbr

            % récupération et utilisation du temps de pause entre les
            % mesures
            tmp_pause = str2num(get(findobj('tag','tmp_pause'),'string'));
            pause(tmp_pause);

            %mise a jour de la barre d'attente
            waitbar(C/nbr,h_bar,strcat('prise mesure : ',...
                num2str(fix((C/nbr)*100)),'%'));
```

```
% capture de l'image de la caméra
image_brute = plotcamera;
global correction_image

load sauvegardecorrection ;
%application du masque de correction
zq = image_brute.* correction_image;

%calcul du barycentre de l'image en cours et stockage du
%résultat dans le vecteur B
B(C)= barycentre(zq);

% procédure de récupération des données des capteurs de
% position et de température
start(AI);
data = getdata(AI);
temperature_temp = data(1);
temperature(C)= 100*temperature_temp;
position(C) = data(2);

%mise a jour de la variable de sauvegarde

Mesdata.barycentre=B;
MesData.temperature=temperature;
MesData.position=position;
MesData.image=zq;

if mod(C,2)
    nom_fichier='sauvegarde2';
else
    nom_fichier='sauvegarde1';
end
save(nom_fichier, 'MesData', 'B');

end
close(h_bar);

%affichage de la dernière image capturée
hdl_fig = findobj('tag','icamera');
axes(hdl_fig);
imagesc(zq);
colormap(gray);
colorbar;
set(hdl_fig, 'tag', 'icamera');

% affichage du decentrage max sur la totalité des mesures
handle_du_champ = findobj('tag','dec_max');
set (handle_du_champ, 'string', num2str(max(B)));
% plot de la variation du barycentre
hdl_fig = findobj('tag', 'ibarycentre');
axes(hdl_fig);
plot(B);
set(hdl_fig, 'tag', 'ibarycentre');
% plot de la variation de position de la table
hdl_fig = findobj('tag', 'iactuateur');
axes(hdl_fig);
plot(position);
set(hdl_fig, 'tag', 'iactuateur');
% plot de la variation de température
hdl_fig = findobj('tag', 'itemperature');
axes(hdl_fig);
plot(temperature);
```



```
set(hdl_fig, 'tag', 'itemperature');

%sauvegarde des mesures dans fichier avec date et heure
save_data(MesData,B);

case 'capture'

% lancement d'une capture simple d'image
% on peut choisir entre une capture 8 ou 16 bits
% l'image est corrigée avec le masque avant d'etre affichée

%capture avec la caméra
image_brute=plotcamera;

%correction des mauvais pixels
global correction_image
zq = image_brute.* correction_image;

%affichage de l'image
hdl_fig = findobj('tag','icamera');
axes(hdl_fig);
imagesc(zq);
colormap(gray);
colorbar;
set(hdl_fig, 'tag', 'icamera');

case 'calcul'

%calcul de la déviation du barycentre par rapport au centre de
%l'écran de la dernière image capturée par la caméra

bar = barycentre(zq);
%affichage du resultat dans le GUI
bar2 = num2str (bar);
handle_du_champ=findobj('tag','decentre');
set(handle_du_champ, 'String',bar2);
%   hdl_fig = findobj('tag','ibarycentre');
%   axes(hdl_fig);
%   plot(bar);
%   set(hdl_fig, 'tag', 'ibarycentre');

case 'edit_time'
%récupération de la valeur du temps d'exposition dans le GUI

time = get(findobj('tag','time'), 'string')

load snapshot_structure
struct_snapshot.exposure = str2num(time);
save('snapshot_structure','struct_snapshot')

case 'edit_gain'
%récupération de la valeur du gain dans le GUI

gain = get(findobj('tag','gain'), 'string')
load snapshot_structure
struct_snapshot.gain = str2num(gain)
save('snapshot_structure','struct_snapshot')

%affichage en cas d'erreurs
```

```
    otherwise
        qq=sprintf('appel de ma_proc avec param inconnu %s',param);
        errorldg(qq);
end
```

module de récupération de l'image du capteur CCD :

```
function zq=plotcamera()
%fonction zq=plotcamera()
%fonction qui sauve dans la matrice zq, un snapshot pris par la caméra
%elle recupère les données d'exposition et de formats dans le GUI
global zq
global handle

%initialisation de la caméra
    handle=lucamCameraOpen;

    %récupération du temps d'exposition dans le GUI
    time = get(findobj('tag','time'),'string');
    load snapshot_structure;
    struct_snapshot.exposure = str2num(time);
    save('snapshot_structure','struct_snapshot');
    %récupération du gain du capteur dans le GUI
    gain = get(findobj('tag','gain'),'string');
    load snapshot_structure;
    struct_snapshot.gain = str2num(gain);
    save('snapshot_structure','struct_snapshot');

    %récupération du format de l'image dans le GUI (8 ou 16 bits)
    bits = get(findobj('tag','nbr_bits'),'Value');
    load snapshot_structure;
    struct_snapshot.pixelFormat = bits;
    save('snapshot_structure','struct_snapshot');

    % prise de l'image et stockage dans la variable
    zq=(lucamTakeSnapshot(handle,struct_snapshot));
    % fermeture de la connexion avec la caméra
    lucamCameraClose(handle);
    % recherche de la valeur max de l'image pour l'indicateur de
    % surexposition
    valmax = max(max(zq));

    % test sur le format pour définir la valeur max acceptable
    if struct_snapshot.pixelFormat == 1

        zq=ati(zq);
        maxaut=65000;

    else

        zq=double(zq);
        maxaut = 255 ;

    end

    % test de controle pour la mise a jour de l'indicateur de
    % surexposition
    if valmax >= maxaut

set(findobj('tag','niveau_max'),'BackgroundColor','red','String','NO')
    else
```

```
set(findobj('tag','niveau_max'),'BackgroundColor','green','String','YES')
end
```

module autonome de récupération de l'image du CCD, pour la caractérisation et la correction de l'image.

```
function zq=plotcameravar()
% fonction zq=plotcameravar()
% fonction de snapshot speciale pour la création du masque
% elle ne remonte pas d'information du GUI pour le temps d'exposition, le
% gain et le format
global zq
global handle

%initialisation de la caméra
handle=lucamCameraOpen;
%definition des paramètres de la prise de l'image
load snapshot_structure;
struct_snapshot.pixelFormat = 1;
struct_snapshot.exposure = 0.0001;
struct_snapshot.gain = 1;
save('snapshot_structure','struct_snapshot');

%prise de limage et stockage dans la variable zq
zq=(lucamTakeSnapshot(handle,struct_snapshot));
%fermeture de la connexion avec la caméra
lucamCameraClose(handle);

%reformatage de l'image
zq=ati(zq);
```

Module de calcul du barycentre :

```
function B = barycentre (zq)
%fonction B = barycentre (zq)
%fonction qui calcul le barycentre de l'image stockée dans la variable
%globale zq le resultat représente la distance entre le barycentre de
%l'image et le centre du capteur CCD

% initialisation des variables

zq = double (zq);
mx = 0;
mpx = 0;
mxq = 0;
mpxq = 0 ;
maxB = 0 ;

for x = 1:480,
    for y = 1:640,
        mxq = mxq + zq(x,y) ;
        mpx = mpx + zq(x,y)*x ;
    end
end

% calcul des coordonnées du barycentre
```

```

myq = 0;
my = 0;
mpy = 0;
for y= 1:640,
    for x = 1:480,
        myq = myq + zq(x,y) ;
        mpy = mpy + zq(x,y)*y ;
    end
end

% barycentres suivant les deux axes
Bx = double(mpx/mxq) ;
By = double(mpy/myq) ;

% calcul de la distance du barycentre par rapport au centre du capteur
B= sqrt((Bx-480/2-0.5)^2+(By-640/2-0.5)^2);

```

Module de création du masque de correction :

```

function variance(param)
% fonction variance(param)
% fonction appelée depuis le GUI permettant de créer un masque de
correction
% pour les images reçues de la caméra, elle permet de supprimer les pixels
% donnant des valeurs aberrantes, ainsi que les pixels dont la déviation
% standart est trop importante sur une série de mesures, par simple
% multiplication de la matrice globale correction_image par la matrice
% brute de la caméra.

switch param

    case 'lancer'

% définition des variables globales
global correction_image
global var_prise

%récupération dans le GUI du nombres d'iterations de la correction
comptmax = str2num(get(findobj('tag','iter_var'),'string'));

%initialisation des matrices

Ysum=zeros(480,640);
Yvar=zeros(480,640);
correction_image = zeros (480,640);
correction_image_seuil = zeros (480,640);
correction_image_var = zeros (480,640);
Yimage=zeros(480,640,comptmax);

%création de la barre d'attente
h_bar=waitbar(0,'prise image de correction');

for compteur = 1 :comptmax

    %actualisation de la barre d'attente
    waitbar(compteur/comptmax,h_bar,strcat('prise image : ',...
num2str(fix((compteur/comptmax)*100)), '%'));
    N= sprintf('%05d',compteur);

    %prise des images et sauvegarde dans la matrice 3D Yimage ayant une

```

```
%profondeur de comptmax
Yimage(:, :, compteur) = plotcameravar;

end

close(h_bar);

% calcul de la Standart Deviation de chaques pixels des images stockées
% dans Yimage
Ystd = std(Yimage, 0, 3);

% création du masque de correction pour les pixels donnant des valeurs
% aberrantes
hot_pix = find(plotcameravar >= 2000);
correction_image_seuil = ones(size(Ystd));
correction_image_seuil(hot_pix) = 0;

% création du masque de correction pour les pixels presentant une trop
% forte variation dans le temps
hot_pix_var = find(Ystd >= 2000);
correction_image_var = ones(size(Ystd));
correction_image_var(hot_pix_var) = 0;

% création du masque de correction finale par multiplication du masque de
% pixels aberrants et faux.
correction_image = correction_image_var .* correction_image_seuil;

%affichage informatif du masque créé
figure(1);
title('masque de correction');
imagesc(correction_image);
colormap(gray);
colorbar;

% sauvegarde du masque dans un fichier comportant la date et l'heure de la
% saisie
% heure = fix (clock);
% heure_mod = heure (2:5);
% nom_fichier = strcat ('sauvegarde', sprintf('%da%dh%dm%ds', heure_mod));
save ('sauvegardecorrection', 'correction_image');

%mise a jour de la variable booléenne permettant de savoir si une matrice
%de correction est déjà en mémoire
var_prise = 1;

set (findobj('tag', 'var_status'), 'string', 'OK', 'BackgroundColor', 'green');

end
```

Module de recomposition de l'image 16 bits:

```
function Y=ati(os)
% fonction Y=ati(os)
% fonction servant a reformater l'image reçu en 16 bits en 640 * 480
% entrée : os = matrice 1280 * 480 de uint8
% sortie : Y = image recomposée 640 * 480 en double
% la première colonne de l'image reçue en 16 bits représente la partie 8
bits
% high du registre du pixels et la deuxième colonne la partie low et ainsi
% de suite alternativement. l'image est alors recomposée de la manière
% suivante : colonne (X) = 256 * colonne (X)+ colonne (X+1) sur 640
```

```
% colonnes

% conversion de la matrice de uint8 en double pour les calculs
os=double(os);

% boucle de recomposition
for x=1:2:1280
    Y(:,round(x/2))=256*os(:,x)+os(:,x+1);
end;
```

Module de sauvegarde automatique indexée :

```
function save_data(Sauvegarde,B)
%function save_data(Sauvegarde)
%fonction de sauvegarde automatique permettant de sauvegarder la variable
%d'entrée Sauvegarde dans un fichier .mat

heure = fix(clock);
Jour = heure (3);
Heure = heure (4);
Minute = heure (5);
Seconde= heure (6);
Jour = num2str (Jour);
Heure = num2str (Heure);
Minute = num2str (Minute);
Seconde = num2str (Seconde);
nom_fichier=strcat('sauvegarde','@',Jour,'j',Heure,'h',Minute,'m',...
    Seconde,'s');
disp(nom_fichier);

save(nom_fichier,'Sauvegarde','B');
```