

Photonique Expérimentale

Imagerie

Contexte		1
1	Optique adaptative / montage Imagine Optic	3
2	Mesures de FTM d'un système optique dans le visible	25
3	Mesure de FTM dans l'infrarouge par la méthode de Foucault	35
4	Cilas optique adaptative	53
5	Mesure de la FTM d'un objectif sur un banc ACOFAM	73

Salles	I1 S1.6	I2 S1.2	I3 S1.10	I4 S1.8	I5 S1.12 & S1.6
--------	------------	------------	-------------	------------	--------------------

lense.institutoptique.fr | Troisième année | Photonique 3A|M2



© 2026 by LEnSE-IOGS

Cycle Ingénieur - 3^{ème} année - Palaiseau
Année 2026-2027

Contexte

Le bloc Imagerie 2 offre l'**opportunité unique** d'expérimenter des concepts avancés d'imagerie, de les relier à la théorie qui les sous-tend, et ainsi d'acquérir un recul et un savoir-faire directement applicables en milieu professionnel, en recherche comme dans l'industrie.

La **fonction de transfert de modulation** (FTM) est une spécification largement utilisée dans l'industrie pour qualifier des systèmes optroniques complexes, intégrant à la fois des objectifs, des capteurs et des traitements numériques. Les trois expérimentations de FTM permettent d'aborder des cadres différents, avec leurs spécificités et contraintes. Elles couvrent aussi bien les problématiques de mesure en infrarouge (vision de nuit, astronomie et spatial, imagerie médicale. . .) que dans le visible (caméras et imagerie photographique, astronomie. . .).

L'**optique adaptative** (OA) permet de corriger en temps réel les variations rapides d'aberrations optiques (turbulence atmosphérique, vibrations de structure, milieux diffusants. . .), afin de se rapprocher de la limite de diffraction des instruments. Elle est indispensable en haute résolution angulaire pour l'astronomie, et est en pleine expansion en ophtalmologie, microscopie ou encore communications optiques en espace libre. Les deux expérimentations proposées permettent de comprendre les contraintes et limitations de l'OA et sont le socle incontournable de tous les systèmes existants.

Objectifs pédagogiques du bloc

- Mettre en œuvre et valider un montage optique de caractérisation de systèmes optiques, dans le visible et l'infrarouge.
- Choisir les paramètres expérimentaux d'une mesure de fonction de transfert de modulation.
- Décrire et justifier différentes méthodes de mesure de la fonction de transfert de modulation de systèmes optiques.
- Comprendre le principe de conception d'un système d'optique adaptative et de la correction en temps réel d'un front d'onde.
- Mettre en œuvre l'asservissement et comprendre les effets des différents paramètres de réglage du système.
- Mettre en évidence les limitations d'un système d'optique adaptative.

I 1

Correction de turbulences par Optique Adaptative

Version du 10 septembre 2026

Sommaire

1	Introduction et questions de préparation	3
2	Mise en route de l'expérience	7
3	Calibration du dispositif d'optique adaptative	13
4	Fonctionnement en boucle fermée	15
5	Correction en temps réel d'une perturbation	18
	Annexe 1 : Spécifications du miroir déformable Mirao-52d	20
	Annexe 2 : Spécifications de l'analyseur de front d'onde HASO 4	21
	Annexe 3 : Compléments sur le calcul de la matrice de commande par SVD	22

Pré-requis

Pour mettre en œuvre le dispositif décrit dans ce sujet, il est nécessaire de revoir vos cours et TP dans les thématiques suivantes :

- Asservissement numérique
- Mesures de front d'onde : décomposition en base de Zernike, réponse percussionnelle (*Point Spread Function* - PSF)

1 Introduction et questions de préparation

La résolution obtenue avec de grands télescopes terrestres (> 8 m), même sur les meilleurs sites (Chili, Hawaï), n'est généralement pas supérieure à la résolution obtenue avec un télescope d'environ 20 cm de diamètre ! La cause de cette dégradation de la qualité des images astronomiques est la turbulence atmosphérique. Le rêve des astronomes est de se débarrasser de l'effet de la turbulence sur les images acquises par les télescopes terrestres. L'optique adaptative transforme ce rêve en réalité en compensant *en temps réel* les dégradations du front d'onde induites par la traversée de l'atmosphère. Le principe est simple : analyser le défaut du front d'onde provoqué par la turbulence et le compenser par un miroir déformable. L'objectif de cet asservissement est d'obtenir un instrument d'optique idéal, c'est-à-dire limité par la seule diffraction.

Un paramètre standard permettant de quantifier la force de la turbulence est le **paramètre de Fried**, noté r_0 , qui donne le diamètre caractéristique de cohérence de la turbulence. En pratique, cela définit le diamètre équivalent d'un télescope en limite de diffraction. Par exemple, pour de très bonnes conditions d'observation, r_0 est de l'ordre de 20 cm dans le visible à $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$. La résolution angulaire sera alors équivalente à celle d'un télescope de 20 cm de diamètre limité par la seule diffraction.

L'optique adaptative n'est pas réservée au seul domaine de l'astronomie. Cette technique investit de nombreux domaines de l'optique instrumentale (imagerie satellitaire, communications optiques en espace libre, ophtalmologie, vision, microscopie, compensation de dérive thermique, remise en forme de faisceaux laser, autofocalisation...).

P1 Résolution limitée par la diffraction. Donner la formule de la résolution limite au sens de Rayleigh (limite induite par la seule diffraction donc en l'absence de turbulence) pour un système optique de diamètre de pupille d'entrée D et à la longueur d'onde λ . Calculer cette résolution angulaire limite pour un grand télescope de 8 m de diamètre de pupille d'entrée, pour une source de longueur d'onde $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$, en microradians et en secondes d'arc.

P2 Résolution en présence de turbulence. Calculer la résolution angulaire correspondant à un paramètre de Fried de 20 cm en microradians et en secondes d'arc. Par combien est divisée la résolution idéale compte tenu des perturbations de l'atmosphère? Conclure sur l'intérêt de corriger le front d'onde *en temps réel*.

Le système d'optique adaptative étudié au cours de cette séance est décrit sur le schéma de la figure 1.1). Il est constitué :

- pour l'analyse de front d'onde : d'un analyseur de type Shack-Hartmann HASO 4 comprenant une matrice de 50×68 microlentilles et une matrice CMOS ($5,2 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$).
- pour la compensation des défauts : d'un miroir déformable MIRAO à 52 actionneurs. Le diamètre du miroir déformable est de 15 mm.

Vous allez étudier en détail chacun de ces systèmes. Puis, vous chercherez à comprendre la méthode de construction de la matrice d'interaction entre ce miroir déformable et cet analyseur, et la méthode d'inversion par décomposition en valeurs singulières utilisée pour réaliser l'asservissement. L'optique adaptative est un asservissement numérique multivariable (ou MIMO pour *multiple input, multiple output*) qui utilise largement les propriétés de l'algèbre linéaire.

1.1 Étude de la voie d'analyse : conjugaison pupillaire

La source ponctuelle - qui jouera le rôle de ce que l'on appelle une « étoile guide » - est l'extrémité d'une fibre monomode injectée par une diode laser à 670 nm. Le faisceau collimaté par le doublet L1 ($F'1 = 200 \text{ mm}$) éclaire le miroir déformable, dont le diamètre limite la taille du faisceau réfléchi vers l'analyseur de front d'onde. Après le miroir, les deux doublets L2 ($F'2 = 300 \text{ mm}$) et L3 ($F'2 = 100 \text{ mm}$) conjuguent le miroir déformable et l'analyseur de front d'onde (en dimension et en position). Cette partie du montage est décrite sur la figure 1.2.

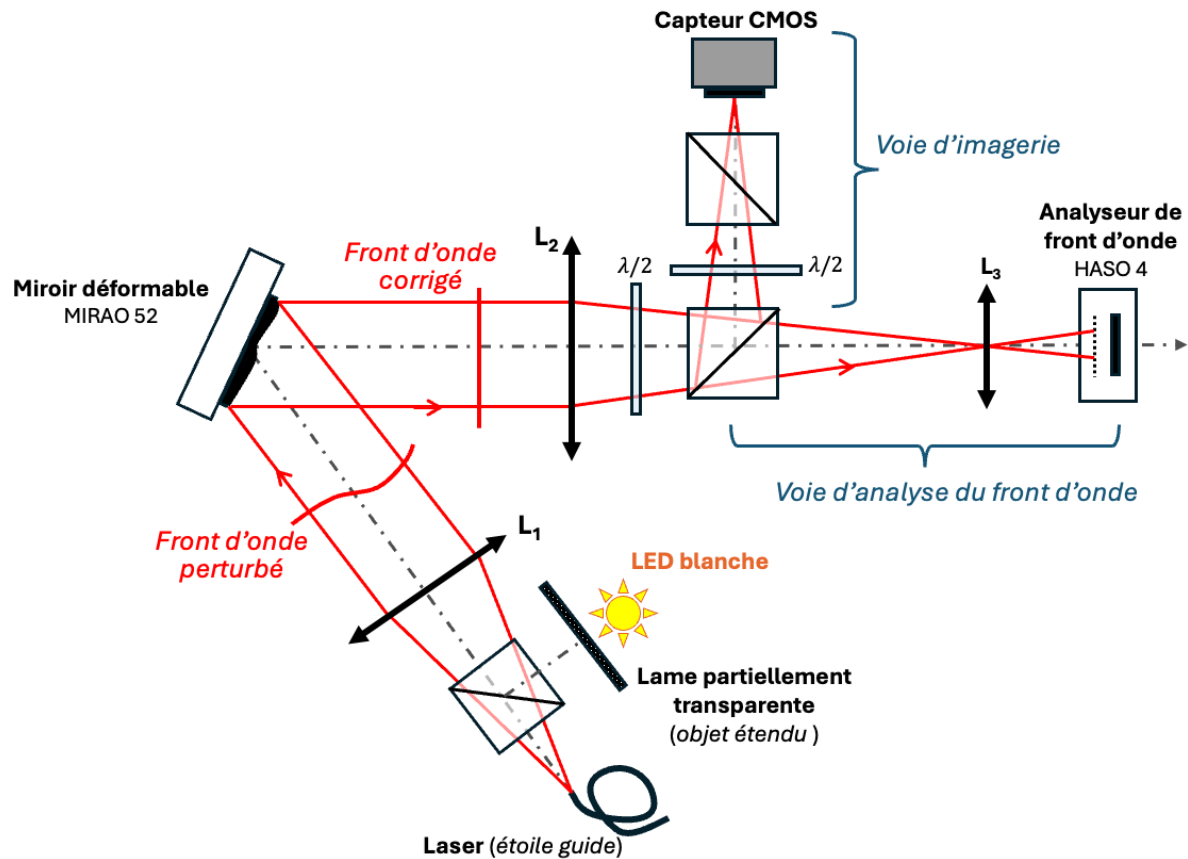


FIGURE 1.1 – Schéma du montage expérimental

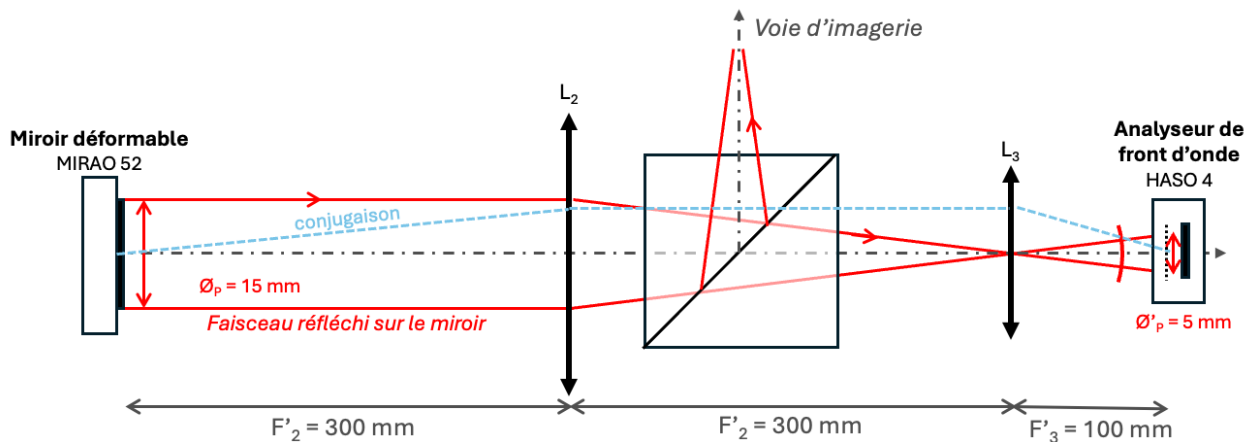


FIGURE 1.2 – Conjugaison optique des pupilles et tracé des rayons entre le miroir et l'ASO

P3 Expliquer pourquoi cette conjugaison est nécessaire : en l'absence de L_3 , que se passe-t-il si l'on applique un basculement (tilt) important au miroir déformable ? Faire des schémas (avec/sans L_3) pour mettre en évidence le rôle de cette lentille. Conclure sur l'intérêt d'utiliser les deux optiques L_2 et L_3 dans le dispositif.

P4 Quelle est la forme du front d'onde mesuré par l'HASO dans le cas idéal, en l'absence d'aberrations et de turbulences ? Préciser son rayon de courbure.

1.2 Asservissement de la boucle d'optique adaptative

L'asservissement de la boucle d'optique adaptative a pour objectif de « rejeter » les perturbations du front d'onde pour obtenir idéalement un front d'onde parfaitement corrigé correspondant à une image en limite de diffraction. Cet asservissement fonctionne à temps discret, avec une période d'échantillonnage T_e .

Nous proposons ici d'étudier de façon simplifiée (mais néanmoins réaliste) cet asservissement dans le cas scalaire, afin d'en comprendre le comportement général. Ceci sera utile par la suite lorsque nous analyserons les résultats expérimentaux.

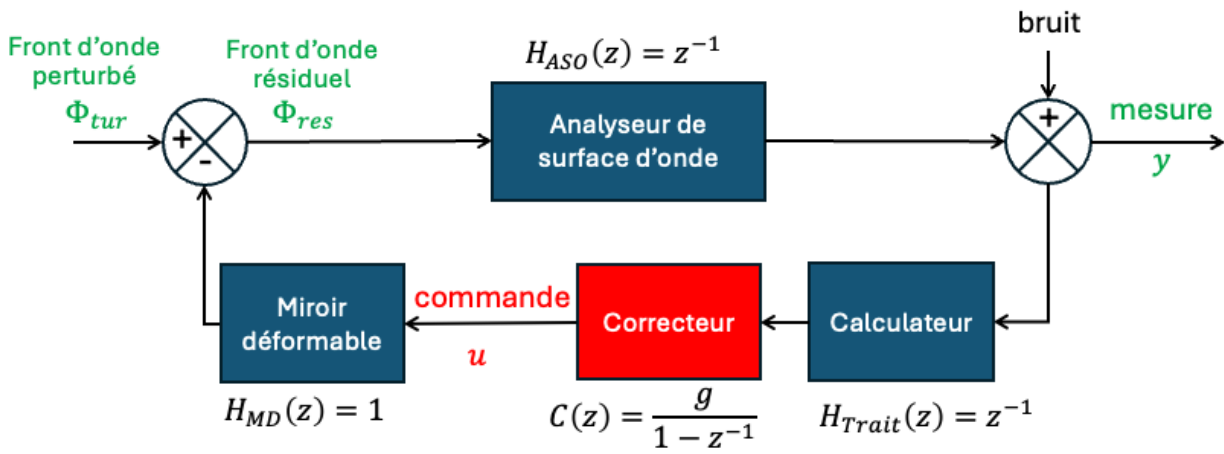


FIGURE 1.3 – Schéma de principe de l'asservissement

Dans cette description simplifiée, la mesure du front d'onde résiduel (après correction) est notée y et la commande appliquée au miroir déformable est notée u . Si l'asservissement est efficace, la correction conduira à un front d'onde résiduel suffisamment faible pour que l'image obtenue soit considérée comme étant en limite de diffraction, avec des mesures y qui seront alors proches de 0.

À l'instant t_k , la commande u_k est calculée à partir de la mesure y_k grâce à un correcteur C à action intégrale (intégrateur pur de gain g , utilisé sur tous les systèmes opérationnels - correspondant à la composante I d'un correcteur PID). L'équation de récurrence du correcteur associée est simplement :

$$u_k = u_{k-1} + g \times y_k$$

et sa fonction de transfert, obtenue en passant par la transformée en z de cette équation, est :

$$C(z) = \frac{g}{1 - z^{-1}}$$

On peut considérer que la fonction de transfert de l'analyseur correspond à un simple retard d'une période T_e , soit $H_{ASO} = z^{-1}$ et que le calculateur temps-réel (qui réalise le calcul des mesures et de la commande) correspond également à un retard d'une période, tandis que le miroir déformable répond parfaitement et instantanément (transfert de 1). Cela correspond donc à un retard de boucle total de deux périodes T_e . La fonction de transfert

en boucle ouverte, produit de tous les blocs dans la boucle, est simplement :

$$L(z) = \frac{g \times z^{-2}}{1 - z^{-1}}$$

P5 Donner l'expression de la fonction de transfert de réjection en boucle fermée $S(z) = \frac{\Phi_{res}}{\Phi_{tur}}$ (ou fonction de sensibilité) du système.

P6 Déterminer la condition de stabilité du système en boucle fermée. En particulier, que se passe-t-il pour $g \geq 1$?

P7 La figure 1.4 présente le module $|S|$ de la fonction de transfert de réjection en fonction de la fréquence (normalisée à la fréquence d'échantillonnage $F_e = \frac{1}{T_e}$), pour plusieurs valeurs du gain de l'intégrateur. Quelle est la bande passante de correction à -3 dB de l'asservissement, pour ces différentes valeurs de gain, en fonction de F_e ? Commenter les résultats dans la perspective de l'application.

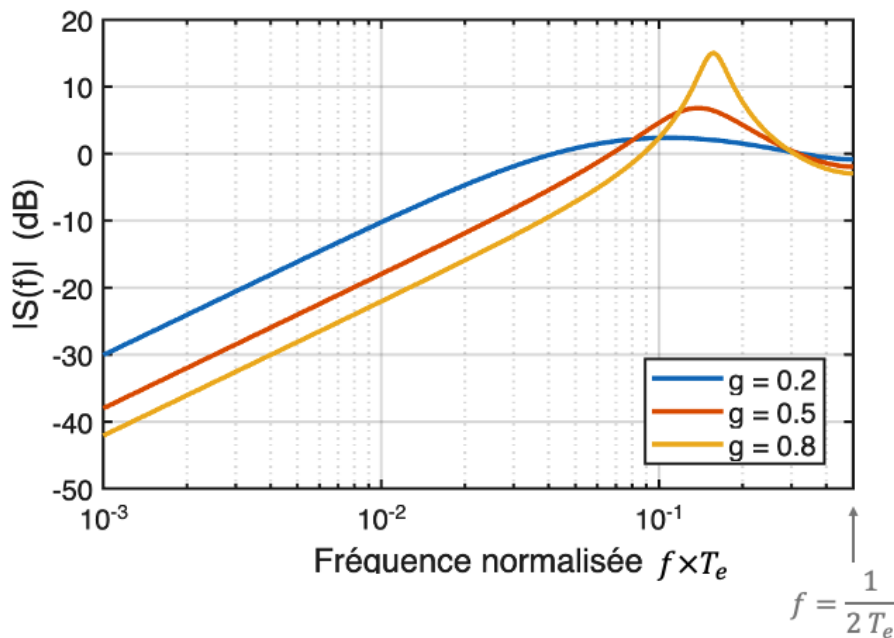


FIGURE 1.4 – Module de la fonction de transfert de réjection en boucle fermée, pour plusieurs valeurs du gain g du correcteur

2 Mise en route de l'expérience

2.1 Allumage et vérification de la conjugaison des pupilles

↪ Allumer l'alimentation de la diode laser et régler le flux à l'aide du potentiomètre afin de bien voir le faisceau.

↪ Vérifier que le faisceau est bien collimaté par la lentille L1.

- ↪ Repérer les différents éléments et vérifier leur position.
- ↪ Vérifier que la pupille du système complet est le miroir déformable MIRA0, c'est-à-dire que c'est le seul élément qui limite la dimension transverse du faisceau.
- ↪ Allumer l'alimentation Imagine Eye du miroir et de l'HASO, puis lancer le logiciel WaveTune. Après avoir cliqué sur OK **sans rien modifier dans la fenêtre « session manager »**, la fenêtre principale de la figure 1.5 s'ouvre.



FIGURE 1.5 – Fenêtre principale du logiciel

- ↪ Lancer l'acquisition avec le bouton Play  dans l'onglet WaveTune-AO - cf. figure 1.6
- ↪ Cliquer sur le bouton  dans le rectangle du bas pour ouvrir la fenêtre HASO SENSOR puis sur  pour visualiser la caméra de l'analyseur HASO (taches-images des microlentilles) - cf. figure 1.6 :
- ↪ Régler l'alimentation de la diode laser pour obtenir un éclairage suffisant sur l'analyseur HASO (saturation >80 %), mais non saturé.
- ↪ Centrer si besoin (vérifier auparavant si c'est nécessaire) la pupille sur l'HASO à l'aide des vis de réglage transverse de L3.



FIGURE 1.6 – Opérations conduisant à la fenêtre HASO SENSOR : signal de la caméra et accès aux autres menus du HASO

↪ En pivotant **très légèrement** le miroir déformable à l'aide des vis de la platine d'orientation, vérifier que les taches images se déplacent, mais pas la pupille dans son ensemble.

Q1 Expliquer pourquoi cela permet de vérifier la qualité de conjugaison entre miroir déformable et HASO (cf. préparation P3).

↪ Lancer le logiciel *uEye Cockpit* qui pilote la caméra CMOS de visualisation. Observer l'image par le montage du point-source issu de la diode laser fibrée, qui est par définition la réponse percussionnelle incohérente du dispositif (appelée aussi fonction d'étalement de point (FEP) ou *Point Spread Function* (PSF)).

↪ Ajuster à la main la position de la caméra sur le rail et le temps d'exposition dans les paramètres de la caméra (voir figure 1.7) pour obtenir la tache-image dans le plan de meilleure mise au point (ne pas dépasser 30 MHz en horloge pixel et 10 fps).

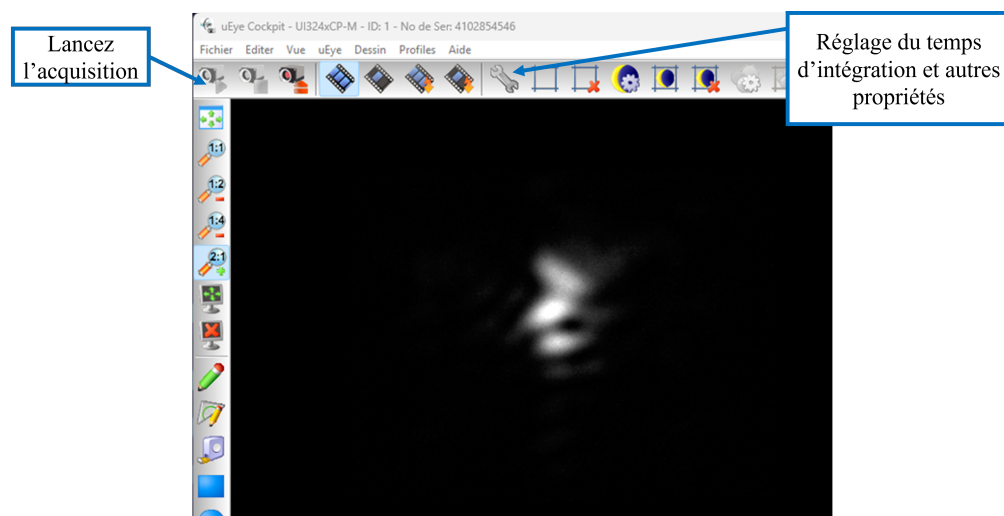


FIGURE 1.7 – Menus et réglage des paramètres d'acquisition de la caméra

2.2 Analyse du front d'onde

Le défaut du front d'onde (par rapport à la sphère) mesuré par l'analyseur est essentiellement dû à la forme du miroir déformable au repos, en l'absence de consigne.

↪ Lancer, en parallèle de WaveTune, le logiciel WaveView, qui permet une analyse plus fine du front d'onde mesuré (décomposition de Zernike, modélisation de la réponse percussionnelle, évolution temporelle et analyse statistique des valeurs numériques ...). Ce logiciel d'analyse fonctionne en mode 'esclave' par rapport à WaveTune : il ne peut faire de mesure que si ce dernier est lancé. *Un mode d'emploi de ce logiciel est à votre disposition dans la salle.*

↪ Observer la forme du front d'onde analysé par l'HASO et la décomposition sur la base de Zernike, en gardant tous les termes (TILT et FOCUS inclus).

Q2 Quels sont les termes prépondérants ? Est-ce cohérent avec l'analyse préliminaire (cf. question de préparation P4) ?

↪ Retirer les termes de TILT et FOCUS (ou *curvature*) : observer les défauts résiduels du front d'onde.

Q3 Quel est le défaut du front d'onde résiduel (PV et RMS) quand tous les actionneurs du miroir sont à zéro ?

Q4 Quels sont à présent les termes prépondérants de la décomposition du front d'onde ? Que pouvez-vous en conclure sur la forme du miroir ? Expliquer pourquoi ce défaut n'est pas forcément gênant dans un montage d'optique adaptative.

↪ Dans WaveTune, il est possible d'afficher en parallèle (à partir des icônes de la fenêtre HASO SENSOR, voir la figure 1.6) l'image du front d'onde reconstruit grâce aux mesures et le calcul de la tache image (PSF). Ces résultats sont accessibles dans WaveView également.

↪ Comparer la tache image expérimentale visualisée sur la caméra uEye et celle simulée à partir de la mesure de front d'onde.

Q5 Rappeler la définition du rapport de Strehl ; relever la valeur estimée par le logiciel.

2.3 Étude du miroir déformable

Le miroir MIRA0 est un miroir magnétique. De petits aimants collés sous la surface du miroir sont attirés ou repoussés par des solénoïdes. Son principe est décrit sur le schéma de la figure 1.8 :

↪ Le bouton  dans le rectangle du milieu de la figure 1.5 ouvre la fenêtre WAVEFRONT CORRECTOR, affiché en figure 1.9, où l'on peut visualiser la position des actionneurs.

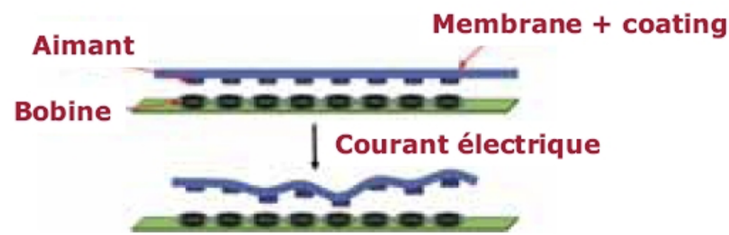


FIGURE 1.8 – Principe d'un miroir déformable magnétique

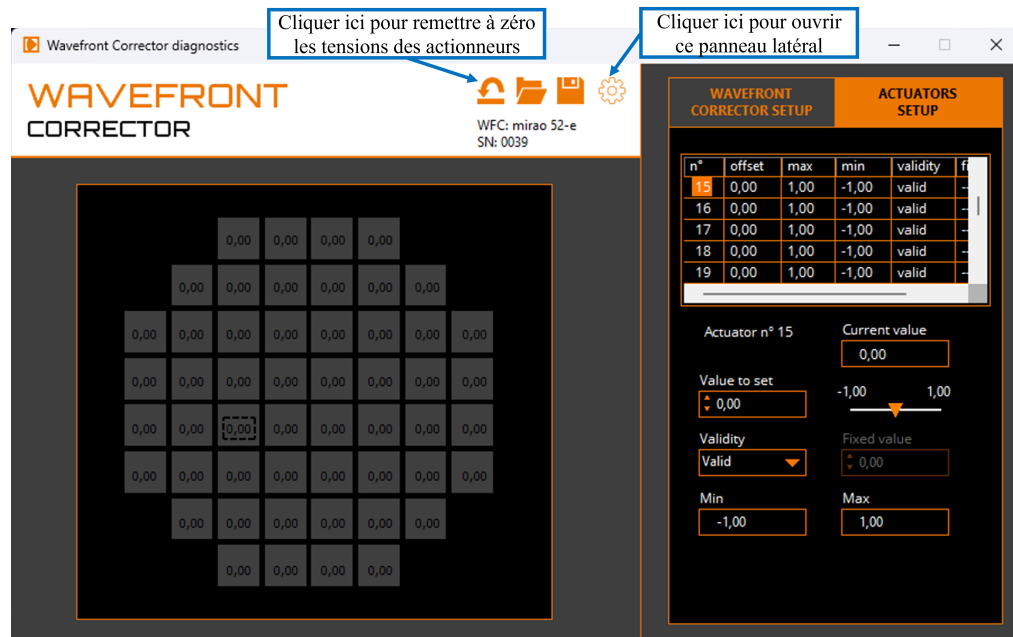


FIGURE 1.9 – Fenêtre d'affichage des actionneurs

↪ Cliquer sur un actionneur pour modifier le courant dans la bobine correspondante. Observer simultanément la tache image à la caméra uEye, le signal caméra de l'HASO et le front d'onde mesuré.

↪ Utiliser le bouton  pour effectuer une remise à zéro du miroir.

Pour vérifier la linéarité du miroir déformable avec la commande des actionneurs, nous allons faire varier la consigne appliquée à l'un des actionneurs et mesurer les déformations résultantes du front d'onde mesurées par l'analyseur de front d'onde. Il est nécessaire de faire cette mesure **en gardant l'ensemble des termes dans l'analyse du front d'onde sous WaveView**, à partir d'une mesure de référence lorsque tous les actionneurs sont remis à zéro.

↪ Sauvegarder une mesure brute du front d'onde (mesure de référence), puis choisir cette mesure comme référence pour les mesures de linéarité qui suivent (cf. figures 1.10 et 1.11 et le mode d'emploi WaveView disponible dans la salle).

⇒ L'amplitude du front d'onde résiduel doit être très faible, limitée par le bruit de la mesure.

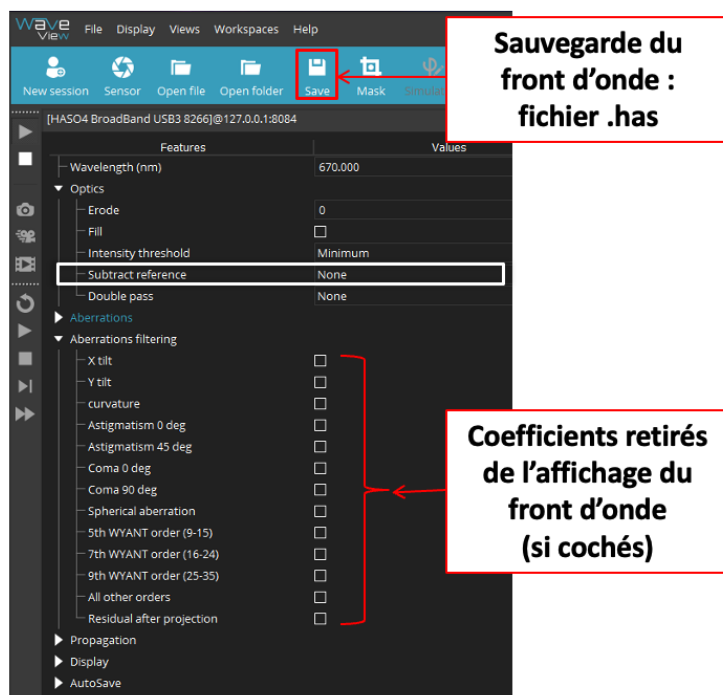


FIGURE 1.10 – Sous WaveView, création d'un fichier de référence pour la mesure de front d'onde

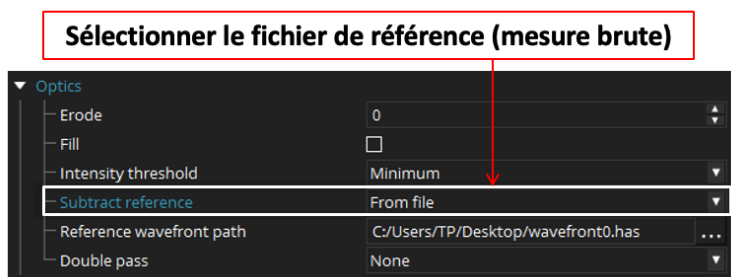


FIGURE 1.11 – Sous WaveView, mesure référencée de front d'onde

↪ Sélectionner un actionneur central ; augmenter progressivement la consigne appliquée et étudier l'évolution du défaut de front d'onde (PV) qui en résulte.

Q6 Quels sont les défauts de front d'onde qui apparaissent ? Comment cela s'explique ?

Q7 Sur quel intervalle de la consigne de l'actionneur l'amplitude de variation de front d'onde reste-t-elle linéaire ?

↪ Remettre à zéro l'actionneur. Vérifier que la référence est toujours satisfaisante (front d'onde résiduel dans le bruit de mesure). Sélectionner l'un des actionneurs au bord du miroir et reprendre la même étude de linéarité que précédemment.

Q8 Présenter sur un graphique l'évolution de l'amplitude du front d'onde mesurée en fonction de la consigne appliquée pour ces deux actionneurs, et commenter les données.

Q9 Les défauts de linéarité seront-ils gênants pour l'asservissement ?

↪ À partir d'ici, il est possible de retirer systématiquement les termes de FOCUS et TILT des analyses de front d'onde.

3 Calibration du dispositif d'optique adaptative

L'asservissement le plus simple du système d'optique adaptative implique de pouvoir évaluer les consignes $\vec{V}_{\text{act}}$ à appliquer aux actionneurs du miroir déformable pour compenser les défauts du front d'onde mesuré, déduites des déplacements des taches-images $\Delta\vec{G}_{xy}$ formées par les micro-lentilles de l'analyseur. Cette relation s'obtient en deux étapes :

- **construction de la matrice d'interaction** I_M : il s'agit de trouver une relation linéaire entre les consignes appliquées aux actionneurs et les mesures à l'HASO

$$\Delta\vec{G}_{xy} = I_M \vec{V}_{\text{act}}$$

- **calcul de la matrice de commande** M_{com} : il s'agit de déterminer les valeurs de consigne à appliquer aux actionneurs en fonction des mesures de front d'onde

$$\vec{V}_{\text{act}} = M_{\text{com}} \Delta\vec{G}_{xy}$$

Ces deux étapes sont gérées par le logiciel WaveTune. On peut noter que la mesure des déplacements des taches $\Delta\vec{G}_{xy}$ est toujours faite par rapport à une position de consigne $\vec{G}_{xy,\text{consigne}}$ (correspondant au front d'onde de référence choisi, par défaut ici la sphère de référence de la question P4), soit :

$$\Delta\vec{G}_{xy} = \vec{G}_{xy,\text{consigne}} - \vec{G}_{xy}.$$

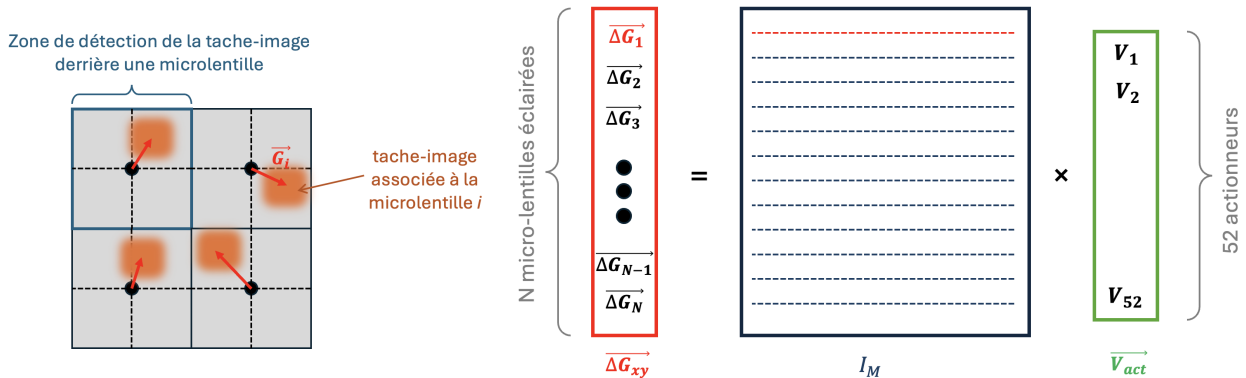


FIGURE 1.12 – (gauche) Schéma de principe de la mesure des pentes locales avec l'HASO ; (droite) définition de la matrice d'interaction

3.1 Construction de la matrice d'interaction I_M

Pour la calibration, la même consigne est appliquée successivement à chaque actionneur : les mesures des déplacements des taches-images $\Delta\vec{G}_{xy} = I_M$ du Shack-Hartmann forment successivement les colonnes de la matrice d'interaction I_M (cf. figure 1.12).

↪ La construction de la matrice d'interaction est effectuée dans l'onglet WaveTune-AO calib et lancée par le bouton Play ▶, voir figure 1.13 ci dessous.

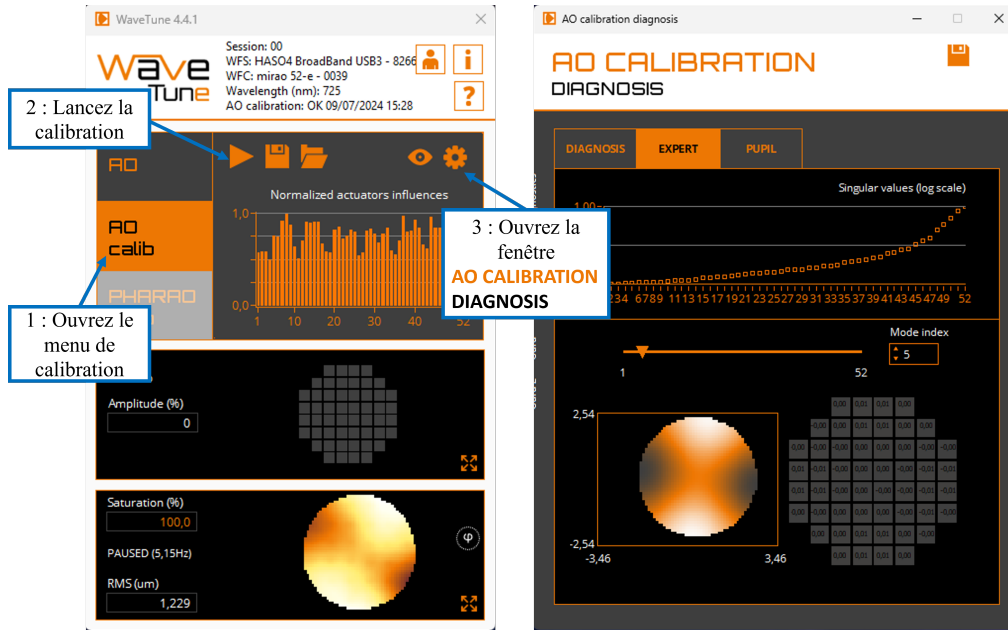


FIGURE 1.13 – Menus pour construire et analyser la matrice d'interaction et la matrice de commande

Le logiciel pilote les actionneurs un par un, en les poussant, puis en les tirant (*Push/Pull experiment*). Pour chacun des actionneurs, la mesure correspond au déplacement moyen des spots calculé par le Shack-Hartmann. Ainsi, pour chaque actionneur j_{act} , on obtient un vecteur colonne

$$\Delta \vec{G}_{xy} = (\dots, \Delta G_{i,x}, \Delta G_{i,y}, \dots)$$

pour i variant de 1 à $N_{\text{microlentilles}}$, où $N_{\text{microlentilles}}$ est le nombre de microlentilles éclairées dans la pupille du Shack-Hartmann). Ce vecteur de plusieurs centaines de lignes sera la j_{act} -ième colonne de la matrice d'interaction I_M . Cette matrice d'interaction est donc une matrice rectangulaire de $(2 \times N_{\text{microlentilles}})$ lignes par 52 colonnes.

Le logiciel WaveTune calcule aussi, à partir des mesures de l'HASO, la variation du front d'onde dans la pupille induit par chaque actionneur (appelée fonction d'influence de l'actionneur).

↪ Ouvrir l'onglet DIAGNOSIS de la fenêtre WaveTune-AO calib et visualiser les fonctions d'influence de chaque actionneur (cf. figure 1.13).

Q10 Commenter l'allure et l'amplitude relative de ces fonctions d'influence.

Q11 Expliquer pourquoi les fonctions d'influence donnent une information sur la disposition des actionneurs.

3.2 Calcul de la matrice de commande

La matrice d'interaction I_M étant connue, il devrait suffire d'inverser le système linéaire

$$\Delta \vec{G}_{xy} = I_M \vec{V}_{\text{act}}.$$

pour obtenir la matrice de commande M_{com} . Or la matrice d'interaction I_M est rectangulaire, donc n'est pas inversible. Il faut alors avoir recours à une inverse généralisée (ou pseudo-inverse), ce qui se fait en passant par une décomposition en valeurs singulières.¹

Le calcul de la matrice de commande M_{com} est fait automatiquement par WaveView après la construction de la matrice d'interaction I_M . Cette matrice M_{com} détermine les modes de commande du miroir (c'est-à-dire des combinaisons de déplacement d'actionneurs définissant une base propre de mode) et les valeurs singulières associées.

↪ Visualiser la forme des modes de commande et les consignes appliquées à chaque actionneur, dans l'onglet EXPERT de la fenêtre AO CALIBRATION DIAGNOSIS - voir figure 1.13.

↪ Identifier l'allure des premiers modes, en termes de fronts d'onde d'aberration.

↪ Observer les modes les plus élevés, qui correspondent aux valeurs singulières de la matrice d'interaction les plus faibles.

Q12 Qu'implique, pour la correction d'un front d'onde, le fait que ces modes d'ordre élevé soient associés à des consignes fortes appliquées aux actionneurs ?

4 Fonctionnement en boucle fermée

4.1 Réglage du correcteur



FIGURE 1.14 – Fenêtre « AO SETTING » permettant de régler les paramètres de l'asservissement et fermeture de la boucle dans l'onglet « AO »

1. voir en annexe quelques éléments complémentaires sur cette méthode

↪ Revenir au menu WaveTune-AO et ouvrir la fenêtre AO SETTING qui s'ouvre en cliquant sur le bouton  - voir la figure 1.14. Cette fenêtre permet de régler les paramètres de la boucle d'asservissement : gain de l'intégrateur g , nombre de modes de commandes choisi pour le miroir déformable.

Le choix du **nombre de modes conservés** dans la matrice de commande est un compromis entre deux propriétés qui s'opposent : les marges de stabilité de l'asservissement, et sa capacité à corriger les défauts du front d'onde de hautes fréquences spatiales - donc sa performance. La matrice effectivement utilisée dans la boucle d'asservissement est donc la matrice de commande tronquée $M_{\text{com-filt}}$, limitée au nombre de modes choisi (cf. Annexe 3).

Le **gain g de l'intégrateur** règle l'amplitude de la correction. La matrice de commande tronquée $M_{\text{com-filt}}$ est multipliée par le gain g . Si g est choisi très proche de 1, les consignes appliquées aux actionneurs tentent de corriger la totalité de la déformation du front d'onde en une seule fois. Mais, dans ce cas, l'asservissement risque de se déstabiliser si la perturbation évolue (marges de stabilité insuffisantes) - cf. annexe 3.

↪ Dans un premier temps, garder les 52 modes, choisir un gain intermédiaire autour de 0.5, et sélectionner le mode d'asservissement « Continuous ».

4.2 Réglage de la consigne

La consigne de l'asservissement est par défaut le vecteur des positions des taches images sur l'HASO correspondant à un front d'onde parfaitement sphérique.

↪ Ouvrir la fenêtre BEAM SHAPER dans le menu WaveTune-AO de la fenêtre principale - cf. figure 1.15

↪ On choisit comme consigne le dernier front d'onde mesuré, dont on a soustrait toutes les aberrations (on ne garde que les termes de *focus* et de *tilt* du front d'onde mesuré par l'HASO).

4.3 Boucle d'asservissement

On va maintenant chercher à corriger le front d'onde en utilisant la boucle d'asservissement suivante :

I Lecture de l'image caméra de l'HASO

II Calcul des positions des taches-images derrière les microlentilles ; on obtient un vecteur déplacement :

$$\Delta \vec{G}_{xy} = \vec{G}_{xy, \text{consigne}} - \vec{G}_{xy}$$

III Calcul du produit de ce vecteur par la matrice de commande filtrée $M_{\text{com-filt}}$ et par le gain g :

$$\Delta \vec{V}_{\text{act}} = g M_{\text{com}} \Delta \vec{G}_{xy}$$

IV Envoi vers le miroir des nouvelles valeurs de consignes ainsi calculées :

$$\vec{V}_{\text{actNouveau}} = \vec{V}_{\text{actPrécédent}} + \Delta \vec{V}_{\text{act}}$$

Il s'agit d'un asservissement de type « intégrateur pur » - cf. section 1.2.



FIGURE 1.15 – Fenêtre « BEAM SHAPER »

↪ Dans la fenêtre AO SETTING, choisir le gain de l'intégrateur, et le nombre de modes conservés dans la matrice de commande (cf. section 4.1)

↪ Lancer l'asservissement en fermant la boucle ('Closed Loop = ON')

↪ Observer l'amélioration de la tache image sur la caméra uEye - il peut être nécessaire de corriger la mise au point et d'ajuster le temps d'exposition

↪ Analyser la mesure du front d'onde : quels sont les défauts résiduels ? Quelle est l'amplitude RMS du front d'onde, par rapport à la référence sphérique ?

↪ Relever la valeur du rapport de Strehl calculée par le logiciel.

↪ Mesurer l'évolution temporelle de l'amplitude RMS du front d'onde grâce au logiciel WaveView (cf. documentation) après avoir lancé l'asservissement.

Q13 Réaliser plusieurs mesures dans des conditions différentes (gain de l'intégrateur, nombre de modes) pour mettre en évidence l'influence de ces paramètres sur la stabilité et la rapidité de l'asservissement. Comparer les performances de quelques configurations choisies et proposer un 'bon' réglage. Est-ce cohérent avec les résultats de l'analyse simplifiée décrite en section 1.2 et en préparation P7.

4.4 Choix d'une consigne quelconque

↪ En utilisant l'onglet BEAM SHAPER (voir la figure 1.15), il est possible de modifier la consigne de l'asservissement. Au lieu de choisir un front d'onde parfaitement sphérique, on

peut ajouter à la consigne des aberrations quelconques dont les défauts de front d'onde sont définis par les polynômes de Zernike.

↪ Observer sur la tache image et sur le front d'onde l'effet d'un tilt, d'un défocus, d'une coma, d'une aberration de trèfle...

Q14 Commenter la qualité des résultats obtenus.

5 Correction en temps réel d'une perturbation

Nous allons maintenant corriger en temps réel une perturbation variable du front d'onde. Cette perturbation est réalisée par une lame de verre d'épaisseur irrégulière tournant lentement et mise sur le trajet de la lumière provenant de la source, entre le doublet L1 et le miroir déformable.

5.1 Mise en évidence de la correction de la perturbation en temps réel

↪ Choisir maintenant l'option « Fast » pour le type d'asservissement dans la fenêtre AO SETTING. La boucle d'asservissement est beaucoup plus rapide car les informations concernant le front d'onde et le miroir (calculs de front d'onde, de tache image, affichages) sont rafraîchies moins souvent qu'en mode « Continuous » (*diagnostics period* : 1 s, par exemple).

↪ Lancer la boucle d'asservissement et observer la stabilité de l'asservissement. Comparer avec vos analyses précédentes.

↪ Stopper l'asservissement et ramener les actionneurs à zéros.

↪ Placer la lame de verre qui joue le rôle de perturbation du front d'onde dans le faisceau, en vérifiant que le faisceau n'est pas écrêté.

↪ Alimenter le moteur avec une faible tension continue (quelques volts). Le moteur doit tourner lentement.

↪ Observer l'influence de la lame sur la tache image et sur les mesures du front d'onde, puis lancer l'asservissement et observer l'amélioration de la tache image : **MAGIQUE!!**

Q15 Relever l'amplitude RMS du front d'onde résiduel, le rapport de Strehl obtenu.

↪ Essayer d'améliorer l'asservissement en jouant sur le gain et le nombre de modes conservés.

↪ Augmenter progressivement la vitesse du moteur, jusqu'au décrochement de l'asservissement.

Q16 Pourquoi, même quand le moteur tourne très lentement, la correction n'est-elle pas parfaite ?

5.2 Correction d'une perturbation sur un objet étendu

Nous allons finalement simuler l'observation d'une scène étendue autour de l'étoile guide (= la source laser), en éclairant simultanément une lame de microscope aluminée qui simule un "ciel étoilé par une nuit d'été".

↪ Stopper le moteur qui fait tourner la lame de verre.

↪ Allumer la diode électroluminescente blanche pour éclairer la lame aluminée.

↪ Augmenter le temps d'exposition de la caméra uEye pour observer les taches lumineuses et/ou régler la puissance transmise à l'aide de la lame $\lambda/2$ dans la voie d'imagerie. Au besoin, mettre le filtre vert BG18 entre le cube séparateur et la caméra, pour réduire l'intensité de l'image de la diode rouge.

↪ Remettre à zéros les actionneurs du miroir déformable.

↪ Faire tourner la lame doucement et observer l'influence de la lame sur l'image, puis lancer l'asservissement et observer l'amélioration de l'image : RE- MAGIQUE !!

Q17 La source laser sert d'étoile guide. Observez la qualité de correction de l'image obtenue avec l'optique adaptative sur l'ensemble du champ : pourquoi la correction se dégrade-t-elle lorsque l'on s'éloigne de l'étoile guide ? Faire un schéma pour répondre à cette question.

Annexe 1 : Spécifications du miroir déformable Mirao-52d

Dimensions	64 × 64 × 23 mm
Weight	0.49 kg
Pupil diameter	15 mm
Number of actuators	52
Inter-actuator spacing	2.5 mm
Coupling factor	70 %
Actuator Input Voltage	[−1 V, +1 V] for each actuator
sum of positive voltages	< 18 V
sum of negative voltages	> −18 V
Coating	Protected silver
Reflectivity	> 95% in [410 nm, 560 nm] > 98% in [560 nm, 800 nm]
Max. admitted light power in continuous mode	5 W/cm ²
Bandwidth	> 200 Hz
Hysteresis	< 2%
Linearity	> 95%
Surface quality in active flat configuration	0.006 μm RMS
Wavefront quality in active flat configuration	0.012 μm RMS
Zernike Wavefront range	Defocus 35 μm PV Astigmatism 30 μm PV Coma 10 μm PV Trefoil 25 μm PV Spherical aberr 08 μm PV 4th order astigm 08 μm PV

Annexe 2 : Spécifications de l'analyseur de front d'onde Shack-Hartmann HASO 4 broadband

Aperture dimensions	7 x 5.2 mm ²
Number of microlenses	50 x 68
Tilt dynamic range	$> \pm 3^\circ (600 \lambda)$
Focus dynamic range	$\pm 0.010 \text{ m to } \infty$
Repeatability (rms)	$< \lambda/200$
Absolute accuracy (rms)	maximum between $\sim \lambda/100$ and 6 nm
Relative accuracy (rms)	$\sim \lambda/150$
Tilt repeatability (rms)	3 μrad
Curvature repeatability (rms)	$2 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$
Spatial sampling	$\sim 103.4 \mu\text{m}$
Maximum acquisition frequency	20 Hz
Processing frequency (depending on PC)	20 Hz
Working spectral range	350 - 1100 nm
Calibrated spectral range	350 - 1100 nm

FIGURE 1.16 – Enter Caption

Annexe 3 : Compléments sur le calcul de la matrice de commande par SVD

Nous détaillons ici le principe du calcul de la matrice de commande à partir de la matrice d'interaction I_M . Le nombre d'actionneurs (52) est significativement plus faible que celui des microlentilles éclairées (plusieurs centaines) : I_M est une matrice rectangulaire de $(2 \times N_{\text{microlentilles}})$ lignes par 52 colonnes, et n'est donc pas inversible. Le problème est traité mathématiquement par l'intermédiaire d'une décomposition en valeurs singulières (SVD, *Singular Value Decomposition*). La SVD « économique » (avec une matrice diagonale carrée) de la matrice d'interaction I_M est obtenue par décomposition en un produit de trois matrices :

$$I_M = U W V^T$$

avec :

U matrice réelle **orthonormée**, $(2 \times N_{\text{microlentilles}}) \times 52$,

W matrice réelle **diagonale** 52×52 ,

V matrice réelle **orthonormée** 52×52 .

Les éléments diagonaux de la matrice W , toujours réels et positifs, sont appelés les valeurs singulières de la matrice d'interaction. Les matrices U et V étant orthonormées, cette décomposition permet de calculer la pseudo-inverse (ou inverse généralisée) de la matrice d'interaction sous la forme :

$$P = V W^- U^T$$

où W^- est la matrice diagonale constituée des inverses des valeurs singulières non nulles. L'intérêt du pseudo-inverse de la matrice d'interaction est qu'il permet de déterminer un vecteur de consignes, $\vec{V}_{\text{act}} = P \Delta \vec{G}_{xy}$, solution du problème au sens des moindres carrés vérifiant :

$$\left\| \Delta \vec{G}_{xy} - I_M \vec{V}_{\text{act}} \right\|_2^2 \text{ est minimale et de norme } \left\| \vec{V}_{\text{act}} \right\|_2 \text{ minimale.}$$

Cette méthode permet aussi de contrôler les grandeurs relatives des valeurs singulières. Et ceci est très important pour obtenir une bonne stabilité en boucle fermée. En effet, une valeur singulière trop faible en comparaison des autres valeurs indique l'existence d'une combinaison de consignes (ou d'un mode de commande du miroir déformable) ayant un effet faible, voire négligeable, sur les déplacements des barycentres : la matrice W est « mal conditionnée. »

La matrice I_M présente toujours plusieurs valeurs singulières de ce type. Par exemple, si on applique la même consigne à tous les actionneurs en même temps, on obtient un mode appelé « mode piston » : le miroir ne fait que se translater dans son ensemble. Un tel mode ne peut effectivement pas être mesuré par le Shack-Hartmann (la valeur singulière correspondante est donc nulle en théorie et n'a pas d'influence sur la qualité de l'image).

Garder une valeur singulière trop faible est source de problème : la matrice diagonale W^- aura un terme de valeur très élevée, entraînant rapidement la saturation des actionneurs et donc l'échec complet de la correction. La solution consiste à tronquer les valeurs trop faibles de W , c'est-à-dire à les remplacer par des zéros. On n'inverse ensuite que les

valeurs non nulles, ce qui donne une matrice W_{tronq}^- de la forme :

$$W_{\text{tronq}}^- = \left(\begin{array}{ccc|ccc} \sigma_1^{-1} & & & & 0 & \\ & \ddots & & & \vdots & \\ & & \sigma_{n_\sigma}^{-1} & & 0 & \\ \hline 0 & \dots & 0 & 0 & \ddots & 0 \end{array} \right)$$

où n_σ est le nombre de valeurs singulières non nulles conservées. La matrice M_{com} est alors obtenue par :

$$M_{\text{com}} = V W_{\text{tronq}}^- U^T.$$

I 2

Mesures de la Fonction de Transfert de Modulation d'un système optique dans le visible

par Transformée de Fourier de l'image d'une fente

Version du 10 septembre 2026

Pré-requis

- Origine et analyse des aberrations géométriques et chromatiques d'un système optique
- Principes et méthodes de mesure de la réponse percussionnelle d'un système optique : cf. TP 2A « Point lumineux ».
- Fonction de transfert d'un système optique : définition, sens physique, lien avec les aberrations d'un système optique
- Échantillonnage d'un signal

Préparation du TP

- Lisez le texte du TP, en particulier la description des montages expérimentaux et des méthodes générales.
- Révissez vos cours et TP des années passées sur les notions importantes mises en œuvre dans cette séance (cf. pré-requis).
- Répondez aux questions de préparation **P1** à **P7** avant la séance.

Sommaire

1	Préparation du TP	27
1.1	Fonction de Transfert Optique	27
1.2	Prise en compte du capteur CMOS d'analyse	29
2	Mesure directe du contraste d'une mire objet	30
3	Mesure de FTM par l'image d'une fente	31
3.1	Description du banc de mesure de l'image de la fente	31
3.2	Mise en œuvre expérimentale	32
4	Conclusions	34

Introduction

La Fonction de Transfert Optique – ou fonction de transfert de modulation (FTM) si l'on ne s'intéresse qu'à son module – d'un système optique est une spécification très utilisée dans le monde de l'optique industrielle pour caractériser la résolution des systèmes optiques d'imagerie. En effet, ces optiques d'imagerie sont en général associées à des capteurs matriciels (caméra CMOS, caméra infrarouge, appareil photo numérique, etc.) pour lesquels on définit également une Fonction de Transfert de Modulation. Le produit de ces deux fonctions de transfert, de l'optique et du capteur, permet d'obtenir la Fonction de Transfert de Modulation de l'ensemble du système d'imagerie :

$$FTM_{\text{système}}(\sigma') = FTM_{\text{optique}}(\sigma') \times FTM_{\text{capteur}}(\sigma')$$

où σ' est la fréquence spatiale de modulation dans le plan image du système optique (et donc du capteur matriciel).

Il existe un grand nombre de techniques de mesure de la FTM. Vous avez déjà vu au cours des TP aberrations de 2ème année (Zygo, Haso) des méthodes indirectes qui utilisent la mesure du front d'onde pour obtenir la réponse percussionnelle par calcul de la Transformée de Fourier de l'amplitude du champ dans la pupille, puis la FTM par une seconde Transformée de Fourier. Un des défauts de ce type de mesure est qu'il est délicat d'obtenir une FTM en éclairage polychromatique.

Nous mettrons en œuvre ici deux méthodes de mesure de la fonction de transfert d'un système optique d'imagerie.

Mesure du taux de modulation (contraste) de mires de traits noir et blanc : cette méthode constitue une réalisation directe de la définition de la FTM du système d'imagerie complet (objectif + capteur), le montage est celui de la figure 2.1.

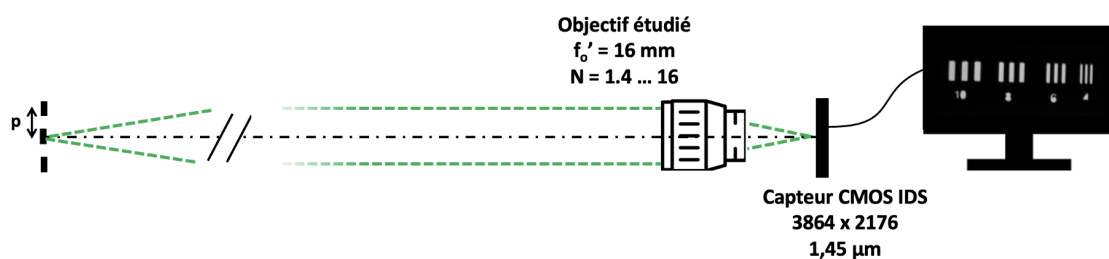


FIGURE 2.1 – Montage 1

Mesure de la répartition d'éclairement, dans le plan image, associée à une fente objet très fine, dont on calcule numériquement la transformée de Fourier. Il existe de nombreuses variations de cette méthode, qu'il s'agisse d'utiliser un trou-source plutôt qu'une fente, ou d'une lame. le montage est celui de la figure 2.2.

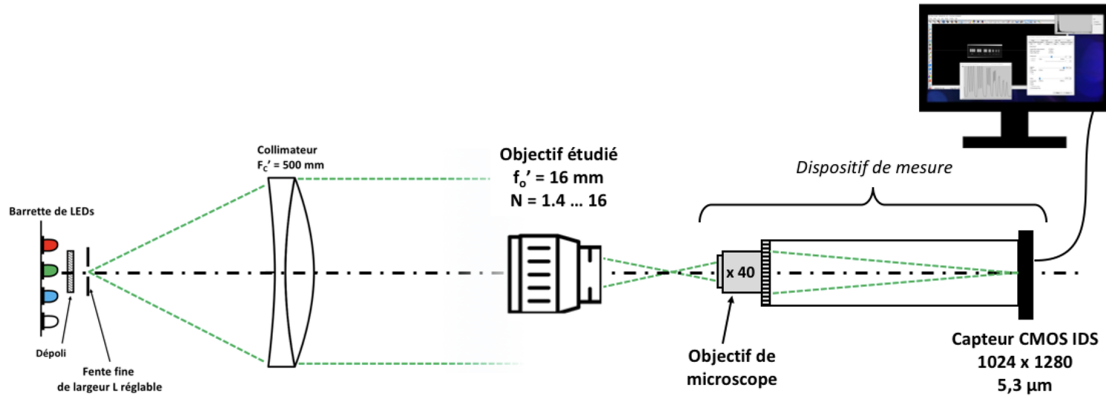


FIGURE 2.2 – Montage 2

1 Préparation du TP

L'objectif qui sera étudié est un objectif de caméra vidéo CCTV de focale 16 mm et de nombre d'ouverture variable $N = 16, \dots, 1.4$

1.1 Fonction de Transfert Optique

L'image d'un point source par un dispositif optique est sa réponse percussionnelle, ou fonction d'étalement du point (Point Spread Function). C'est l'équivalent spatial de la réponse impulsionnelle d'un système électronique. Pour augmenter le flux lumineux détecté, il est fréquent d'observer plutôt l'image d'une fente-source, qui donne accès à la fonction d'étalement de la ligne (Line Spread Function) dans le cas d'une fente idéale infiniment fine :

$$\text{LSF}(x') = \int \text{PSF}(x', y') dy'$$

La **fonction de transfert optique** est évaluée à partir de la transformée de Fourier de la réponse percussionnelle, normalisée à sa valeur à 0.

$$\text{FTO}(\sigma'_x, \sigma'_y) = \frac{\iint \text{PSF}(x', y') \times e^{\left(\frac{-2i\pi}{\lambda}(\sigma'_x x' + \sigma'_y y')\right)} dx' dy'}{\iint \text{PSF}(x', y') dx' dy'}$$

La fonction de transfert de l'objectif étudié est définie – et mesurée – en fonction des fréquences spatiales σ'_x, σ'_y dans le plan image du système optique étudié. La fonction de transfert de modulation (FTM) est le module de la fonction $\text{FTO}(\vec{\sigma}')$. C'est cette grandeur qui nous intéressera par la suite. Dans le cas d'un système optique en limite de diffraction, avec une pupille circulaire et homogène, la réponse percussionnelle est une tache d'Airy et la fonction de transfert associée est :

$$\text{FTM}_{\text{diff}}(\sigma') = \frac{2}{\pi} \left(\arccos\left(\frac{\sigma'}{\sigma'_C}\right) - \frac{\sigma'}{\sigma'_C} \times \sqrt{1 - \left(\frac{\sigma'}{\sigma'_C}\right)^2} \right)$$

Remarquons que la fonction de transfert optique est définie pour un éclairage monochromatique. Dans le cadre d'un éclairage polychromatique (par exemple en lumière blanche), on peut définir une fonction de transfert de modulation moyenne par :

$$\text{FTM}_{\text{poly}\lambda}(\sigma') = \frac{1}{\sum_i w_i} \sum_i w_i \text{FTM}_{\lambda_i}(\sigma')$$

où FTM_{λ_i} est la fonction de transfert de modulation monochromatique mesurée à la longueur d'onde λ_i , et w_i le poids de cette longueur d'onde dans le spectre étudié.

P1 Calculez le diamètre de la réponse percussionnelle (PSF) d'un système optique en limite de diffraction à $N = 1,4$ et $N = 16$, de pupille circulaire uniformément éclairée, à la longueur d'onde $\lambda = 0,63 \mu\text{m}$.

P2 Rappelez ce que représente physiquement la FTM d'un système optique. Justifiez que toute FTM d'un système optique est un filtre passe-bas dont vous exprimerez la fréquence de coupure σ'_C en fonction de N . Donnez ces fréquences de coupure (en mm^{-1}) pour $N = 1,4 - 2 - 4 - 5,6 - 8 - 11 - 16$ à la longueur de longueur d'onde $\lambda = 0,63 \mu\text{m}$.

P3 Montrez que la transformée de Fourier de l'image d'une fente-source infiniment fine ($\text{LSF}(x')$) donne accès à la FTM dans la direction perpendiculaire à la fente.

P4 Les courbes de la figure 2.3 reproduisent la LSF d'un système en limite de diffraction et avec un défaut de mise au point, ainsi que les profils des FTM associées. Pouvez-vous identifier le cas en limite de diffraction? Comparez la LSF en limite de diffraction avec l'évaluation du diamètre de la tache d'Airy (**P1**). Les profils de FTM sont-ils compatibles avec votre évaluation de la fréquence de coupure à $N = 1,4$ (**P2**) ?

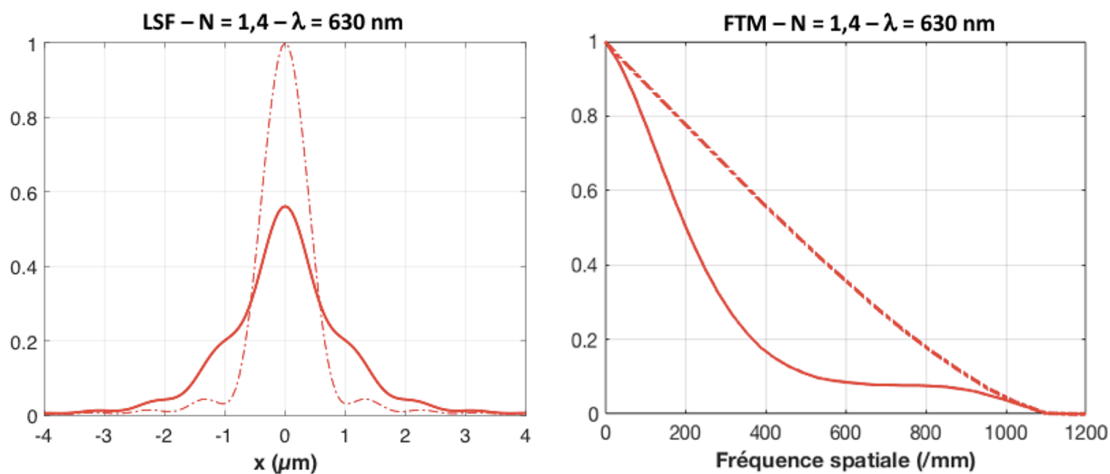


FIGURE 2.3 – LSF et FTM d'un système optique de nombre d'ouverture $N = 1,4$ à $\lambda = 630 \text{ nm}$, en limite de diffraction et en présence d'un défaut de mise au point

P5 Rappelez le lien entre le taux de modulation de l'éclairement de l'image d'une mire sinusoïdale et la fonction de transfert de modulation. Quelle est la fréquence spatiale et le

contraste (taux de modulation) de l'image de la mire de la figure 2.4 ci-dessous ? À quelle FTM de la figure 2.3 correspond-elle ?

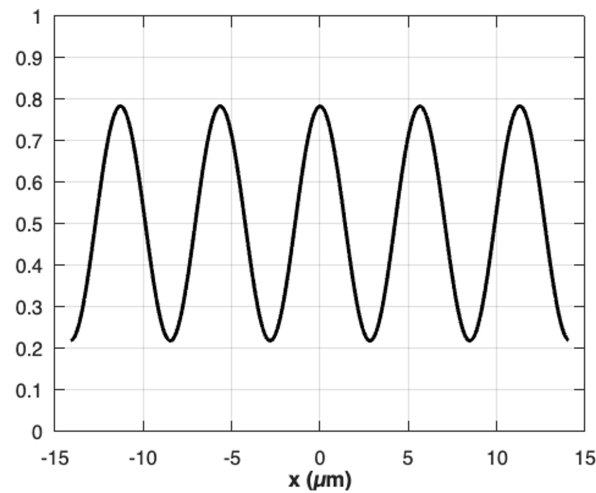


FIGURE 2.4 – Profil d'éclairement normalisé de l'image d'une mire sinusoïdale.

1.2 Prise en compte du capteur CMOS d'analyse

Les caméras uEye utilisées pour l'observation directe de la mire (montage 1) et sur le banc de mesure (montage 2) sont constituées de capteurs CMOS monochromes, avec des pixels carrés adjacents, dont les caractéristiques respectives sont précisées sur les schémas des figures 2.1 et 2.2.

Les capteurs réalisent donc d'une part un **échantillonnage spatial** de la répartition d'éclairement de l'image observée (voir une illustration de ce phénomène sur la figure 2.5), d'autre part ils introduisent un **filtrage spatial** de l'image du fait de la dimension finie des pixels. La fonction de transfert associée doit a priori être prise en compte dans l'analyse de l'image numérisée observée.

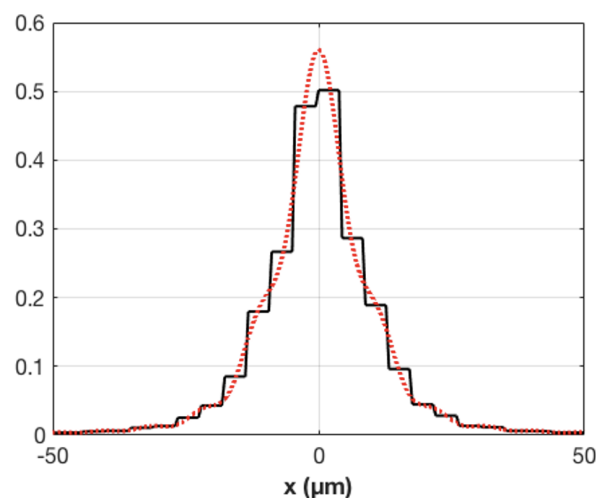


FIGURE 2.5 – Profil d'éclairement échantillonné sur le capteur d'une LSF expérimentale

P6 Rappelez l'expression de la fonction de transfert de modulation du capteur. Calculez sa fréquence de coupure.

P7 Quelle est la fréquence spatiale d'échantillonnage σ'_e de l'image de la mire dans le dispositif de mesure 1 ? Déduisez-en la fréquence de Nyquist associée.

2 Mesure directe du contraste d'une mire objet

L'objectif étudié est associé à un capteur CMOS (3864×2176 pixels adjacents, côté $c = 1,45 \mu\text{m}$), et l'image obtenue est observée sur l'écran via son logiciel uEye de pilotage. L'objet imagé est situé à une distance de 3 mètres de la caméra, il s'agit de mires constituées de traits régulièrement espacés et de rapport cyclique 0,5. La période des mires disponibles est comprise entre $p = 10 \text{ mm}$ et $p = 1 \text{ mm}$.

↪ **Consultez le mode d'emploi du capteur** (cf. documentation disponible dans la salle).

↪ Éclairez l'objet, observez l'image des mires obtenue à l'écran via l'application IDS peak Cockpit.

↪ Faites la mise au point sur la mire. Ajustez l'orientation de l'ensemble objectif + capteur pour que l'image soit au centre du capteur (au plus près de l'axe de l'objectif).

↪ Observez le profil des images des mires, assurez-vous que l'image n'est pas saturée.

↪ Vérifiez les paramètres de la caméra : il est nécessaire de supprimer tout réglage automatique pour ne pas ajouter de traitement numérique et de bruit électronique !

↪ Ajustez la région d'intérêt à la mire, sauvegardez les images de mire.

↪ Utilisez le code Matlab `Analyse_Mire.mlx` pour traiter les images et obtenir les contrastes de chaque mire. Utilisez la documentation dédiée disponible dans la salle.

Q1 Mesurez les différentes fréquences spatiales images σ' associées aux mires observées. Vérifiez la cohérence de ces valeurs avec la distance focale de l'objectif.

Q2 Mesurez le contraste des images des mires aux différentes périodes spatiales disponibles, et pour plusieurs nombres d'ouverture. Observez l'évolution du contraste avec N à une période donnée.

Q3 Mettez-vous en évidence expérimentalement la fréquence de Nyquist associée à l'échantillonnage de l'image par le capteur (cf. **P6** – **P7**) ?

Q4 Comparez les évolutions du contraste de l'image de la mire avec celle attendue théoriquement pour l'ensemble 'objectif idéal + capteur'. À partir de vos mesures du contraste, pouvez-vous prévoir à partir de quel nombre d'ouverture N l'objectif est-il en limite de diffraction ?

Q5 Quel est l'impact d'un défaut de mise au point – obtenu en ajustant le réglage de mise au point de l'objectif – sur le contraste des mires ?

Q6 Observez-vous une évolution sensible du contraste de l'image des mires lorsque celles-ci sont situées au bord du champ du capteur ?

Remarque : la fonction de transfert optique est définie pour une mire à profil d'éclairement sinusoïdal (= mire « mono-fréquence spatiale ») et non pour une mire à profil rectangulaire, comme ici : il faudrait donc plutôt comparer les résultats expérimentaux à la fonction de transfert de modulation carrée (« *Square-wave modulation* » ou « *Contrast Transfer Function* »).

3 Mesure de FTM par l'image d'une fente

3.1 Description du banc de mesure de l'image de la fente

Une fente-source réglable est placée au foyer d'un collimateur dioptrique de focale 500 mm. La fente-source, de largeur réglable (250 microns par tour), est éclairée par des LEDs que l'on peut choisir pour fixer la longueur d'onde d'éclairement ou travailler en lumière blanche.

La tête d'analyse de l'image de la fente-source est constituée d'un objectif de microscope de reprise et d'un tube sur lequel on peut placer soit un oculaire, pour une observation visuelle, soit le capteur CMOS.

Ces éléments sont visibles sur la photo du montage de la figure 2.6

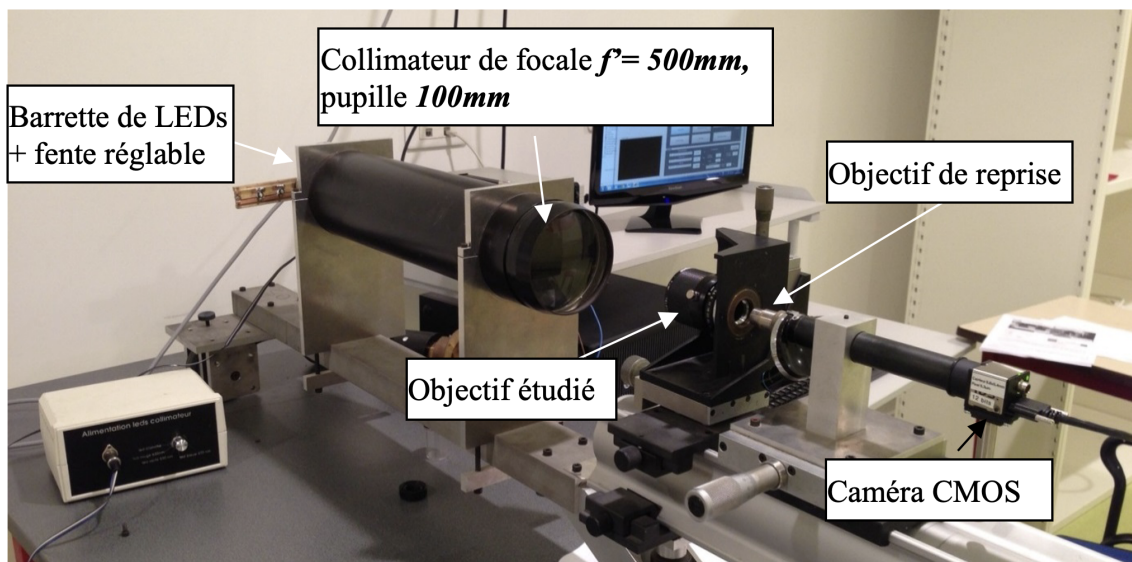


FIGURE 2.6 – Photo du dispositif de mesure de la FTM (montage 2)

La FTM est obtenue numériquement, par Transformée de Fourier de l'image $LSF_{\text{exp}}(x')$ ré-imagée par l'objectif de microscope et échantillonnée par le capteur (cf. **P3**).

Le dispositif d'imagerie donne donc accès expérimentalement à la convolution de l'image géométrique de la fente $F'(x')$ par l'ensemble {collimateur + objectif} avec la fonction caractéristique $LSF_{\text{s.o.}}$ de l'objectif étudié (cf. schéma du montage 2, figure 2.2) :

$$LSF_{\text{exp}}(x') = LSF_{\text{s.o.}}(x') * F'(x')$$

La LSF expérimentale est ré-imagée par l'objectif de microscope choisi sur le capteur CMOS. Ainsi, dans le plan focal image de l'objectif étudié, le pas d'échantillonnage de la LSF dépend du grandissement g_y de l'objectif de microscope de reprise et de la dimension des pixels de la caméra de mesure. Le grandissement g_y de l'objectif choisi permet donc de modifier la fréquence spatiale d'échantillonnage σ'_e , et ainsi la plage de mesure des fréquences spatiales de la FTM de l'objectif étudié.

Q7 Exprimez, en fonction du grandissement de l'objectif de microscope de reprise, la fréquence spatiale de cet échantillonnage. Déterminez la fréquence d'échantillonnage σ'_e et la fréquence de Nyquist associée pour un grandissement $g_y = 40$. Comparez avec les fréquences de coupure de l'objectif étudié calculées en question de préparation **P2**. Concluez.

Q8 Comment choisir la largeur de la fente-objet pour que celle-ci ne modifie pas sensiblement la mesure de la FTM du système optique ? Précisez la valeur numérique de la largeur de fente pour un objectif ouvert à $N = 1, 4$.

3.2 Mise en œuvre expérimentale

Observation directe de la LSF

↪ Placez le capteur CMOS sur le tube du viseur muni de l'objectif de microscope de reprise de grandissement **40**.

↪ Observez la LSF expérimentale sur l'écran via l'application uEye. Réduisez la largeur de la fente-source au tant que possible, afin que celle-ci ne modifie pas visuellement l'aspect de la LSF tout en maintenant un flux suffisant. Ajustez le temps d'intégration de la caméra.

Q9 Analysez rapidement la forme et la largeur de la LSF aux différents nombres d'ouverture N de l'objectif étudié, en monochromatique. Observez-vous des différences en changeant la longueur d'onde d'éclairage ? et en lumière blanche ? Veillez à refaire la mise au point précisément pour chaque mesure. Quelles aberrations mettez-vous en évidence ? À partir de quelle ouverture l'objectif vous paraît-il limité par la diffraction ?

↪ Lancez Matlab, et tapez »CalculFTMLogiciel Un mode d'emploi du logiciel « Mesure de la FTM » est disponible dans la salle de TP.

Calibration : mesure du grandissement de l'objectif de microscope de reprise

Pour mesurer la FTM, il faut au préalable connaître et mesurer précisément le grandissement « réel » de l'objectif de microscope de reprise (cf. **Q1**). Cette mesure du grandissement est possible directement sur le montage, en déplaçant latéralement la tête de mesure (l'objectif de microscope et la caméra) grâce à la platine Microcontrôle de mouvement transversal. On déplace ainsi latéralement de gauche à droite l'image de la fente sur le capteur de la caméra (voir mode d'emploi du logiciel « Mesure de la FTM »).

↪ Mesurez soigneusement par cette méthode le grandissement de l'objectif de reprise. Évaluez l'incertitude de mesure grâce à une rapide étude de répétabilité.

Q10 Pourquoi le grandissement mesuré diffère-t-il de celui indiqué sur l'objectif de microscope ?

Q11 Calculez la fréquence d'échantillonnage et la fréquence de Nyquist associée dans le plan focal image de l'objectif étudié (cf. **Q7**).

Q12 Quelle est l'allure de la FTM idéale d'un objectif en limite de diffraction pour un éclairage polychromatique (entre 400 nm et 700 nm) ? Quelle est la fréquence de coupure à $N = 1,4$?

Mesure de la FTM de l'objectif étudié

Les étapes du calcul par le logiciel sont les suivantes :

- Acquisition d'une image
- Affichage du profil de l'image de la fente obtenu par moyenne sur 8 lignes horizontales de pixels du capteur au milieu de l'image.
- Calcul du module et normalisation de la Transformée de Fourier Rapide
- Il est également possible de supprimer le fond continu en appuyant sur le bouton « Réduction Fond ». L'algorithme calcule la valeur moyenne du fond (on regarde là où il n'y a pas de signal sur le profil) et le soustrait au profil entier. Puis il remet à zéro tous les points qui sont hors de l'image de la fente.
- Il est possible aussi d'afficher la FTM idéale calculée en lumière monochromatique et en lumière polychromatique.

Important : Les réponses aux questions **Q13** à **Q16** seront présentées à l'oral à l'enseignant·e responsable de la séance.

Q13 En utilisant le logiciel :

- décrire et expliquer l'influence d'une défocalisation sur la FTM correspondante ;
- décrire et expliquer l'influence de l'ouverture de l'objectif vidéo sur la FTM ;
- comparer les FTM mesurées au FTM idéales pour différentes ouvertures ;
- décrire et expliquer l'influence de la largeur de la fente source réglable ;

Q14 Si le profil présente un *offset* (un fond continu), pourquoi est-il nécessaire de le soustraire pour calculer la FTM ?

Q15 Comment s'assurer expérimentalement que la largeur de la fente source n'intervient pas dans la mesure de FTM ?

Q16 Sur la plage des fréquences spatiales analysées, est-il nécessaire de corriger les mesures expérimentales de la FTM de l'objectif étudié de la FTM du capteur CMOS de la tête de mesure (cf **P6**, **Q7**, **Q11**) ? Expliquez.

Q17 Mesurez précisément la valeur de la FTM de l'objectif étudié aux fréquences spatiales correspondant à celles de la mire observée dans la première partie (cf. paragraphe 2 - **Q1**) aux différents nombres d'ouverture N de l'objectif, en monochromatique ($\lambda = 0.63 \mu\text{m}$) et en lumière blanche.

Avant chaque mesure, prenez soin de bien vérifier :

- que le capteur est dans le plan de meilleure mise au point
- que le niveau de signal est suffisant
- que la largeur de fente suffisamment fine

Q18 À partir de ces mesures, tracez l'évolution des valeurs de FTM avec le nombre d'ouverture de l'objectif à $\sigma' = 50 \text{ mm}^{-1}$. Évaluez l'incertitude de vos mesures.

Q19 Expliquez l'allure de la courbe. Pour quel nombre d'ouverture l'objectif étudié semble-t-il le meilleur du point de vue de la résolution spatiale ? À grande ouverture, les principales aberrations sont-elles géométriques ou chromatiques ?

4 Conclusions

Q20 Comparez les résultats de vos mesures directes du contraste d'une mire (paragraphe 2– **Q2**) aux mesures issues de l'analyse de la LSF (paragraphe 3 – **Q17**). Commentez les deux méthodes de mesure.

Q21 Quelles autres caractérisations de cet objectif seraient nécessaires pour l'évaluer complètement, dans la perspective d'une utilisation en tant qu'objectif vidéo avec cette caméra CMOS ?

I 3

Mesure de fonctions de transfert de modulation d'un objectif en germanium par la méthode de Foucault.

Influence de la temperature.

Version du 10 septembre 2026

Pré-requis

- Origine et analyse des aberrations géométriques et chromatiques d'un système optique
- Principes et méthodes de mesure de la réponse percussionnelle d'un système optique : cf. TP 2A « Point lumineux »
- Fonction de transfert d'un système optique : définition, sens physique, lien avec les aberrations d'un système optique
- Échantillonnage d'un signal
- Principe et méthodes de détection synchrone

Préparation du TP

Lisez attentivement l'introduction et la description du montage. Pour tirer le meilleur parti de ce TP, vous devez chercher à répondre aux questions **P1** à **P11** avant la séance.

Objectifs pédagogiques

- À l'issue de la séance, vous serez capables de :
- concevoir, mettre en œuvre et valider un banc optique en infrarouge lointain
 - décrire et justifier la méthode de Foucault pour l'analyse de la qualité d'un système optique
 - analyser un signal très bruité par détection synchrone
 - analyser l'influence du pas d'échantillonnage spatial sur une mesure de tache image
 - réaliser une mesure de Fonction de Transfert de Modulation dans l'infrarouge

Sommaire

1	Description du banc de mesure	36
2	Alignement du banc de mesure	39
3	Mise en œuvre de la méthode de Foucault	40
4	Mesure de la FTM de l'objectif	45
5	Étude en température	47
	Annexe : documentation complémentaire	48

Introduction

Cette manipulation vous permettra de vous familiariser avec une méthode classique de caractérisation des systèmes optiques d'imagerie : la méthode de Foucault (ou Foucaultage) permettant de remonter au profil de la réponse percussionnelle, et ici à la fonction de transfert de modulation. Celle-ci sera appliquée à un objectif en germanium utilisé dans l'infrarouge lointain ($8 - 12 \mu\text{m}$) de focale $F'_O = 290 \text{ mm}$ et de diamètre utile $\varnothing = 72 \text{ mm}$, étudié dans une conjugaison à distance finie ($z = 1 \text{ m}$). Quelques caractéristiques sont données en annexe.

Le principe de la mesure repose sur l'analyse de la réponse percussionnelle de l'objectif dans la conjugaison étudiée, en utilisant la méthode du couteau de Foucault. Plus précisément, la réponse percussionnelle $PSF(x, y)$ ¹, image d'un trou-source de très petit diamètre, est progressivement masquée par une lame qui se déplace dans le plan image. La décroissance du flux lumineux lors du déplacement de la lame est mesurée à l'aide d'un détecteur infrarouge. Plus rapide est la décroissance du flux total, plus petite est la tache image. Cette mesure donne accès à la « fonction d'étalement de bord » ou *Edge Spread Function* $ESF(x)$:

$$ESF(X) = \int_X^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} PSF(x, y) dy dx$$

Expérimentalement, le signal est échantillonné au pas de déplacement du couteau $\Delta X = X_{i+1} - X_i$, et on mesure donc un signal $S(X_i)$ proportionnel à $ESF(X_i)$ à chaque pas. La comparaison des courbes de FTM pour différentes positions longitudinales du couteau permet de déterminer le plan de meilleure mise au point (cf. courbes en annexe). On pourra ainsi étudier l'évolution de la position de ce plan de meilleure mise au point en fonction de la température de l'objectif étudié et montrer l'influence d'une variation de température sur les objectifs en germanium. Cette expérience devrait donc vous sensibiliser aussi à la nécessité d'athermaliser (c'est-à-dire rendre insensible aux variations de température) les systèmes optiques infrarouges de précision.

P1 Recherchez des exemples d'application de tels objectifs dans l'infrarouge lointain.

1 Description du banc de mesure

Le banc de mesure est représenté sur la figure 3.2.

1. PSF pour *Point Spread Function* ou en français FEP pour *Fonction d'Étalement de Point*; c'est l'éclairement normalisé dans le plan-image correspondant à un objet ponctuel.

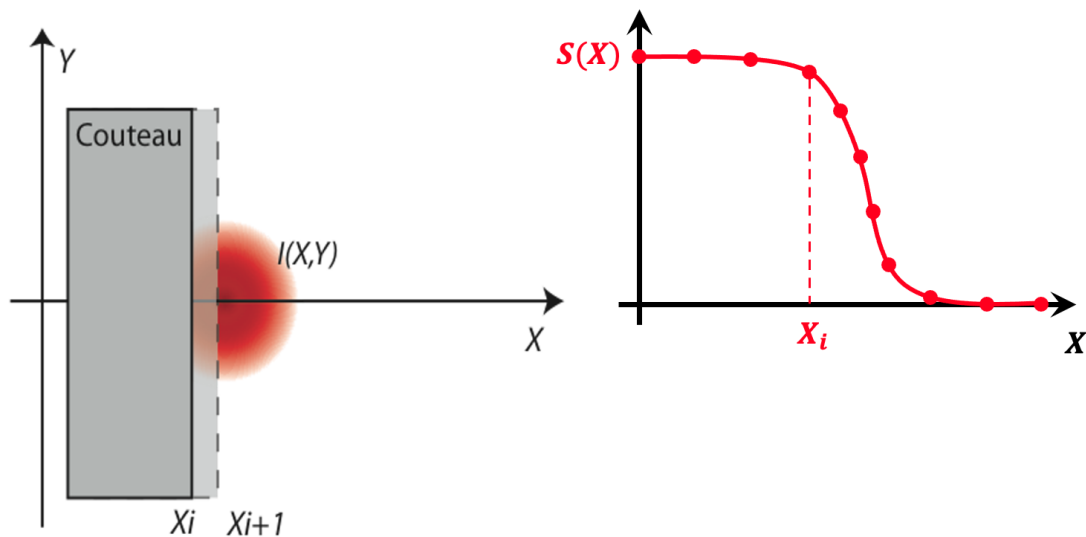


FIGURE 3.1 – Illustration de la méthode de Foucault. Le couteau se déplace selon X grâce à un moteur pas à pas dans le plan de la PSF et perpendiculairement à l'axe optique

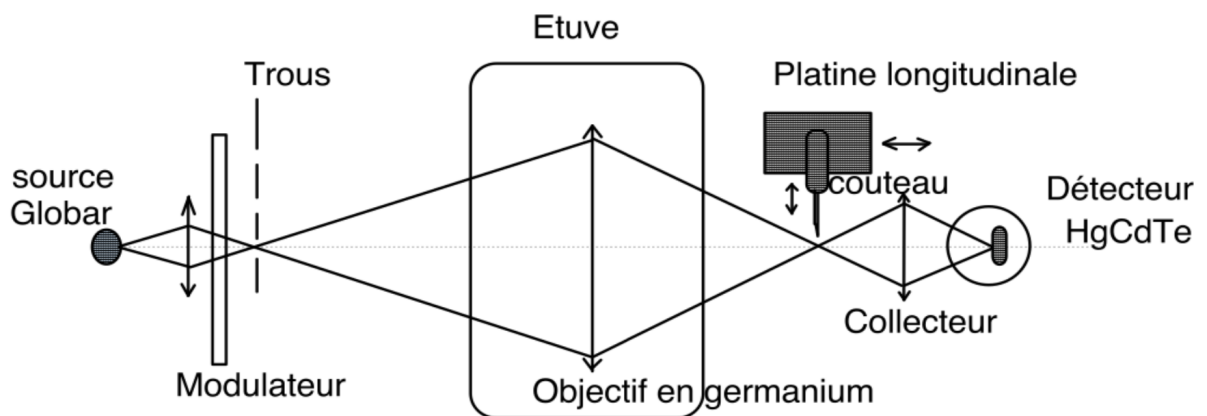


FIGURE 3.2 – Schéma du banc de mesure.

L'objectif en germanium (Ge) est un doublet de focale $F'_O = 290$ mm et de diamètre utile $\varnothing = 72$ mm étudié pour une conjugaison à distance finie (cf. annexe). Le point source sera placé à 1 m de l'objectif. On trouve successivement sur le montage les éléments suivants.

En amont de l'objectif étudié

- La source est un Globar (bâton de graphite) : il s'agit d'un corps gris d'émissivité 0,7 à peu près constante pour une puissance de 100 W (10 V - 10 A). Sa température est environ 1075 K.
- Un condenseur en ZnSe ($f'_c = 25$ mm, $N = 2$) conjugue la source et le trou choisi avec un grandissement de l'ordre de 1.
- Un modulateur (*chopper*), placé juste en avant du trou-source, permet de moduler le flux issu du trou-source (à 1000 Hz environ). La luminance du trou-source est donc alternativement la luminance d'un corps noir à température ambiante (pale noire du modulateur) ou celle d'un corps noir à la température du Globar. Associée à une détection synchrone, la modulation de la source permet de mesurer le très faible

flux reçu par le détecteur infrarouge, malgré la présence du rayonnement thermique ambiant.

- Un filtre passe-haut $8\text{ }\mu\text{m}$ permet de sélectionner la bande spectrale qui nous intéresse. Le détecteur HgCdTe, lui, coupe les longueurs d'onde supérieures à $12\text{ }\mu\text{m}$
- trois trous sont montés sur une barrette, de diamètres : 1 mm , $200\text{ }\mu\text{m}$ et $100\text{ }\mu\text{m}$.

L'objectif à étudier est placé dans l'étuve sur un support réglable en position et en angle. Les hublots sont ici, par souci d'économie, de simples feuilles en Mylar (transparents dans l'infrarouge et de très faible épaisseur).

En aval de l'objectif étudié

- Le couteau est placé sur deux platines motorisées. La platine longitudinale (moteur M2) a une course de 25 mm et un pas minimum de $1\text{ }\mu\text{m}$. La platine transversale (moteur M1) a une course de 25 mm et un pas minimum de $0,1\text{ }\mu\text{m}$.
- Un condenseur en ZnSe ($f'_c = 25\text{ mm}$, $N = 1$), conjugue la tache image et le détecteur infrarouge.
- Le détecteur HgCdTe (bande $8 - 12\text{ }\mu\text{m}$, carré de 1 mm de côté, refroidi par azote liquide). Ce détecteur est une photo-résistance (ou détecteur photo-conducteur) placée à $8,5\text{ mm}$ de la fenêtre. Ce détecteur est connecté à un circuit de mise en forme et d'amplification. La sortie du boîtier d'amplification est reliée à l'entrée signal d'une détection synchrone. L'entrée référence de la détection synchrone est connectée directement au boîtier de commande du modulateur sur lequel est affichée la fréquence de modulation.

1.1 Conjugaison optique

P2 Le trou-source est situé à 1 m en amont de l'objectif étudié. Déterminez la position Z' du plan de son image, dans lequel sera placé le couteau. Quel est le grandissement transverse associé à cette conjugaison ? Calculez les ouvertures numériques dans l'espace-objet et dans l'espace-image pour l'objectif en Ge.

P3 Quels sont la forme et le diamètre de la réponse percutielle (PSF) de l'objectif s'il travaille en limite de diffraction **dans la conjugaison choisie** ?

Comme pour toute mesure de réponse percutielle (PSF) ou de FTM d'un système optique, il est indispensable que la pupille de l'ensemble du banc, depuis la source jusqu'au détecteur, soit bien limitée par l'objectif étudié. Les condenseurs placés sur le montage à l'émission et la détection sont choisis de sorte à ce que cela soit bien le cas.

1.2 Détection du signal infrarouge

Le signal infrarouge mesuré par le détecteur HgCdTe est trop faible pour sortir du bruit, c'est pourquoi le faisceau lumineux émis par la source Global est modulé par un modulateur mécanique à la fréquence f_m selon l'évolution de la figure 3.3. Le signal modulé est alors analysé par une détection synchrone, qui permet de détecter l'amplitude ΔS de la modulation à la fréquence f_m .

P4 Quelle est l'origine du bruit de détection de ce détecteur ?

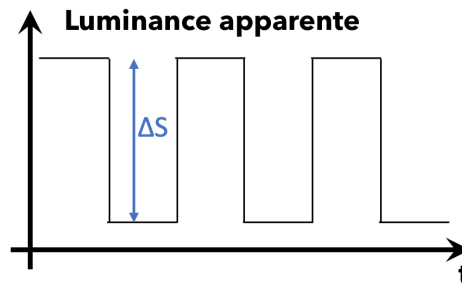


FIGURE 3.3 – Évolution de la luminance apparente

1.3 Mesure de la fonction de transfert de modulation

P5 Quelle est la fréquence de coupure σ_{opt} de l'objectif infrarouge étudié si on suppose qu'il est limité par la diffraction dans la configuration étudiée et dans la bande spectrale $8 - 12 \mu\text{m}$? Comparez avec le tracé de la fonction de transfert en polychromatique présentée en en annexe.

P6 Montrez que la transformée de Fourier de la dérivée du signal ($\frac{dS}{dX}$) donne accès à la Fonction de Transfert de Modulation $FTM(\sigma_X, 0)$ de l'objectif selon la direction de déplacement du couteau (cf. figure 3.1). Comparez aux autres méthodes de mesure de la FTM du bloc Imagerie2.

En pratique, les mesures obtenues par la méthode de Foucault ne correspondent pas à des échantillons ponctuels pris sur le profil de la ESF (voir figure 3.1). En réalité, le signal échantillonné $S(X_i)$ mesuré à chaque pas i du couteau est proportionnel au flux total que le couteau laisse passer. Le logiciel effectue ensuite une dérivée numérique du signal $S(X_i)$, c'est-à-dire $D_s(X_i) = S(X_i) - S(X_{i+1})$. L'expression analytique de cette dérivée numérique est :

$$D_s(X_i) = \int_{X_i}^{X_{i+1}} \int_{-\infty}^{+\infty} PSF(x, y) dy dx$$

P7 Montrez que $D_s(X_i)$ peut s'écrire comme la convolution d'une fonction porte $Rect_{\Delta X}(X)$ de largeur ΔX avec la fonction d'étalement de la ligne (*Line Spread Function*, LSF) définie par l'intégrale du profil vertical de la PSF à la position X : $LSF(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} PSF(X, Y) dY$

P8 Déduisez-en que la transformée de Fourier du signal échantillonné $D_s(X_i)$ est la Fonction de Transfert de Modulation $FTM(\sigma_X, 0)$ de l'objectif selon la direction horizontale, multipliée par un sinus cardinal dont on la fréquence de coupure est la fréquence d'échantillonnage $\sigma_e = 1/\Delta X$. Quel sera l'impact de ce sinus cardinal sur les mesures de FTM?

2 Alignement du banc de mesure

NB : Le banc a été normalement aligné avant votre arrivée : vous pouvez passer directement à la phase 4. Ne reprenez l'alignement complet détaillé ci-dessous (étapes a à c) avec le laser He-Ne que si vous n'obtenez pas de signal même avec l'aide de l'encadrant.e. en phase 6

↪ Le réglage du banc consiste à aligner tous les éléments le plus précisément possible. Pour cela une flèche laser munie d'un tabouret optique à deux miroirs permet, à l'aide de deux pieds en dural, de définir l'axe du montage (les deux pieds se vissent sur le marbre et sont percés d'un trou à 250 mm du marbre, hauteur de l'axe optique ; il s'agit du trou inférieur). L'axe du montage est défini par le faisceau laser passant par les deux trous.

1. Dans un premier temps, on aligne la source, le condenseur et le trou-source sur l'axe du laser.
2. Puis, en dirigeant le laser vers le détecteur et après avoir placé un cache en plastique percé d'un trou en son centre contre l'objectif, on ajuste le centrage et l'alignement de l'objectif sur l'axe du banc.
3. On règle ensuite la position et l'orientation de l'objectif dans l'étuve (à une distance de 1 mètre du trou source) : on centre et on aligne l'objectif à l'aide de la réflexion du faisceau laser.
4. On alimente le Globar (alimentation sous le marbre), le modulateur et l'amplificateur. On choisit le trou-source de plus gros diamètre (1 mm).
5. On refroidit le détecteur en versant de l'azote liquide dans le Dewar jusqu'à obtenir un signal modulé à l'oscilloscope.
6. Il ne reste plus ensuite qu'à maximiser l'amplitude du signal détecté (avec le trou de 1 mm), en déplaçant le bloc détecteur et en ajustant la focalisation. On diminue ensuite la taille du trou source, et on optimise à nouveau le signal.

3 Mise en œuvre de la méthode de Foucault

3.1 Mise en place du couteau

↪ Mettez en marche le boîtier de contrôle des moteurs pas à pas et la détection synchrone.

↪ Placez le couteau à la règle à partir de vos mesures et du calcul de la position du point image (cf. question **P2** en section 1.1.) Le couteau doit être placé manuellement sur le marbre au plus près de l'image, de sorte à ce qu'il coupe la tache-image en se déplaçant latéralement sur une distance de l'ordre de grandeur de la réponse percussionnelle attendue (cf. question **P3** et les simulations en annexe)

↪ Lorsque la position vous paraît correcte, bridez les platines sur le marbre.

3.2 Contrôle des déplacements et des acquisitions par le logiciel

↪ Lancez le logiciel, la fenêtre de la figure 3.4 s'ouvre alors.

Dans un premier temps, vous réaliserez des scans **rapides assez grossiers** selon x et z , avec peu de points, pour identifier la zone d'intérêt autour du plan de meilleure mise au point. Lorsque cette zone d'intérêt aura été identifiée et validée avec l'encadrant-e, vous pourrez reprendre la même procédure en réalisant des scans fins, en tenant compte des contraintes d'échantillonnage selon X et Z (cf. 4).

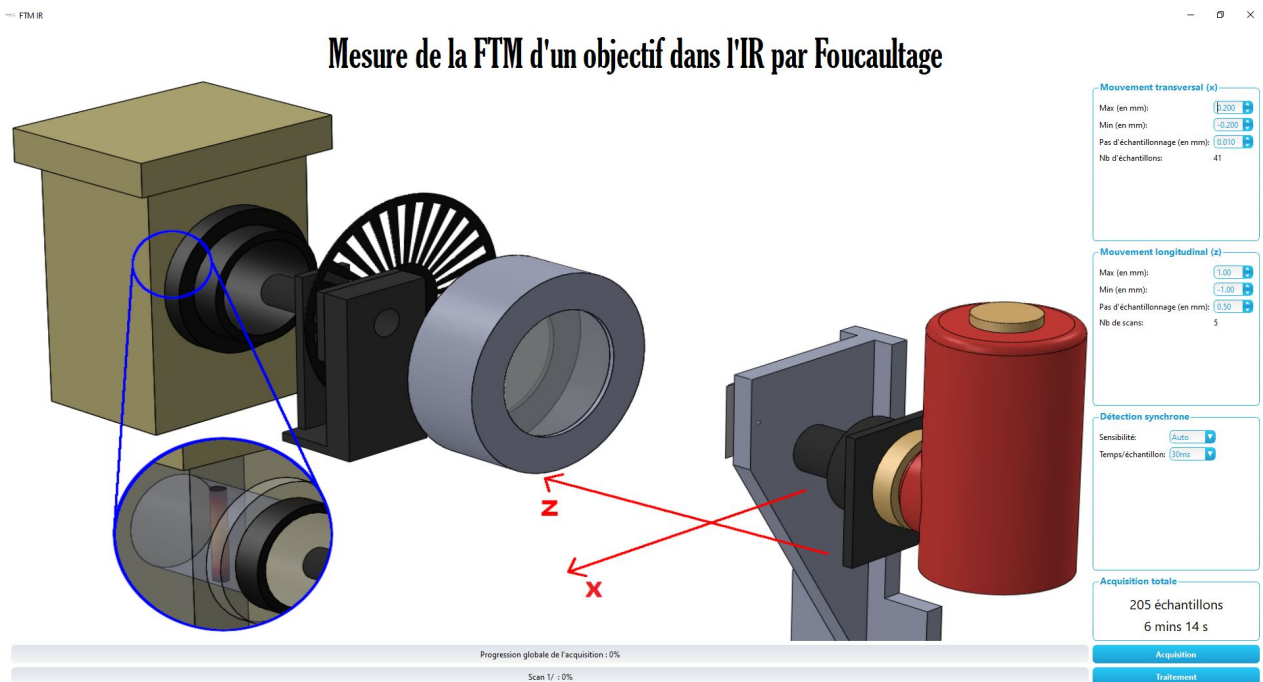


FIGURE 3.4 – Fenêtre d'accueil du logiciel

Un premier menu permet de définir les paramètres des scans transversaux (position du couteau au début et à la fin du scan et pas d'échantillonnage en mm)

Mouvement transversal (x)

Max (en mm): 0.200

Min (en mm): -0.200

Pas d'échantillonnage (en mm): 0.010

Nb d'échantillons: 41

Un deuxième menu permet de définir les positions longitudinales (selon axe Oz dirigé vers l'objectif) des plans dans lesquels on souhaite effectuer les scans transversaux. On entre la position en z du dernier scan et du premier scan et la distance entre les différents scans.

Mouvement longitudinal (z)

Max (en mm): 1.00

Min (en mm): -1.00

Pas d'échantillonnage (en mm): 0.50

Nb de scans: 5

Ce troisième menu permet de choisir le calibre d'entrée de la détection synchrone; vous pouvez garder le mode 'auto' qui laisse la détection synchrone choisir automatiquement le meilleur calibre selon la tension à mesurer.

Détection synchrone

Sensibilité: Auto

Temps/échantillon: 30ms

La dernière zone de la colonne de menu affiche le nombre total de points acquis sur les scans et le temps total que prendra la mesure.

Acquisition totale

15 échantillons

2 mins 7 s

→ Lancez les scans en cliquant sur le bouton **Acquisition**, en bas de la fenêtre d'accueil du logiciel.

↪ Sauvegardez votre fichier de mesures à la fin des scans.

3.3 Analyse des données et calcul des FTM

Ouverture du fichier de mesures et affichage des données brutes

↪ Cliquez sur le bouton **Traitement** La fenêtre de traitement des données qui s'ouvre est représentée sur la figure 3.5

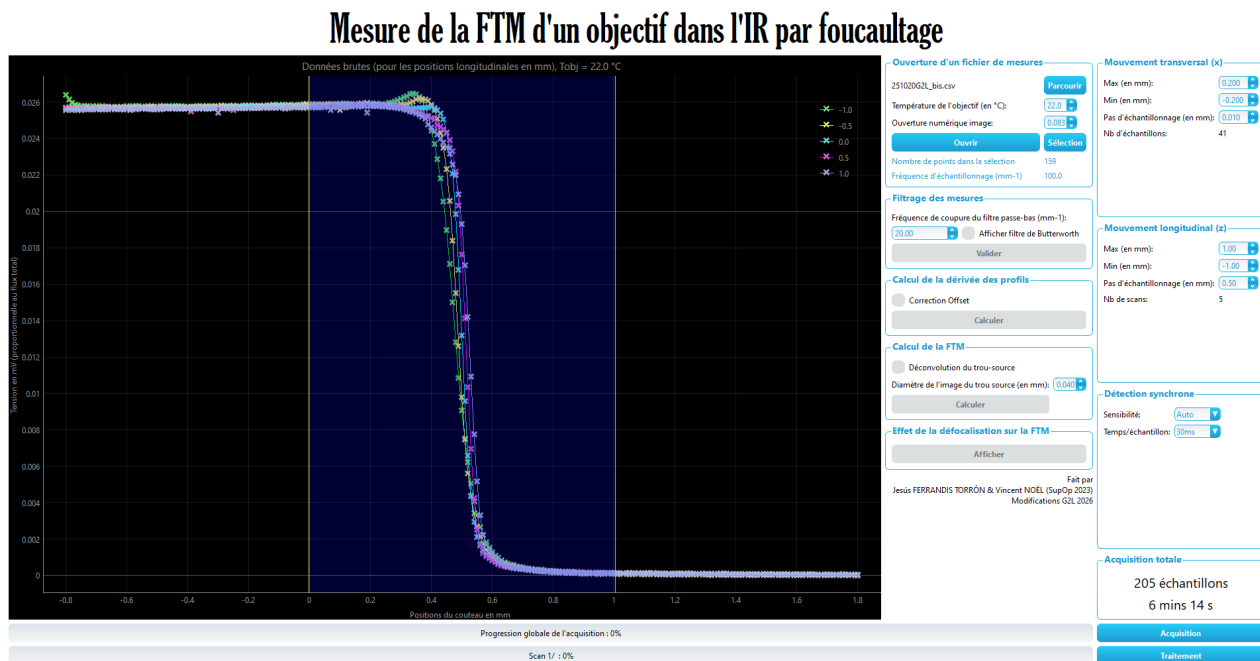


FIGURE 3.5 – Fenêtre de traitement des données

Le premier menu permet de charger un fichier de mesures enregistré au préalable. Il faut préciser les conditions de mesure (température de fonctionnement de l'optique, ouverture numérique dans l'espace-image).

↪ Cliquez sur **Parcourir** pour sélectionner le fichier, puis sur **Ouvrir**. Une fenêtre d'affichage des mesures s'ouvre alors : sélectionnez la zone (sur fond bleu) à analyser et cliquez sur **Sélection**. Le nombre de points de mesure dans la sélection ainsi que la fréquence spatiale d'échantillonnage σ_e utilisée pendant la mesure.

La fenêtre d'affichage présente alors l'ensemble des données expérimentales $S(X_i)$ pour les différents plans de mesure selon z .

↪ Veillez à considérer une sélection suffisamment large de part et d'autre de la variation brutale de la fonction $ESF(X)$ expérimentale.

Q1 Sur quelle limite des mesures de FTM cette largeur de la sélection jouera-t-elle ?

↪ À cette étape, en comparant les profils à ceux prévus théoriquement, il est déjà possible de savoir si les mesures sont réalisées près du plan de mise au point. Si ce n'est pas le cas, il faut choisir de nouveaux plans de mesure, ajuster le nombre de points et relancer les balayages en x et z.

Traitement des données et calcul de la FTM

Le menu **Filtrage** permet d'appliquer aux données brutes un filtre passe-bas numérique (Butterworth du 8^{ème} ordre²), qui lisse les variations rapides du signal dues aux imprécisions expérimentales. On choisira un filtre passe-bas qui permet de ne conserver que les fréquences spatiales intéressantes, c'est-à-dire inférieures à la fréquence de coupure de la FTM idéale, σ_{opt} , de l'objectif étudié.

Le programme peut afficher dans une nouvelle fenêtre la réponse en fréquence du filtre passe-bas choisi. Cette fonctionnalité n'est accessible qu'à partir de 27 échantillons expérimentaux. La fréquence maximale du filtre est limitée par l'échantillonnage à $\sigma_e/2$.

Le menu **Calcul de la dérivée des profils** permet de calculer et d'afficher la dérivée numérique $D_s(X_i)$ des scans (cf. 1.3), éventuellement filtrés à l'étape précédente. Il est possible de retirer un fond continu, calculé sur les cinq premiers points des courbes de dérivée $D_s(X_i)$.

Ouverture d'un fichier de mesures
251020G2L_bis.csv Parcourir
Température de l'objectif (en °C): 22.0
Ouverture numérique image: 0.083
Ouvrir Sélection
Nombre de points dans la sélection 129
Fréquence d'échantillonnage (mm-1) 100.0

Filtrage des mesures
Fréquence de coupure du filtre passe-bas (mm-1): 20.00 Afficher filtre de Butterworth
Valider

Calcul de la dérivée des profils
☒ Correction Offset
Calculer

Calcul de la FTM
☐ Déconvolution du trou-source
Diamètre de l'image du trou source (en mm): 0.040
Calculer

Effet de la défocalisation sur la FTM
Afficher

Q2 Quel serait l'impact d'un fond continu sur le signal de la dérivée, pour le calcul de la fonction de transfert de modulation ? Observez l'impact de cette correction sur vos mesures de la FTM.

Le menu **Calcul de la FTM** permet de calculer la transformée de Fourier numérique $FTM(\sigma_X, 0)$ du signal précédent, et de la comparer à la FTM en limite de diffraction en polychromatique ($7 \mu\text{m}$ - $12 \mu\text{m}$) pour l'ouverture numérique de travail donnée. Le programme calcule la FFT des signaux dérivées $D_s(X_i)$ sur 1024 points, et rajoute autant de zéros nécessaires aux données pour obtenir 1024 points (méthode du « zéro padding »). Les FTM sont affichées sur 512 points entre la fréquence nulle et la fréquence de Nyquist, $\frac{\sigma_e}{2}$.

Il est enfin possible de prendre en compte la taille finie de l'image du trou-source, dont on précise la valeur dans le menu déroulant. En effet, la tache-image expérimentale est la convolution de la réponse percutonnelle $PSF(x, y)$ de l'objectif en Ge avec l'image

2. Un filtre de Butterworth est conçu pour posséder un gain aussi constant que possible dans sa bande passante. Son gain est donné par $G_B(\sigma) = 1/\sqrt{1 + (\frac{\sigma}{\sigma_B})^{2n}}$, avec ici $n = 8$.

FTM IR 1.1

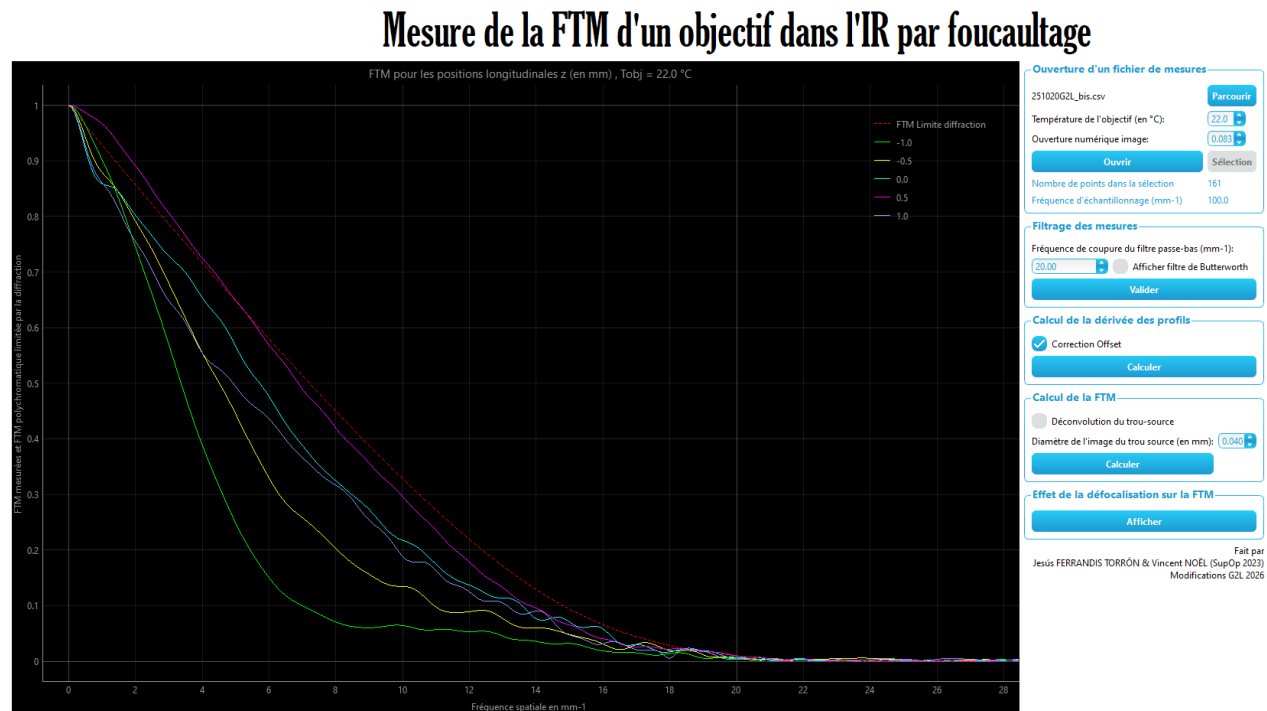


FIGURE 3.6 – Fenêtre de traitement de données avec calcul de la fonction de transfert de modulation

géométrique du trou-source (un simple disque). Dans l'espace de Fourier, cela correspond au produit de la FTM optique à la FTM géométrique (associée au trou-source) :

$$FTM_{exp}(\sigma) = FTM_{opt}(\sigma) \times FTM_{geo}(\sigma)$$

En cochant la case **Déconvolution du trou-source**, on affiche simplement la valeur numérique de $FTM_{exp}(\sigma)$ divisée par $FTM_{geo}(\sigma)$; pour éviter des artefacts numériques en divisant par des valeurs trop faibles, la déconvolution est limitée à la plage des fréquences spatiales σ sur laquelle $FTM_{geo}(\sigma) > 0,3$.

⇒ Observez l'effet de cette déconvolution sur vos mesures.

Finalement, le menu **Effet de la défocalisation** permet de comparer les fréquences spatiales associées à différentes valeurs de FTM (0,2 - 0,4 - 0,6 - 0,8) en fonction des différentes positions longitudinales du couteau, ce qui permet de mettre en évidence l'impact de la défocalisation (cf. figure 3.7).

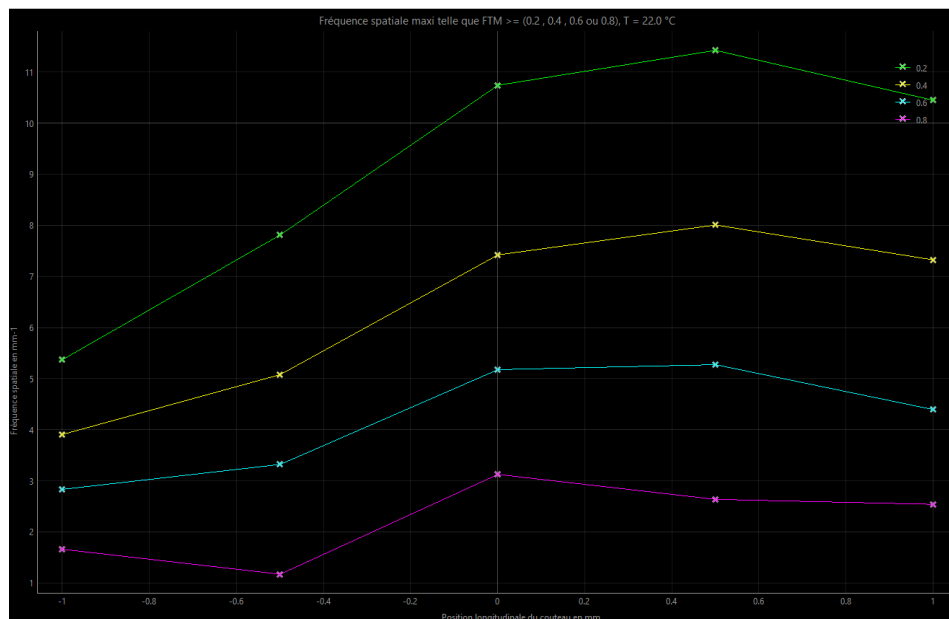


FIGURE 3.7 – Effet de la défocalisation sur la FTM

↪ Pour sauvegarder une courbe (format image ou données CSV), il suffit de faire un clic droit sur la fenêtre et choisir le format de sauvegarde via le menu `export`.

4 Mesure de la FTM de l'objectif

Une fois la zone d'intérêt autour de la tache-image identifiée, il faut choisir précisément les paramètres de la mesure de l' $ESF(X)$ suivant les axes transverse et longitudinal.

4.1 Choix du pas d'échantillonnage transversal

Pour restituer correctement la fonction $ESF(X)$ à partir de laquelle sera calculée la fonction de transfert de l'objectif en Ge, il faut déterminer le pas maximum d'échantillonnage ΔX . Pour cela, on peut raisonner dans l'espace de Fourier, à partir de la FTM.

Q3 Quelle est la fréquence d'échantillonnage σ_e minimum nécessaire pour faire la mesure de la FTM de l'objectif sans risque de recouvrement de spectres, selon le théorème de Nyquist-Shannon ? Quel est le pas d'échantillonnage transversal ΔX maximum correspondant ?

L'échantillonnage transverse de l' $ESF(X)$ est équivalent, dans l'espace de Fourier, à multiplier la fonction de transfert de modulation de l'objectif $FTM(\sigma_X, 0)$ par une fonction 'sinus cardinal' de fréquence de coupure σ_e , comme cela a été démontré en question **P9** en section 1.3.

Q4 Compte tenu de ce résultat, expliquez pourquoi la fréquence d'échantillonnage σ_e doit être plus grande que la fréquence d'échantillonnage déterminée à la question **Q3**. Faites un graphique mettant en évidence l'impact de ce sinus cardinal sur la mesure.

Q5 Qu'est-ce qui limite la résolution fréquentielle de vos mesures de FTM? Donnez-en une estimation.

4.2 Choix du pas de la platine longitudinale

Pour déterminer la position du plan de meilleure mise au point, il faut réaliser des mesures de la FTM pour différents plans autour du plan de meilleure mise au point. La précision de positionnement du couteau est au plus égale à la profondeur de foyer (ou profondeur de mise au point) en limite de diffraction, dans l'espace-image (voir figure 3.8).

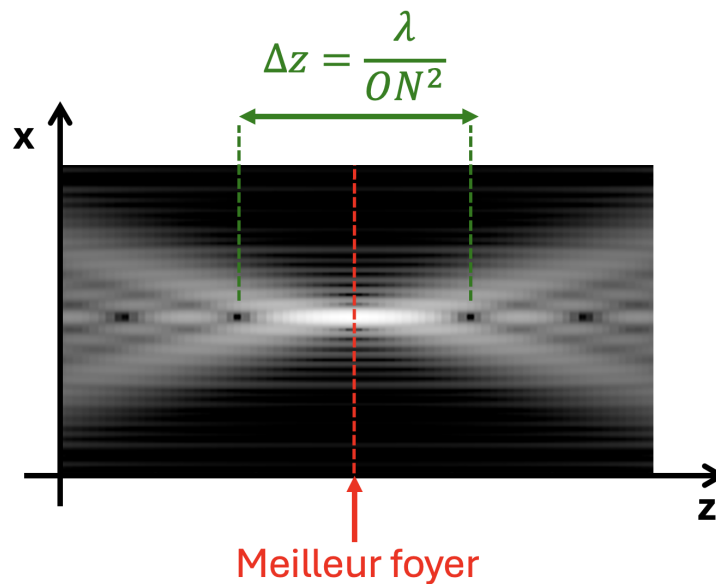


FIGURE 3.8 – Évolution de la RPI en limite de diffraction dans le plan (xz)

Q6 Calculez la profondeur Δz dans la configuration étudiée. Choisissez le pas entre deux coupes transversales successives pour obtenir une bonne précision sur la position Z_0 du plan de meilleure mise au point.

↪ Une fois ces choix des pas d'échantillonnage validés avec l'enseignant·e responsable, vous lancerez les scans nécessaires avec les valeurs déterminées précédemment.

↪ Sauvegardez votre fichier de mesures à la fin des scans, et réalisez le traitement détaillé des données suivant le protocole décrit en section 3.3.

Q7 Déterminez la position du plan image de meilleure mise au point. Quelle est la précision de cette mesure?

↪ Étudiez et comparez les FTM obtenues pour différents plans de mise au point.

Q8 Comment évaluez-vous la précision de ces mesures de FTM?

5 Étude de la défocalisation provoquée par l'élévation de température de l'objectif

5.1 Évaluation théorique de la défocalisation thermique

L'indice de réfraction du Germanium est $n = 4,0$. La variation de cet indice avec la température est très importante (c'est le matériau optique dont la variation β de l'indice avec la température T est la plus grande) :

$$\beta = \frac{\delta n}{\delta T} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$$

Une élévation de la température de 20°C provoque donc une défocalisation importante que la dernière partie de l'expérience permet de mettre en évidence.

Les deux lentilles constituant ce doublet étant dans le même matériau, en négligeant les épaisseurs (Ge et air), on peut simplement écrire que la variation de sa focale avec la température est³

$$\frac{\Delta F'_O}{\Delta T} = \beta \times \frac{F'_O}{n - 1}$$

P9 Quelle est la variation de la focale F'_O de l'objectif pour une variation de 20°C de la température ?

P10 Quelle est la variation de la position $\Delta Z'$ du plan image correspondante ? Comparez avec les simulations en annexe.

P11 Quelle serait la dimension de la tache de diffusion associée dans le plan de mise au point ? Une telle défocalisation est-elle acceptable ?

5.2 Mesure expérimentale de la défocalisation thermique

↪ Allumez le chauffage de l'étuve et attendez que l'objectif soit à 40°C . Vérifiez le réglage de position du détecteur.

↪ Faites des acquisitions de nouveaux scans afin de trouver la nouvelle position du plan de meilleure focalisation.

↪ Étudiez les FTM obtenues à partir de ces nouveaux enregistrements.

Q9 Comparez les FTM à température ambiante et à 40°C dans le plan de meilleure mise au point. La qualité de l'imagerie reste-t-elle satisfaisante ?

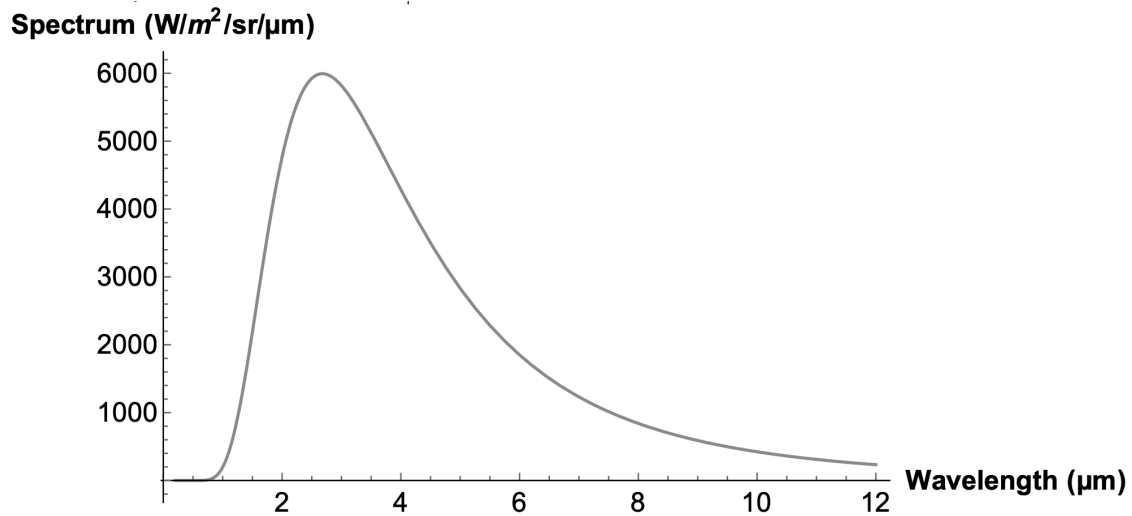
Q10 Quelle est la défocalisation due à l'augmentation de la température ? Comparer ce résultat à la valeur attendue. Avec quelle précision obtient-on cette défocalisation ? Cette défocalisation est-elle gênante ? Quelles solutions pourraient permettre de s'affranchir de ce problème ?

3. Ce résultat découle simplement de l'expression de la focale d'un doublet mince $1/F'_d = 1/f'_1 + 1/f'_2$, avec $1/f'_i = (n - 1)(1/R_a - 1/R_b)$

Annexe : documentation complémentaire

Source

Rayonnement d'un corps noir à $T = 1075$ K

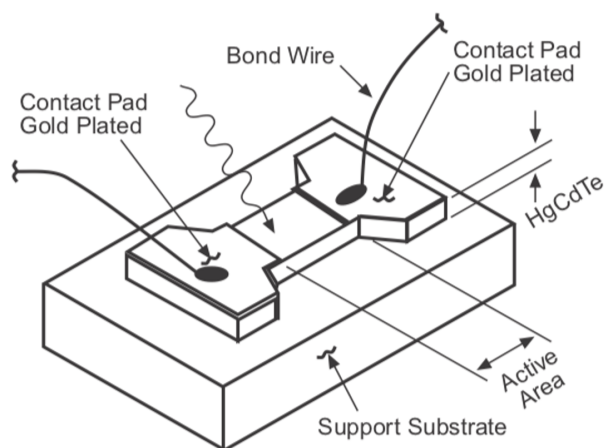


Capteur HgCdTe

Teledyne Judson Technologies

Référence J15D12-M204-S01M-60

https://www.teledynejudson.com/prods/Documents/MCT_shortform_Dec2002.pdf



Objectif Ge

$\emptyset_P = 80 \text{ mm} - F' = 290 \text{ mm}$

Objet à 1 m - champ max = 2°

Plage spectrale = $8 - 12 \mu\text{m}$



	Radius (mm)	Thickness (mm)	Glass
OBJ	INFINITY	1000.0	
STOP	664.3	9.0	<i>Germanium</i>
2	INFINITY	10.0	
3	-875.9	8.0	<i>Germanium</i>
4	-1318.5	395.3	
IMG	INFINITY	-3.1	

Working F/# : 5,17

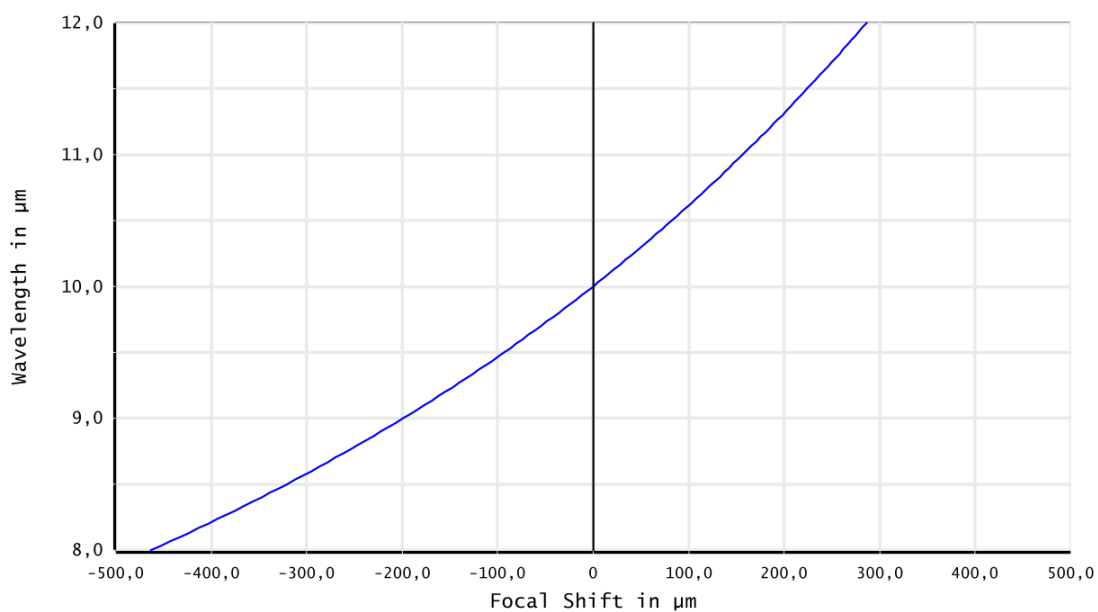
Image Space NA : 0,096

Object Space NA: 0,040

Paraxial Image Height : 14,38 mm

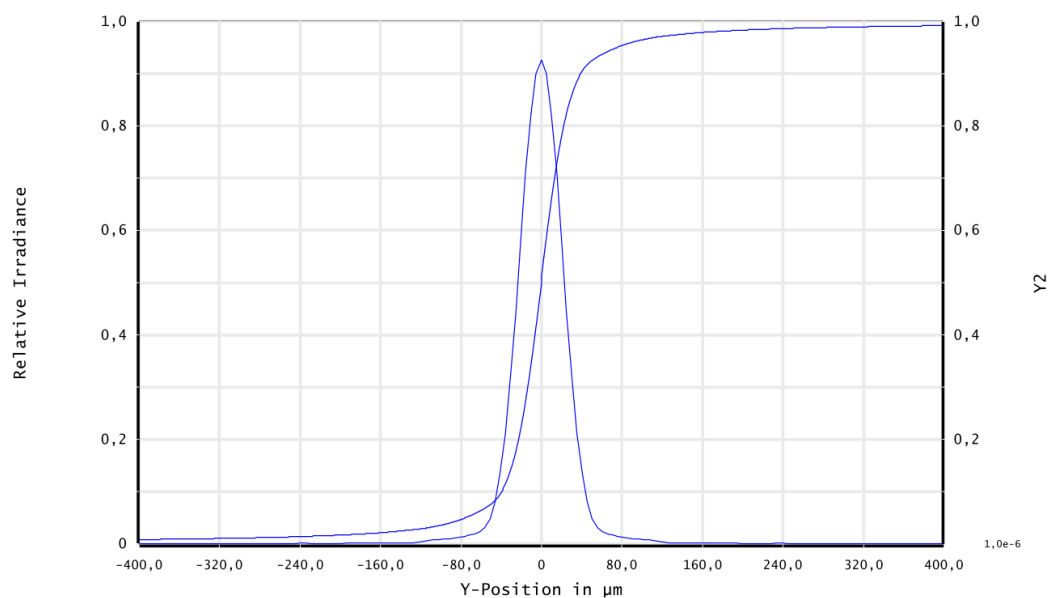
Paraxial Magnification : -0,41

Étude à 20°C



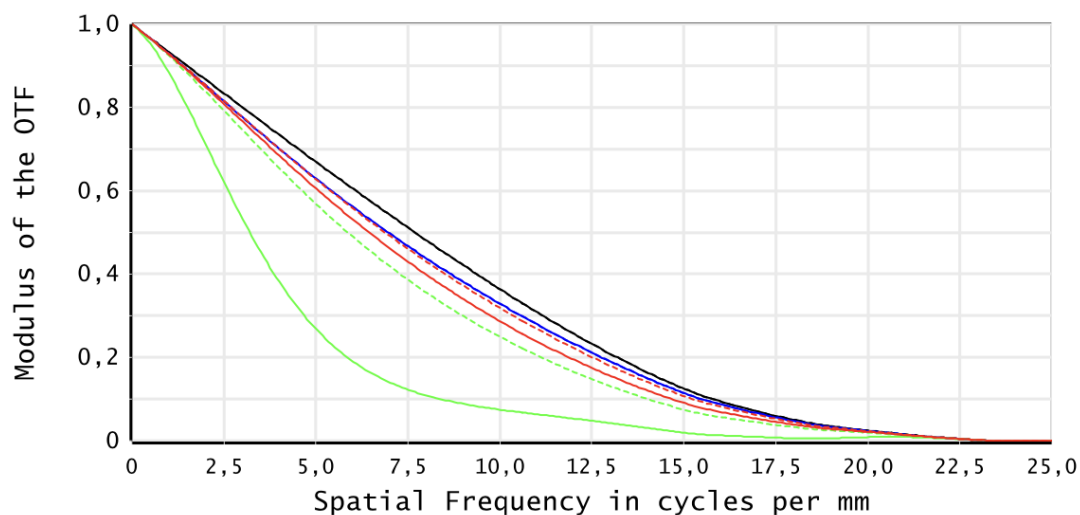
Chromatic Focal Shift

Évolution du plan de mise au point paraxial sur la plage $\lambda = 8 \mu\text{m} - 12 \mu\text{m}$



FFT Edge Spread Function

Profil de la réponse percussionnelle en polychromatique au meilleur foyer et Edge Spread Function correspondante, pour un point objet sur l'axe

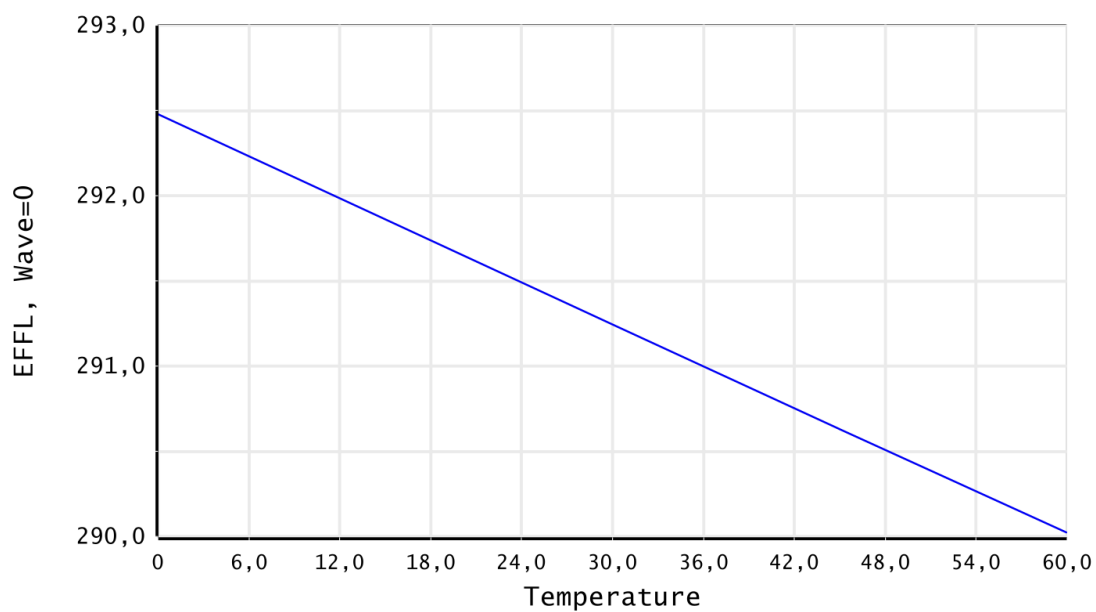


— Diff. Limit-Tangential	--- Diff. Limit-Sagittal	— 0,0000 (deg)-Tangential	--- 0,0000 (deg)-Sagittal
— 2,0000 (deg)-Tangential	--- 2,0000 (deg)-Sagittal	— 1,0000 (deg)-Tangential	--- 1,0000 (deg)-Sagittal

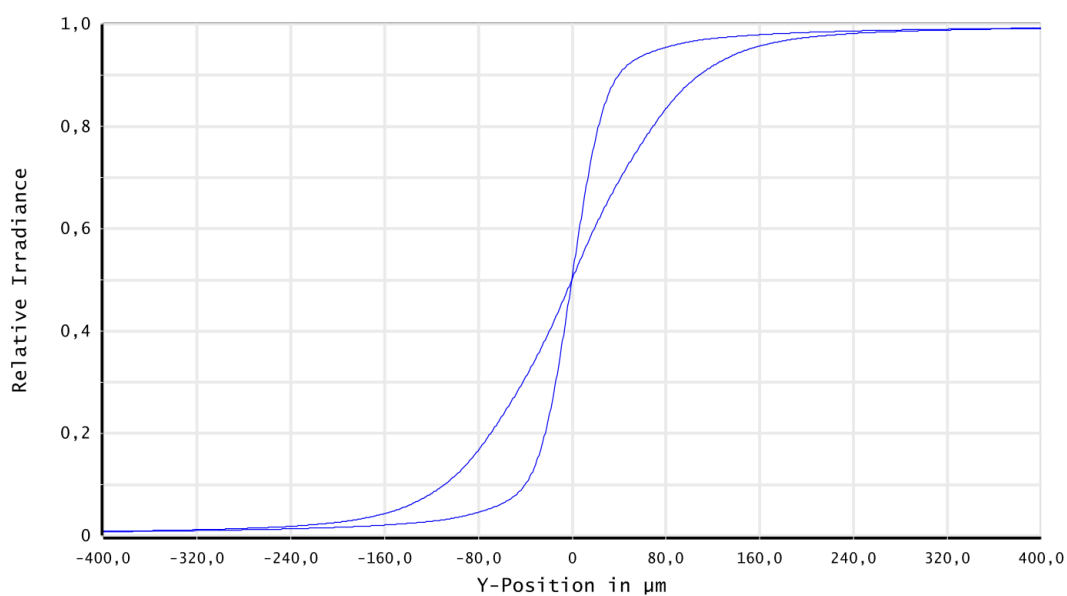
Polychromatic Diffraction MTF

Fonction de transfert de modulation en polychromatique ($8 - 12 \mu\text{m}$) à $T = 20^\circ\text{C}$

Étude de l'impact de la température. Prise en compte de la variation d'indice et de la dilatation du Ge + dilatation des cales en aluminium entre les optiques



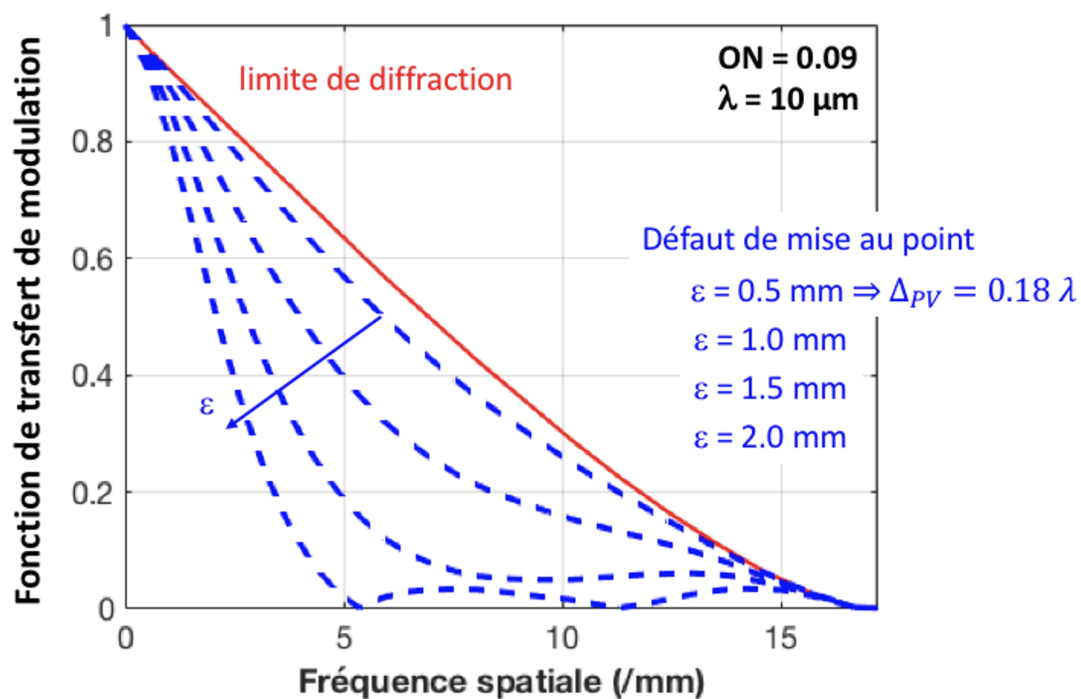
Variation de la focale



FFT Edge Spread Function

Comparaison des ESF à 20°C et 40°C, pour une mise au point au meilleur foyer à 20°C

Modélisation de l'impact d'un défaut de mise au point sur la FTM d'un système en limite de diffraction. Calcul en monochromatique



I 4

Cilas

Optique Adaptive

Version du 10 septembre 2026

Sommaire

1	Introduction et questions de préparation	53
2	Étude expérimentale du miroir bimorphe (BIM 13)	56
3	Rôle et réglage du relais pupillaire	59
4	Analyse du front d'onde	60
5	Voie d'imagerie. Comparaison tache image calculée et réelle	61
6	Mesure de la matrice d'interaction I_M	63
7	Calcul de la matrice de commande	64
8	Fonctionnement en boucle fermée	66
9	Étude de la consigne de l'asservissement	68
10	Correction en temps réel d'une perturbation	69
11	Correction en temps réel sur un objet étendu	70
	Annexe : Spécifications de l'HASO	71

Pré-requis

Pour mettre en œuvre le dispositif décrit dans ce sujet, il est nécessaire de revoir vos cours et TP dans les thématiques suivantes :

- Asservissement numérique
- Calcul scientifique : décomposition en valeurs singulières
- Mesures de front d'onde : décomposition en base de Zernike, réponse impulsionnelle (PSF en anglais ou FEP en français)

1 Introduction et questions de préparation

La résolution obtenue avec de grands télescopes terrestres (> 8 m), même sur les meilleurs sites (Chili, Hawaï), n'est généralement pas supérieure à la résolution obtenue avec un télescope d'environ 20 cm de diamètre ! La cause de cette dégradation de la qualité des images astronomiques est la turbulence atmosphérique. Le rêve des astronomes est de se débarrasser de l'effet de la turbulence sur les images acquises par les télescopes terrestres. L'optique

adaptative transforme ce rêve en réalité en compensant en temps réel les dégradations du front d'onde induites par la traversée de l'atmosphère. Le principe est simple : analyser le défaut du front d'onde provoqué par la turbulence et le compenser en temps réel par un miroir déformable. L'objectif de cet asservissement est d'obtenir un instrument d'optique idéal, c'est-à-dire limité par la seule diffraction. L'optique adaptative n'est pas réservée au seul domaine de l'astronomie. Cette technique investit de nombreux domaines de l'optique instrumentale (imagerie satellitaire, communications optiques en espace libre, ophtalmologie, vision, microscopie, compensation de dérive thermique, remise en forme de faisceaux laser, autofocalisation...).

Un paramètre standard permettant de quantifier la force de la turbulence est le paramètre de Fried, noté r_0 , qui donne le diamètre caractéristique de cohérence de la turbulence. En pratique, cela définit le diamètre équivalent d'un télescope en limite de diffraction. Par exemple, pour de très bonnes conditions d'observation, r_0 est de l'ordre de 20 cm dans le visible à $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$. La résolution angulaire sera alors équivalente à celle d'un télescope de 20 cm de diamètre limité par la seule diffraction.

P1 Résolution limitée par la diffraction. Donner la formule de la résolution limite au sens de Rayleigh (limite induite par la seule diffraction donc en l'absence de turbulence) pour un système optique de diamètre de pupille d'entrée D et à la longueur d'onde λ . Calculer cette résolution angulaire limite pour un grand télescope de 8 m de diamètre de pupille d'entrée, pour une source de longueur d'onde $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$, en microradians et en secondes d'arc.

P2 Résolution en présence de turbulence. Rechercher ou rappeler comment est défini le paramètre de Fried et calculer la résolution angulaire correspondant à un paramètre de Fried de 20 cm en microradians et en secondes d'arc. Par combien est divisée la résolution idéale compte tenu des perturbations de l'atmosphère ? Conclure sur l'intérêt de corriger le front d'onde en temps réel.

Le système d'optique adaptative (dont le schéma est donné figure 4.1) à étudier au cours de ce TP est constitué :

- pour l'analyse de front d'onde : d'un analyseur de surface d'onde de type Shack-Hartmann comprenant une matrice de 32×40 microlentilles développé par la société Imagine Optic.
- pour la compensation des défauts : d'un miroir déformable bimorphe à 13 actionneurs de la société CILAS. Le diamètre du miroir déformable est de 30 mm.

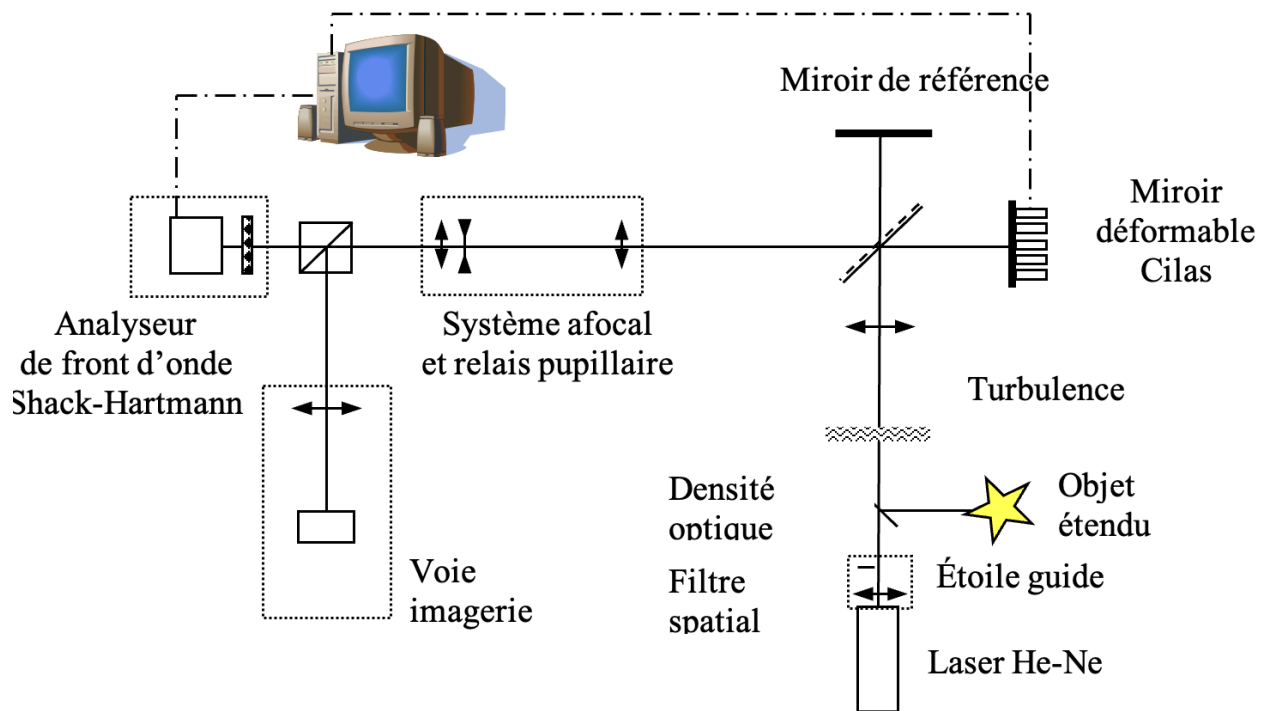


FIGURE 4.1 – schéma global du montage d'optique adaptative

1.1 Rôle et réglage du relais pupillaire

Le diamètre du miroir déformable est 30 mm et la dimension de la matrice CMOS de la caméra de l'HASO est 3.6 par 4.6 mm (32×40 microlentilles). Le relais pupillaire est un système afocal constitué de 3 lentilles : 2 lentilles convergentes (300 et 35 mm) et une lentille divergente (-5 mm) placée au foyer commun. Ce système doit conjuguer en dimension et en position le miroir déformable (qui est la pupille du système) et l'analyseur de front d'onde (raison pour laquelle il est appelé, ici, relais pupillaire).

P3 Faire les 2 schémas de principe du système afocal, en l'absence de la lentille divergente et en présence de la lentille divergente. A quoi sert cette lentille divergente ? Bien dessiner les rayons qui montrent la conjugaison pupillaire entre le miroir déformable et l'analyseur de front d'onde dans les 2 cas (avec et sans lentille divergente).

P4 Expliquer pourquoi cette conjugaison pupillaire est nécessaire. Dans le cas contraire, que se passe-t-il si l'on applique un tilt important au miroir déformable ? Utiliser les schémas précédents pour répondre clairement à cette question.

La distance « miroir déformable – 1^{ère} lentille du système afocal » est 550 mm.

P5 Calculer la taille de l'image, par l'ensemble du système afocal, du miroir déformable et sa position dans les 2 cas (avec ou sans lentille divergente).

1.2 Asservissement de la boucle d'optique adaptative

L'asservissement de la boucle d'optique adaptative a pour objectif de « rejeter » les perturbations du front d'onde pour obtenir idéalement un front d'onde parfaitement corrigé correspondant à une image en limite de diffraction. Nous proposons ici d'étudier de façon simplifiée (mais néanmoins réaliste) cet asservissement, afin d'en comprendre le comportement général. Ceci sera utile par la suite lorsque nous analyserons les résultats expérimentaux.

L'asservissement fonctionne à temps discret, et l'on notera T_e la période d'échantillonnage et $F_e = 1/T_e$ la fréquence d'échantillonnage. La mesure du front d'onde résiduel (après correction) produite par l'analyseur est notée y et la commande appliquée au miroir déformable (le vecteur des tensions appliquées aux actionneurs) est notée u .

A l'instant k , la commande u_k est calculée grâce à un correcteur à action intégrale ou intégrateur, utilisé sur tous les systèmes opérationnels (c'est un intégrateur pur, le I du PID).

On considère ici le cas scalaire (y , g et u sont scalaires), ce qui donne pour l'intégrateur l'équation de récurrence suivante :

$$u_k = u_{k-1} + gy_k$$

où g est le gain de l'intégrateur. Si l'asservissement est efficace, la correction conduira à un front d'onde résiduel suffisamment faible pour que l'image obtenue soit considérée comme étant en limite de diffraction, avec des mesures y qui seront alors proches de 0.

P6 Comme l'asservissement est à temps discret de période d'échantillonnage T_e , quelle est la plus grande fréquence temporelle qui pourra être modifiée par le correcteur ?

P7 On suppose que les fonctions de transfert de l'analyseur et du miroir déformable sont unitaires et correspondent chacune à un simple retard de 1 période T_e . Exprimer la fonction de transfert de l'intégrateur $C(z)$ à partir de son équation de récurrence, puis la fonction de transfert en boucle ouverte $L(z)$ et enfin la fonction de transfert de réjection en boucle fermée $S(z)$ (ou fonction de sensibilité) du système. Montrer simplement que si $g \geq 1$, le système en boucle fermée sera instable.

P8 Tracer avec Matlab la fonction de transfert de réjection $S(z)$ et en déduire une valeur approchée de la bande passante de correction à -3 dB en fonction de F_e .

2 Étude expérimentale du miroir bimorphe (BIM 13)

Le miroir déformable est un miroir « bimorphe », fabriqué par la société CILAS. Il est constitué de 13 actionneurs dont 7 dans la pupille et 6 hors pupille. La pupille du miroir a un diamètre de 30 mm.

Chaque actionneur est constitué de deux couches piézo-électriques collées. Sur chaque couche on applique un champ électrique égal en module, mais de sens opposé : on obtient alors une courbure du miroir par effet bilame dans la zone délimitée par l'actionneur.

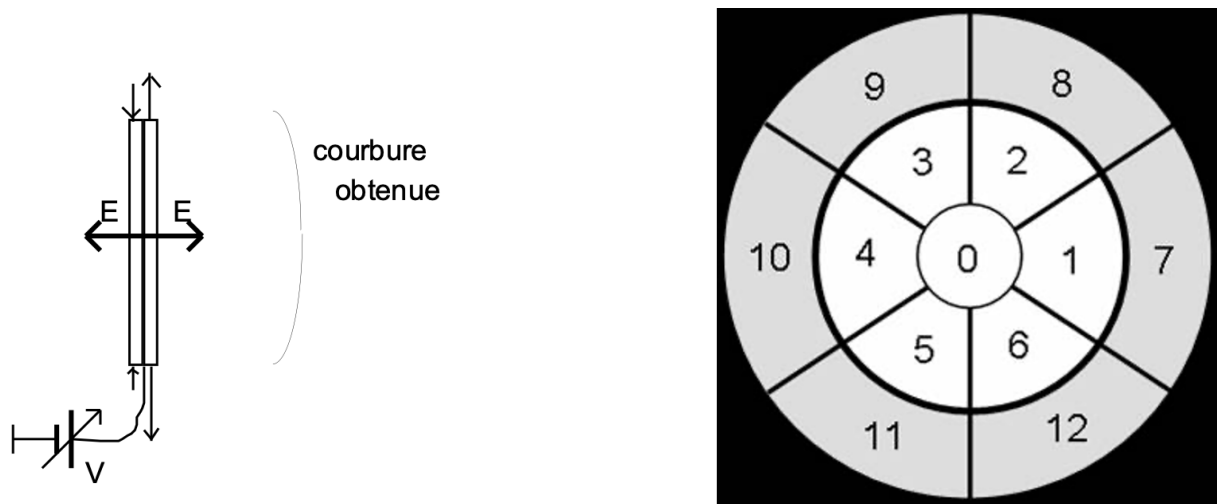


FIGURE 4.2 – Principe du miroir déformable bimorphe Cilas

Chaque actionneur est piloté entre -400 et $+400$ volts par un amplificateur haute tension. La bande passante de cet amplificateur est limitée à une fréquence de 200 Hz (valeur très inférieure aux fréquences de résonance du miroir). Chaque voie d'entrée de l'amplificateur est commandée entre -10 V et $+10$ V par la sortie d'une carte de conversion numérique-analogique.

2.1 Mesures interférométriques des déformations du miroir

Le miroir plan de référence (à $\lambda/20$) et le miroir déformable forment un interféromètre de Michelson. La longueur de cohérence du laser He-Ne permet d'obtenir des franges d'égale épaisseur avec un contraste unitaire.

↪ Retirez la densité optique placée juste devant le laser (avant le filtre spatial).

↪ Réglez l'interféromètre par autocollimation sur le trou de filtrage et observez les franges d'interférence projetées sur le mur à l'aide d'une lame dichroïque placée en sortie de l'interféromètre de Michelson et d'un Clairaut pour agrandir les franges.

↪ Réglez l'orientation du miroir de référence pour obtenir une teinte plate la plus grande possible.

Q1 Quel est le défaut (amplitude, forme, type d'aberration) du miroir déformable lorsque les tensions appliquées aux actionneurs sont toutes nulles ? Ce défaut est-il gênant ? Estimez sa planéité en unité de longueur d'onde du laser.

↪ Mettez sous tension l'alimentation du miroir déformable et lancez le logiciel Wave Tune.

↪ Suivez les indications des figures 4.3 et 4.4 suivantes.

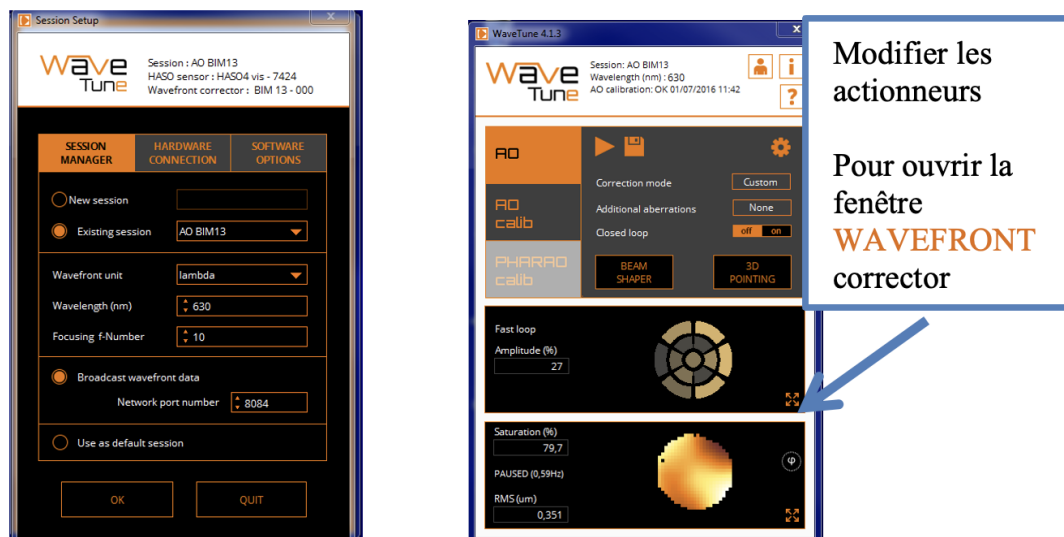


FIGURE 4.3 – Premier écran : Valider *Existing Session* (à gauche) et Menu principal de Wave Tune (à droite)

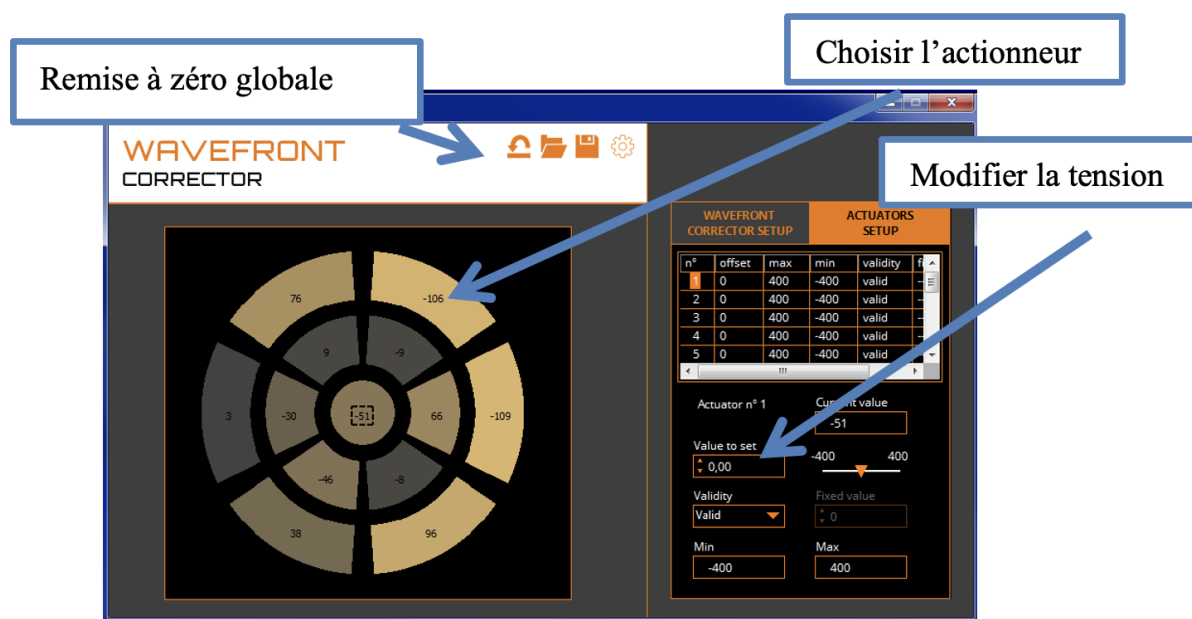


FIGURE 4.4 – Fenêtre *WAVEFRONT corrector*

La fenêtre *WAVEFRONT corrector* permet de modifier la tension appliquée à chaque actionneur du miroir déformable entre -400 et $+400$ Volts.

↪ Observez et interprétez les déformations obtenues pour des tensions appliquées à différents actionneurs en utilisant l'interférogramme.

Q2 En déduire les formes et les amplitudes maximales des modifications des surfaces d'onde induites par le BIM13.

↪ Vérifiez en particulier qu'une variation de tension sur un actionneur du miroir induit une courbure locale du miroir (par exemple en augmentant progressivement la tension sur l'actionneur central).

Q3 Quel type de défaut de front d'onde obtient-on si on applique la même tension sur tous les actionneurs ?

Q4 Quel vecteur de tensions doit-on appliquer pour obtenir un tilt ? Interprétez le résultat.

Q5 Quelle déformation obtient-on si on applique la même tension (100 V par exemple) sur tous les actionneurs périphériques, en dehors de la pupille (8, 9, 10, 11, 12 et 13) ?

3 Rôle et réglage du relais pupillaire

Le relais pupillaire est un système afocal constitué de 3 lentilles : 2 lentilles convergentes (300 et 35 mm) et une lentille divergente (−5 mm) placée au foyer commun. Il doit conjuguer le miroir déformable (30 mm de diamètre) et la matrice de microlentilles de l'HASO (3,6 par 4,6 mm : 32×40 microlentilles).

↪ Remplacez la densité optique placée juste devant le laser (avant le filtre spatial).

↪ Cachez le miroir de référence. Placez correctement la caméra à la position calculée en **P5**.

↪ Suivez les indications de la figure 4.5 pour l'acquisition de la caméra de l'HASO.



FIGURE 4.5 – Fenêtre Mesures de fronts d'onde

Cette fenêtre permet d'observer les taches images sur la caméra de l'HASO qui sont à l'intérieur de la pupille calculée à la question **P5**. La pupille doit être bien centrée et uniformément éclairée.

↪ Retouchez éventuellement aux réglages en orientations du Laser He-Ne, au filtre spatial et à la position transversale de la lentille divergente.

↪ En pivotant très légèrement le miroir déformable autour d'un axe horizontal (visse en laiton sous le support), vérifiez que la pupille dans son ensemble ne se déplace pas.

Q6 Expliquez pourquoi on vérifie ainsi la qualité de la conjugaison entre le miroir déformable et l'HASO ? On utilisera le schéma de la question de préparation **P3**.

4 Analyse du front d'onde

La figure 4.6 ci-dessous rappelle le principe de la mesure de front d'onde par une matrice de microlentille associé à une caméra.

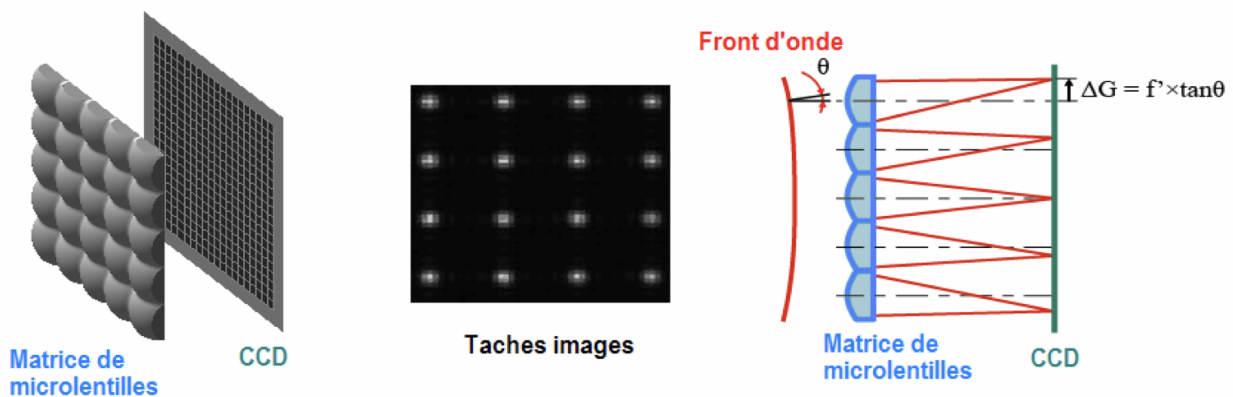


FIGURE 4.6 – Schéma de principe de l'Analyseur de front d'onde de SHACK-HARTMANN (HASO)

A partir de la mesure des déplacements, $(\Delta G_{i,x}, \Delta G_{i,y})$, des taches images données par les microlentilles, on déduit les pentes locales du front d'onde et la surface d'onde elle-même.

↪ Ouvrez la fenêtre « déphasage » du HASO sensor (analyseur de front d'onde) comme indiqué sur la figure 4.7 suivante.

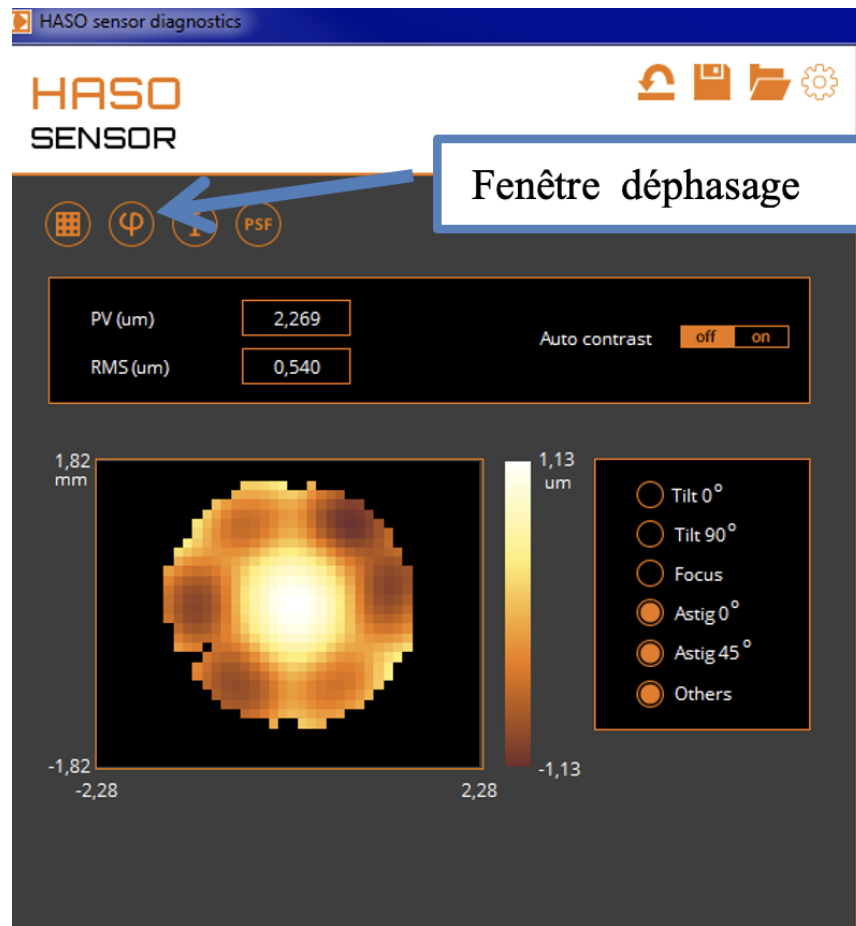


FIGURE 4.7 – Fenêtre HASO sensor. Différence de marche mesurée par rapport au front d'onde sphérique idéal

Q7 Comparez les mesures des fronts d'onde déformés mesurés par l'HASO en PV avec les mesures interférométriques de la première partie. Pour cela, reprenez rapidement les questions **Q1** à **Q5**.

Q8 Vérifiez que la dynamique de l'HASO (pente maximale mesurable) est suffisante pour mesurer les déformations maximales que l'on peut induire à l'aide du miroir Cilas.

5 Voie d'imagerie. Comparaison tache image calculée et réelle

On va maintenant comparer la tache image calculée par le logiciel *Wave Tune* à partir des mesures avec la tache image réelle obtenue avec la caméra *uEye*. La tache image étant ici l'image d'un point source lumineux, on peut également parler indifféremment de FEP (fonction d'étalement de point) ou de PSF (*Point Spread Function*) en anglais.

On rappelle que la tache image est calculée par la transformée de Fourier 2D du défaut du front d'onde mesuré par l'HASO.

Q9 Rappelez la définition du rapport de Strehl. Comment est-il calculé par l'HASO ?

↪ Ouvrez maintenant la fenêtre PSF comme indiqué sur la figure 4.8.

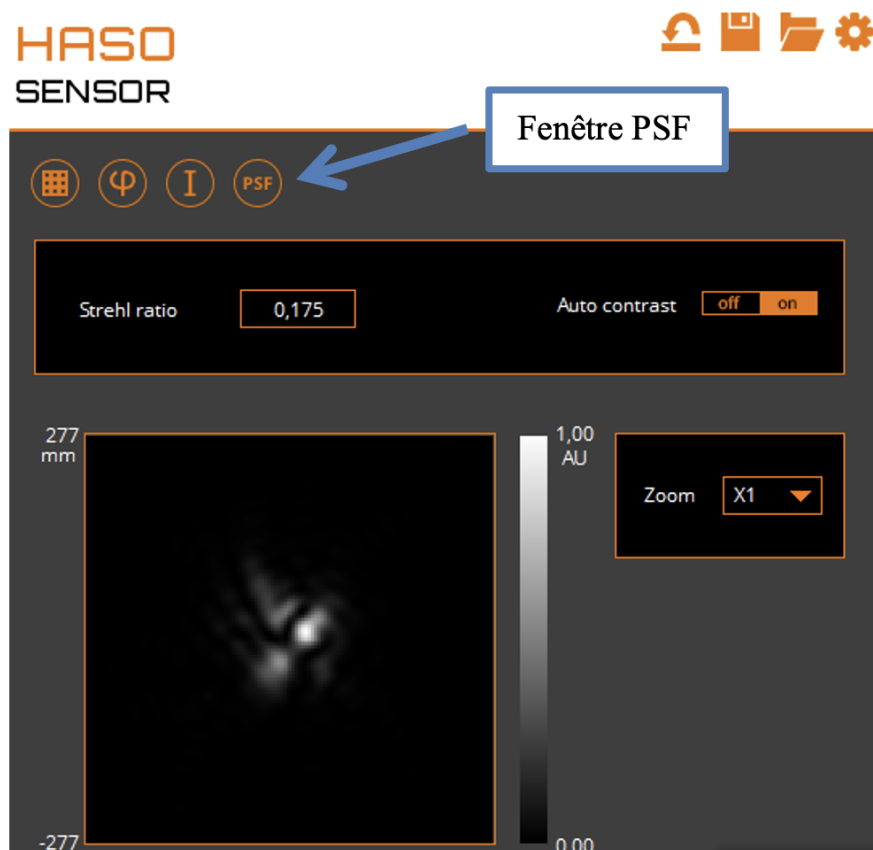


FIGURE 4.8 – Fenêtre PSF de Wave Tune

↪ Lancez le logiciel uEye Cockpit qui pilote la caméra USB de la voie d'imagerie, utilisez les menus indiqués sur la figure 4.9

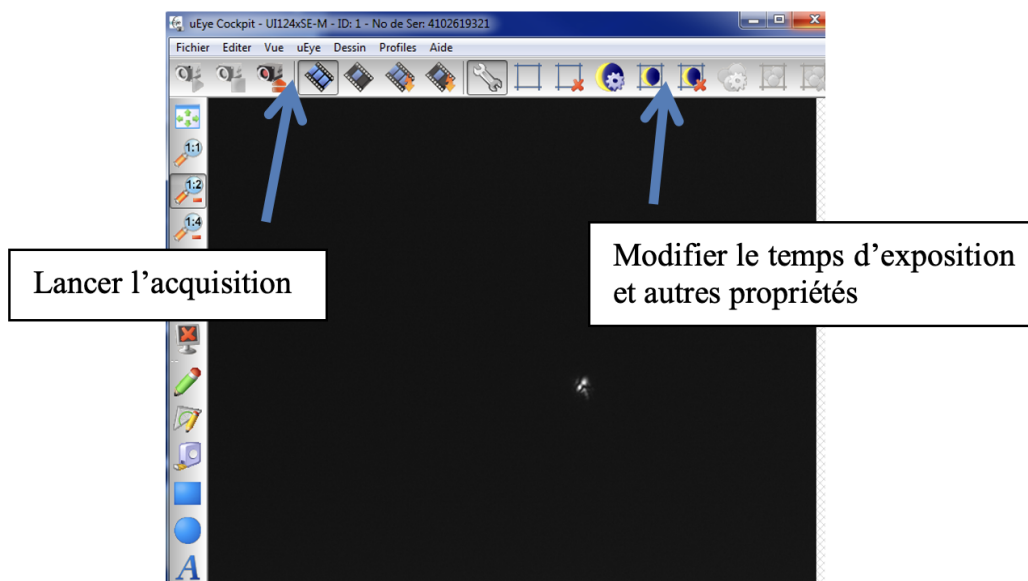


FIGURE 4.9 – Camera uEye de visualisation de la voie d'imagerie

Ajoutez, entre le doublet et la caméra d'imagerie, la lame dichroïque pour atténuer le

faisceau laser.

↪ Réglez la position du doublet et de la caméra IDS. Réglez le temps d'exposition pour observer la tache image dans le plan de meilleure mise au point du doublet.

Q10 Comparez la tache image obtenue sur la caméra uEye et la tache image calculée par le logiciel HASO. Relevez la valeur du rapport de Strehl quand tous les actionneurs sont à zéro.

6 Mesure de la matrice d'interaction I_M

Le but de cette étape de calibration (ou d'étalonnage) est de trouver la relation linéaire entre les tensions du miroir déformable et les mesures :

$$\Delta \vec{G}_{xy} = I_M \vec{V}_{act}$$

où I_M est la « matrice d'interaction. » Cela servira ensuite pour réaliser l'asservissement.

Pour cela, on applique la même tension successivement sur chaque actionneur, et les mesures des déplacements des spots du Shack-Hartmann (obtenues par un calcul de bary-centre) forment successivement les colonnes de la matrice d'interaction I_M .

↪ La mesure de la matrice d'interaction est effectuée dans l'onglet AO Calib et lancée par le bouton Play (voir figure 4.10).

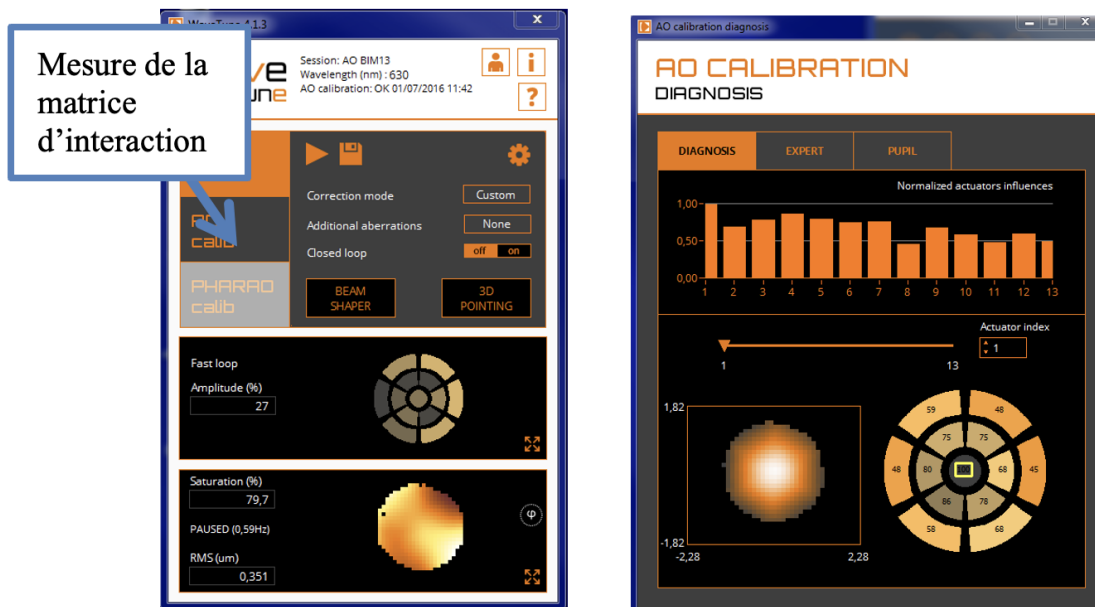


FIGURE 4.10 – Cliquez sur *AO Calib* pour lancer la mesure des fonctions d'influence et ouvrez la fenêtre *AO Calibration Diagnosis* de Wave Tune.

Le logiciel Wave Tune pilote les actionneurs un par un, en les poussant, puis en les tirant (Push/Pull experiment). Pour chacun des actionneurs, la mesure correspond au déplacement moyen des spots calculé par le Shack-Hartmann. Ainsi, pour chaque actionneur

j_{act} , on obtient un vecteur colonne

$$\Delta \vec{G}_{xy} = (\cdots, \Delta G_{i,x}, \Delta G_{i,y}, \cdots)^T$$

pour i variant de 1 à $N_{\text{microlentilles}}$, où $N_{\text{microlentilles}}$ est le nombre de microlentilles valides du Shack-Hartmann (celles qui sont éclairées). Le symbole T indique la transposition. Ce vecteur de plusieurs centaines de lignes sera la j_{act} -ième colonne de la matrice d'interaction I_M . Cette matrice d'interaction est donc une matrice rectangulaire de $(2 \times N_{\text{microlentilles}})$ lignes par 13 colonnes.

Le logiciel calcule aussi, à partir des mesures de pente de l'HASO, la variation du front d'onde dans la pupille induit par chaque actionneur (appelée fonction d'influence de l'actionneur).

Q11 Commentez l'allure et l'amplitude relative de ces fonctions d'influence. Expliquez la procédure utilisée pour leur calcul. Montrez que les fonctions d'influence nous informent sur la disposition des actionneurs.

7 Calcul de la matrice de commande

L'asservissement le plus simple du système d'optique adaptative implique de pouvoir évaluer les tensions $\vec{V}_{\text{act}}$ à appliquer aux actionneurs pour compenser la mesure des déplacements des spots $\Delta \vec{G}_{xy}$.

Notez que la mesure des déplacements des spots $\Delta \vec{G}_{xy}$ est toujours faite par rapport à une position de consigne $\vec{G}_{xy, \text{consigne}}$ (correspondant ici au front d'onde de référence mentionné plus haut et renseigné de façon automatique dans le HASO), soit :

$$\Delta \vec{G}_{xy} = \vec{G}_{xy, \text{consigne}} - \vec{G}_{xy}.$$

Pour évaluer les tensions à partir des mesures, on calcule une « matrice de commande » M_{com} sous la forme :

$$\vec{V}_{\text{act}} = M_{\text{com}} \Delta \vec{G}_{xy}$$

Nous avons étalonné dans la partie précédente la matrice d'interaction I_M , qui permet d'obtenir le système linéaire reliant le vecteur de tensions des actionneurs aux déplacements mesurés :

$$\Delta \vec{G}_{xy} = I_M \vec{V}_{\text{act}}.$$

Pour obtenir M_{com} , il suffit donc d'inverser ce système linéaire.

Or la matrice d'interaction I_M est rectangulaire, donc n'est pas inversible. Il faut alors avoir recours à une inverse généralisée (ou pseudo-inverse), ce qui se fait en passant par une décomposition en valeurs singulières (SVD, *Singular Value Decomposition*). La SVD de la matrice d'interaction I_M est obtenue par décomposition en un produit de 3 matrices :

$$I_M = U W V^T$$

avec :

- U matrice réelle **orthonormée**, (plusieurs centaines de lignes) $\times 13$,
- W matrice réelle **diagonale** 13×13 ,
- V matrice réelle **orthonormée** 13×13 .

Les éléments diagonaux de la matrice W , toujours réels et positifs, sont appelés les valeurs singulières de la matrice d'interaction. Les matrices U et V étant orthonormées, cette décomposition permet de calculer la pseudo-inverse (ou inverse généralisée) de la matrice d'interaction :

$$P = V W^- U^T$$

où W^- est la matrice diagonale constituée des inverses des valeurs singulières non nulles. L'intérêt du pseudo-inverse de la matrice d'interaction est qu'il permet de déterminer un vecteur de tensions, $\vec{V}_{\text{act}} = P \Delta \vec{G}_{xy}$, solution du problème au sens des moindres carrés vérifiant :

$$\left\| \Delta \vec{G}_{xy} - I_M \vec{V}_{\text{act}} \right\|_2^2 \text{ est minimale et de norme } \left\| \vec{V}_{\text{act}} \right\|_2 \text{ minimale.}$$

Cette méthode permet aussi de contrôler les grandeurs relatives des valeurs singulières. Et ceci est très important pour obtenir une bonne stabilité en boucle fermée. En effet, une valeur singulière trop faible en comparaison des autres valeurs indique l'existence d'une combinaison de tensions (ou d'un mode de commande du miroir déformable) ayant un effet faible, voire négligeable, sur les déplacements des barycentres : la matrice W est « mal conditionnée. »

La matrice I_M présente toujours plusieurs valeurs singulières de ce type. Par exemple, si on applique la même tension à tous les actionneurs, on obtient un mode appelé « mode piston » : le miroir ne fait que se translater dans son ensemble. Un tel mode ne peut effectivement pas être mesuré par le Shack-Hartmann (la valeur singulière correspondante est donc nulle en théorie et n'a pas d'influence sur la qualité de l'image).

Garder une valeur singulière trop faible est source de problème : la matrice diagonale W^- aura un terme de valeur très élevée, entraînant rapidement la saturation des actionneurs et donc l'échec complet de la correction. La solution consiste à tronquer les valeurs trop faibles de W , c'est-à-dire à les remplacer par des zéros. On n'inverse ensuite que les valeurs non nulles, ce qui donne une matrice W_{tronq}^- de la forme :

$$W_{\text{tronq}}^- = \left(\begin{array}{ccc|ccc} \sigma_1^{-1} & & & & 0 & \\ & \ddots & & & \vdots & \\ & & \sigma_{n_\sigma}^{-1} & & 0 & \\ \hline 0 & \cdots & 0 & 0 & \ddots & 0 \end{array} \right)$$

où n_σ est le nombre de valeurs singulières non nulles conservées. La matrice M_{com} est alors obtenue par :

$$M_{\text{com}} = V W_{\text{tronq}}^- U^T.$$

L'inversion de la matrice d'interaction I_M est calculée par Wave Tune automatiquement à la fin de la phase d'apprentissage. Les valeurs propres et les modes propres, c'est-à-dire les défauts de front d'onde induit par ces modes, sont calculés et affichés dans la fenêtre « EXPERT » de la fenêtre « AO CALIBRATION » (voir figure 4.11 ci-dessous).

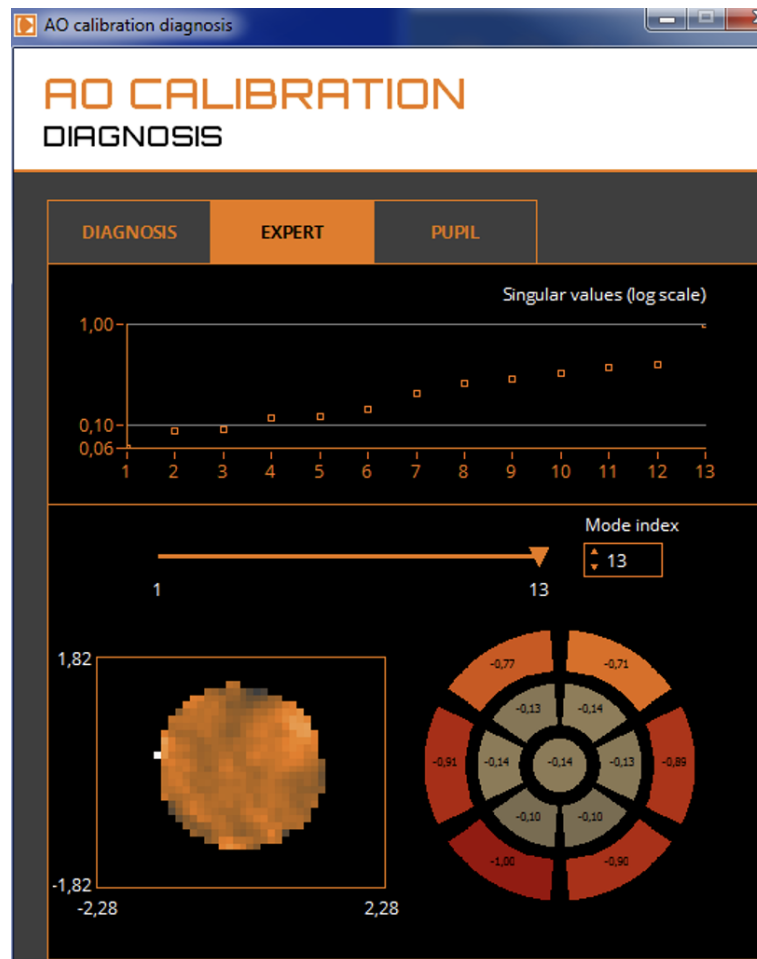


FIGURE 4.11 – Fenêtre EXPERT de *AO Calibration Diagnosis* de Wave Tune.

Q12 Identifiez et nommez les premiers modes en termes de fronts d'onde d'aberration. Expliquez pourquoi, on n'obtient qu'un seul mode « trifoil » avec ce miroir. Expliquez l'allure du front d'onde en forme de fleur à 6 pétales correspondant à l'aberration sphérique.

Q13 Observez les modes les plus élevés qui correspondent aux valeurs singulières de la matrice de commande les plus grandes. Constatez qu'ils correspondent à des tensions appliquées aux actionneurs les plus élevées. Identifiez en particulier le 13-ième mode propre. Retrouvez l'observation que vous avez dû faire à la question **Q5**. Pourquoi ce mode doit-il nécessairement être filtré ?

8 Fonctionnement en boucle fermée

On va maintenant chercher à corriger le front d'onde en utilisant la boucle d'asservissement suivante :

I Lecture de l'image caméra de l'HASO

II Calcul des positions des spots ; on obtient un vecteur déplacement :

$$\Delta \vec{G}_{xy} = \vec{G}_{xy, \text{consigne}} - \vec{G}_{xy}$$

III Calcul du produit de ce vecteur par la matrice de commande M_{com} et par le gain :

$$\Delta \vec{V}_{\text{act}} = g M_{\text{com}} \Delta \vec{G}_{xy}$$

IV Envoi vers le miroir des nouvelles valeurs de tensions ainsi calculées :

$$\vec{V}_{\text{actNouveau}} = \vec{V}_{\text{actPrécédent}} + \Delta \vec{V}_{\text{act}}$$

Q14 En écrivant l'équation de récurrence de la mise à jour des tensions, expliquer pourquoi il s'agit d'un asservissement de type « intégrateur pur ».

La figure 4.12 pointe les différents éléments de l'interface permettant de régler et de mettre en route l'asservissement.

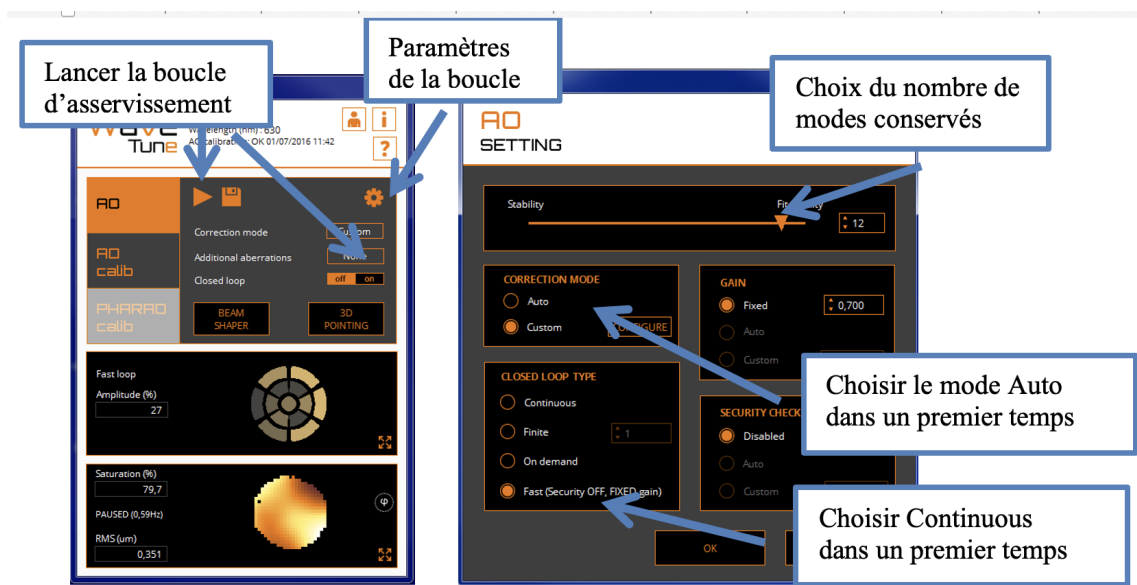


FIGURE 4.12 – Fenêtre de réglage des paramètres de la boucle d'asservissement.

↪ Dans un premier temps, gardez les 13 modes propres et lancez l'asservissement.

↪ Observez simultanément l'amélioration de la tache image sur la caméra d'imagerie et dans la fenêtre PSF ainsi que le défaut du front d'onde résiduel.

Q15 Relevez le rapport de Strehl. Expliquez pourquoi il reste bien inférieur à l'unité.

Q16 Quels sont les actionneurs les plus sollicités ? Pourquoi ? A quel mode correspondent-ils ?

↪ Filtrez dans la fenêtre AO SETTING le 13-ième mode et relancez l'asservissement. Vérifiez que le problème est corrigé. Le rapport de Strehl est-il différent ?

↪ Cliquez maintenant sur « Fast loop ».

↪ Analysez le rôle du gain. Vérifiez si l'asservissement reste stable pour un gain très élevé.

9 Étude de la consigne de l'asservissement

Lorsque l'on choisit le mode *Auto* pour la boucle d'asservissement, la cible est un front plan ou sphérique parfait obtenu à partir de la dernière acquisition par l'HASO avant que la boucle ne soit fermée. Autrement dit, l'HASO mesure les pentes du front d'onde et ne garde que les tilts et la sphère (focus) pour définir le front d'onde cible (ou consigne).

Dans la fenêtre *BEAM SHAPER*, il est possible de définir un front d'onde cible beaucoup plus complexe à partir des coefficients des polynômes de Zernike (voir figure 4.13, ci-dessous).

↪ Stoppez l'asservissement. Ramenez à zéros toutes les tensions appliquées au miroir.

↪ Cliquez sur le bouton BEAM SHAPER (figure 4.13).



FIGURE 4.13 – Fenêtre *BEAM SHAPER*

↪ Analysez le résultat obtenu avec l'asservissement en boucle ouverte, puis fermée, pour un tilt, une coma, un astigmatisme. . .

Q17 Les déformations obtenues correspondent-elle bien aux aberrations du 3ème ordre d'un système optique ?

10 Correction en temps réel d'une perturbation

On va maintenant corriger en temps réel une perturbation variable du front d'onde. Cette perturbation est réalisée par une lame de verre d'épaisseur irrégulière tournant lentement sur le trajet de la lumière provenant de la source.

↪ Ramenez tous les coefficients des polynômes de Zernike à zéro. Lancez la boucle d'asservissement et enregistrez les pentes obtenues (voir la figure 4.14 pour la procédure d'enregistrement).



FIGURE 4.14 – Enregistrement d'une référence

↪ Passez en mode *CUSTOM* et cliquez sur *CONFIGURE*, puis chargez la référence que vous venez d'enregistrer. Cette référence devient ainsi la consigne de l'asservissement.

↪ Placez délicatement la lame de verre qui joue le rôle de perturbation du front d'onde dans le faisceau et la plus proche possible du trou de filtrage. Alimentez le moteur avec une faible tension continue (quelques volts). Le moteur doit tourner le plus lentement possible.

↪ Observez l'influence de la lame sur la tache image et sur l'HASO, puis lancez l'asservissement et observez l'amélioration de la tache image : MAGIQUE!!

↪ Augmentez progressivement la vitesse du moteur. Notez le décrochement de l'asservissement.

Q18 Quelle est approximativement la bande passante de correction de cet asservissement? (Utiliser la question **P8**).

Q19 Pourquoi, même quand le moteur tourne très lentement, la correction n'est-elle pas parfaite ?

11 Correction en temps réel sur un objet étendu

↪ Stoppez le moteur qui fait tourner lame de verre.

↪ Ramenez à zéros les actionneurs du miroir déformable.

↪ Éclairez l'objet test par la diode électroluminescente blanche et réglez le temps d'exposition de la caméra d'imagerie pour bien voir l'objet étendu.

↪ Faites tourner la lame doucement et observez son influence sur la qualité de l'image, puis lancez l'asservissement et observez l'amélioration de l'image : RE- MAGIQUE !!

Q20 La source laser sert d'étoile guide. Observez la qualité de correction de l'image obtenue avec l'optique adaptative sur l'ensemble du champ : pourquoi la correction se dégrade-t-elle lorsque l'on s'éloigne de l'étoile guide ? Faire un schéma pour répondre à cette question.

Annexe : Spécifications de l'HASO

HASO4 VIS

Description	Specification
Aperture dimension	3.6 x 4.6 mm ²
Number of microlenses	32 x 40
Tilt dynamic range	$> \pm 3^\circ$ (400 λ)
Focus dynamic range	± 0.018 m to $\pm \infty$ (350 λ)
Focus dynamic range - maximum NA	0.1
Repeatability (rms)	7.5 nm
Wavefront measurement accuracy in absolute mode (rms)	10 nm
Tilt measurement sensitivity (rms)	5 μ rad
Focus measurement sensitivity (rms)	$3 \cdot 10^{-3} \text{m}^{-1}$
Spatial resolution	$\sim 110 \mu\text{m}$
Maximum acquisition frequency	100 Hz
Working wavelength range	400 - 700 nm

I 5

Mesure de la FTM d'un objectif sur un banc ACOFAM

Version du 10 septembre 2026

Sommaire

1	Introduction	73
2	Préparation du TP	74
3	Mesure directe du contraste de mires carrées	74
4	Description du banc ACOFAM	77
5	Mesure de la distance focale et des aberrations	79
6	Principe de la mesure de FTM avec l'ACOFAM	80
7	Mesures des FTM avec l'ACOFAM	82
8	Comparaison ACOFAM-ZYGO	86

Les questions P1 à P6 sont à préparer avant la séance de TP.

1 Introduction

La Fonction de Transfert de modulation (F.T.M.) d'un système optique est une spécification de plus en plus courante dans le monde de l'optique industrielle pour caractériser la résolution des optiques d'imagerie. Ceci tient au fait que ces systèmes optiques sont utilisés sur des caméras vidéos, caméras infrarouges ou des appareils photo numérique et associés à des capteurs matriciels (CCD ou CMOS) pour lesquels on définit également une Fonction de Transfert de Modulation.

Il existe un grand nombre de techniques de mesure de la FTM. Vous avez déjà vu au cours des TP aberrations de 2ème année (Zygo-Haso) les méthodes indirectes qui utilisent la mesure du front d'onde pour obtenir par calcul de la Transformée de Fourier de l'amplitude du champ dans la pupille la réponse percussionnelle, puis la FTM par une seconde Transformée de Fourier. Un des défauts de ce type de mesure est qu'il est délicat de mesurer la FTM en éclairage polychromatique. En fin de séance, vous comparez vos mesures obtenues sur le banc ACOFAM avec des mesures faites au Zygo ou à l'Haso.

Voici quelques méthodes de mesures « directes » de FTM à partir de la répartition d'éclairement dans le plan image :

- La méthode de mesure de FTM la plus directe consiste à acquérir la réponse percussionnelle (répartition d'éclairement dans la « tache image » d'un point objet), puis à calculer la Transformée de Fourier de cette réponse percussionnelle. Cette méthode

très simple à mettre en œuvre (si on dispose d'une source ponctuelle d'intensité suffisante) est utilisée dans le TP Speckle 3ème année.

- Une première variante de cette méthode consiste à analyser toujours par Transformée de Fourier l'image d'une fente objet très étroite. On mesure ainsi la FTM selon la direction perpendiculaire à la fente (voir TP FTM visible 3ème année).
- Une deuxième variante, très utilisée lorsque l'on ne dispose pas de capteur matriciel ou linéaire, utilise la méthode de Foucault. On analyse la chute du flux total reçu dans la « tache image » lorsqu'on coupe celle-ci par le couteau de Foucault (voir TP FTM IR 3ème année).
- Le banc ACOFAM est une troisième variante qui consiste à analyser l'image d'une fente objet très fine par une mire sinusoïdale de fréquence variable.

Fabriquée dans les années 60, fruit d'une collaboration entre Matra et l'Institut d'Optique, ce banc ACOFAM servait à mesurer la qualité des objectifs et des zooms de caméra cinéma à l'O.R.T.F (Office de Radio Télédiffusion Française). Malgré son âge, il reste un outil formidable pour qualifier objectifs d'imagerie : mesures précises de focales, de distorsions, de courbures, d'aberrations chromatiques et géométriques, de PSF et de FTM.

2 Préparation du TP

P1 Expliquez en termes simples et avec des schémas ce que l'on appelle la fonction de transfert de modulation (FTM) d'un système optique.

P2 Donnez l'allure de la FTM idéale pour un objectif limité par la diffraction de pupille circulaire et de nombre d'ouverture image N , en éclairage quasi-monochromatique. Quelle est sa fréquence de coupure ? Que devient sa fonction de transfert de modulation en éclairage polychromatique ?

L'objectif qui sera étudié est un objectif de caméra vidéo CCTV de focale 16 mm et de nombre d'ouverture variable $N = 16, \dots, 1.4$
Il est associé à un capteur CMOS (3864×2176 pixels adjacents de côté $1,45 \mu\text{m}$).

P3 Calculez la fréquence de coupure de sa FTM à pleine ouverture pour une longueur d'onde de 540 nm. Même question en éclairage polychromatique (entre 400 nm et 800 nm).

P4 Calculez la fréquence d'échantillonnage, F_e , et la fréquence de Nyquist, $F_e/2$, compte tenu de la taille des pixels du capteur CMOS et donner l'allure de la fonction de transfert de modulation de ce capteur.

P5 Quelle doit être approximativement la fréquence de coupure de la FTM de cet objectif pour ne pas limiter la résolution du capteur ?

P6 Pour quel champ objet maximum doit-on mesurer la FTM de l'objectif ?

3 Mesure directe du contraste de mires carrées

Cette méthode constitue une réalisation directe de la définition de la FTM du système d'imagerie complet (objectif + capteur), le montage est celui de la figure 5.1.

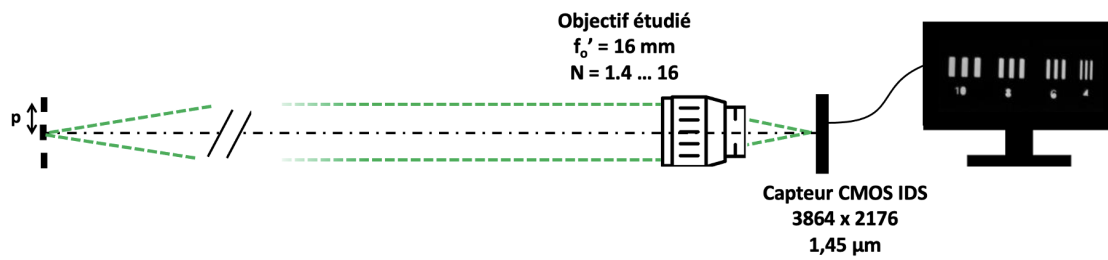


FIGURE 5.1 – Montage 1

L'objectif étudié est associé à un capteur CMOS (1024×1280 pixels adjacents, côté $c = 5,3 \mu\text{m}$), et l'image obtenue est observée sur l'écran via son logiciel uEye de pilotage. L'objet imagé est situé à une distance de 3 mètres de la caméra, il s'agit de mires de Foucault, constituées de traits régulièrement espacés et de rapport cyclique 0,5. La période des mires disponibles est comprise entre $p = 1 \text{ mm}$ et $p = 10 \text{ mm}$.

↪ Éclairez l'objet, observez l'image des mires obtenue à l'écran via l'application uEye.

↪ Faites la mise au point sur la mire. Ajustez l'orientation de l'ensemble objectif + capteur pour que l'image soit au centre du capteur (au plus près de l'axe de l'objectif).

↪ Observez le profil des images des mires, assurez-vous que l'image n'est pas saturée.

↪ Vérifiez les paramètres de la caméra : il est nécessaire de supprimer tout réglage automatique pour ne pas ajouter de traitement numérique et de bruit électronique ! En particulier, dans l'onglet 'Image', supprimez le gain automatique (imposez gain = 1), le niveau de noir (à ajuster manuellement, selon les conditions d'éclairage). Supprimez aussi la correction non-linéaire du gamma. Réglez manuellement le temps d'exposition (onglet 'Caméra') pour ne pas saturer le capteur tout en utilisant au mieux sa dynamique de 256 niveaux. Voir la figure 5.2 pour les réglages.

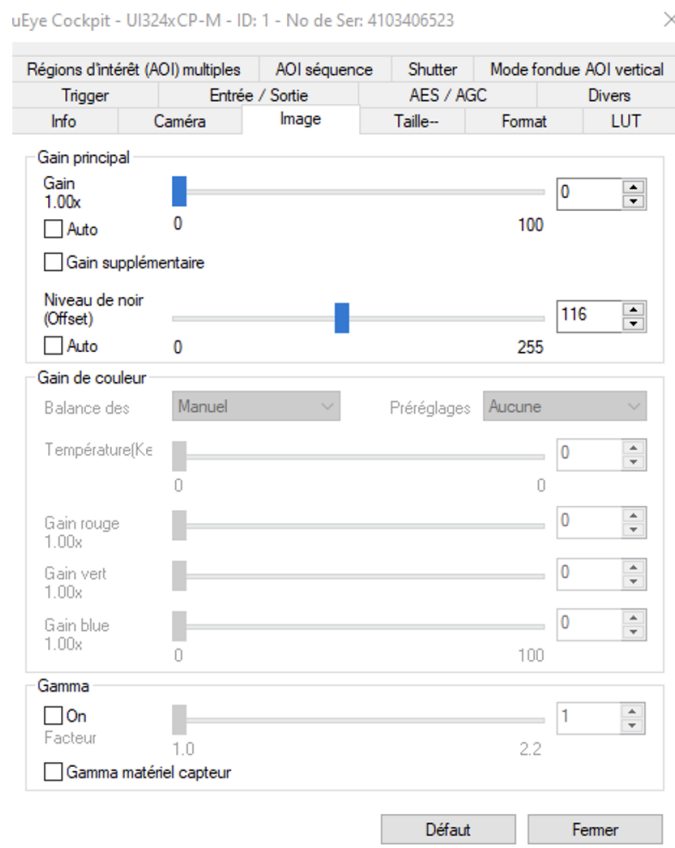


FIGURE 5.2 – Paramètres caméra pour l'observation directe des mires

↪ Ajustez la région d'intérêt à la mire, sauvegardez les images de mire au format .bmp ou .tiff.

↪ Utilisez le code Matlab `Analyse_Mire.mlx` pour traiter les images et obtenir les contrastes de chaque mire. Utilisez la documentation dédiée disponible dans la salle.

↪ Mesurez les différentes fréquences spatiales images σ' associées aux mires observées. Vérifiez la cohérence de ces valeurs compte tenu de la distance focale de l'objectif et de la distance de la mire objet.

↪ Mesurez le contraste des images des mires aux différentes périodes spatiales disponibles, et pour plusieurs nombres d'ouverture. Observez l'évolution du contraste avec N , le nombre d'ouverture, à une période donnée.

Q1 Mettez-vous en évidence un phénomène d'aliasing pour les mires de plus faibles périodes spatiales ?

Q2 Comparez les évolutions du contraste de l'image de la mire avec celle attendue théoriquement pour l'ensemble 'objectif idéal + capteur'.

Q3 Quel est l'impact d'un défaut de mise au point – obtenu en ajustant le réglage de mise au point de l'objectif – sur le contraste des mires ?

Q4 Observez-vous une évolution sensible du contraste de l'image des mires lorsque celles-ci sont situées au bord du champ du capteur? Que peut-on en conclure sur les aberrations de champ.

Remarque : la fonction de transfert de modulation est définie pour une mire à profil d'éclairement sinusoïdal (= mire « mono-fréquence spatiale ») et non pour une mire à profil rectangulaire, comme ici.

Q5 Comment pourrions-nous déduire la valeur de la FTM à partir de la mesure faite avec des mires carrées?

4 Description du banc ACOFAM

Les figures 5.3 et 5.4 décrivent les différents éléments de l'imposant instrument.

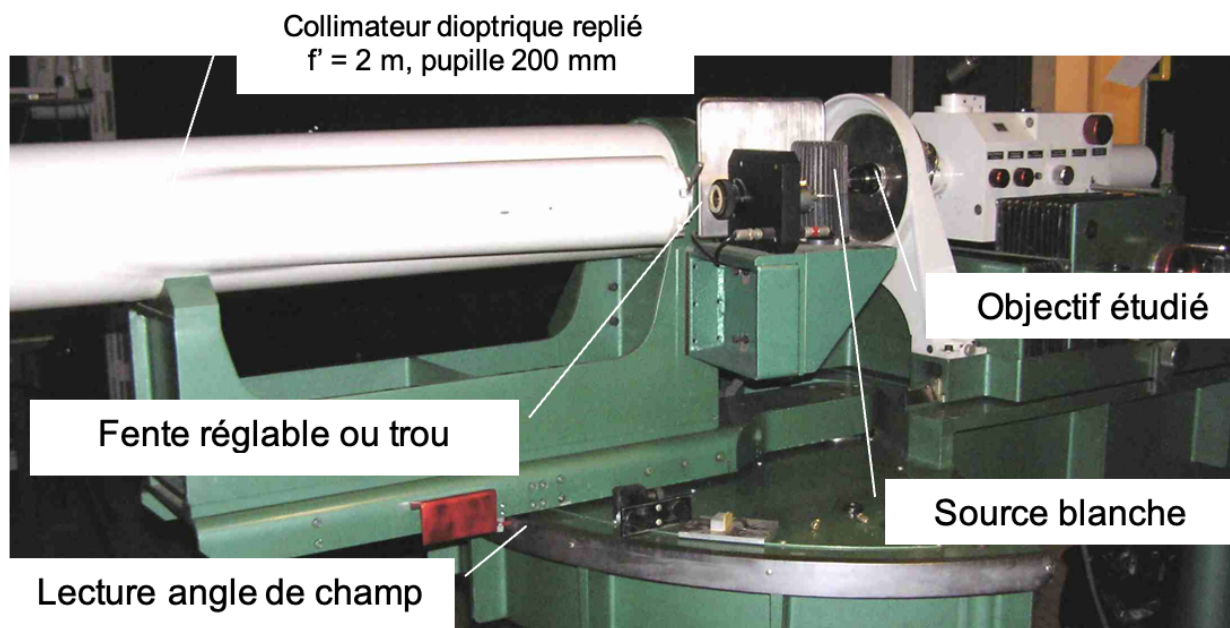


FIGURE 5.3 – Banc ACOFAM de mesure de Fonction de Transfert de Modulation de systèmes optiques

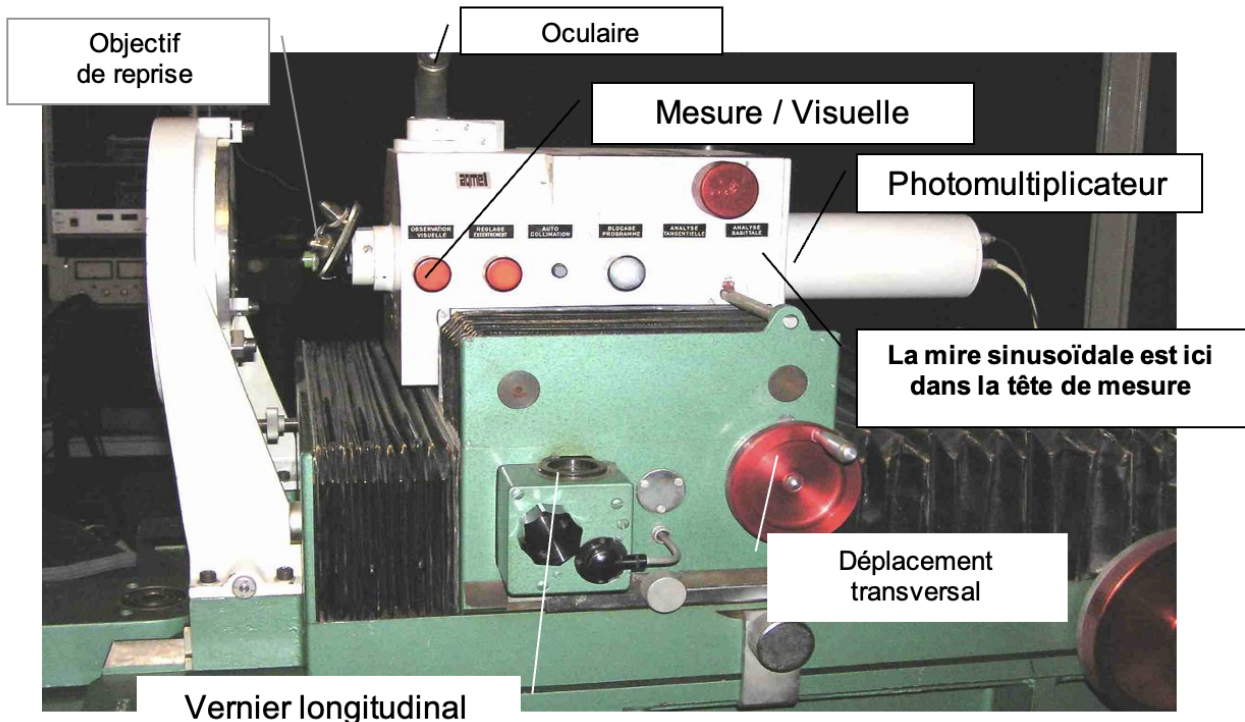


FIGURE 5.4 – Tête de mesure du banc ACOFAM de mesure de FTM

Un miroir escamotable (position « Visuelle ») permet de faire une étude visuelle de l'éclairement dans l'image de l'objectif étudié.

ATTENTION : le bouton d'escamotage du miroir est très fragile.

Sur la voie visuelle, l'image de la fente, donnée par l'objectif étudié, est reprise successivement par un objectif de microscope et un doublet placé dans le tube de support de l'oculaire. Pour l'objectif de microscope marqué ($\times 50$: grandissement de 50) le grandissement entre son plan objet et le plan focal objet de l'oculaire est en réalité : ($\times 82 \pm 5$, grandissement de 82).

La figure 5.5 reproduit le schéma de principe donné dans la documentation.

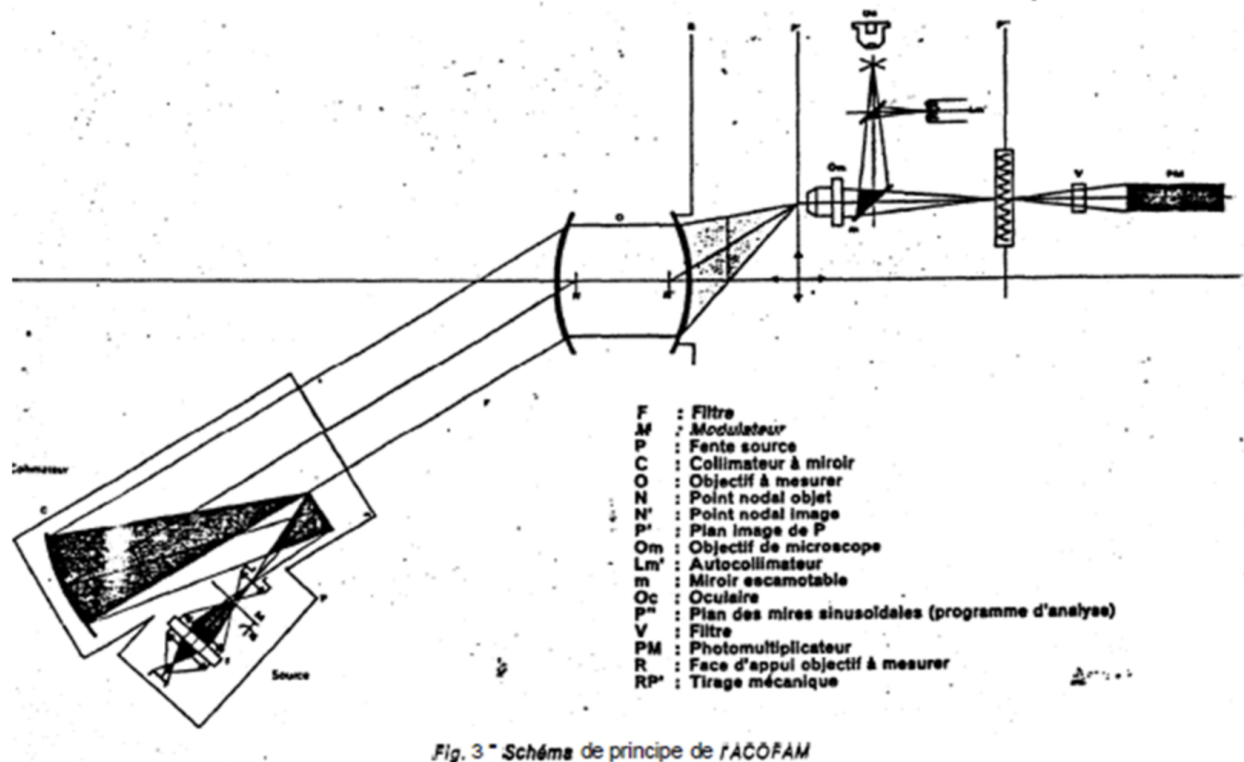


FIGURE 5.5 – Document datant des années 80 (il y a des erreurs !)

5 Mesure de la distance focale et analyse des aberrations géométriques d'un objectif

Le Banc ACOFAM est avant tout est un excellent dispositif pour caractériser les systèmes optiques d'imagerie par la méthode du point lumineux (star test) déjà vu en travaux pratiques de deuxième année.

↪ Placez le collimateur précisément sur l'axe (graduation 0 degré). Observez et commentez, pour plusieurs ouvertures de l'objectif étudié, la tache image obtenue en lumière blanche et avec le filtre vert (541 nm). Quelles sont d'après vous les diverses aberrations présentes à grande ouverture ? A partir de quel nombre d'ouverture l'objectif vous paraît-il limité par la diffraction ?

↪ A pleine ouverture, mesurez la dimension de la tache image en lumière monochromatique et polychromatique et la position du meilleur foyer dans les 2 cas.

↪ Repérez précisément la position longitudinale de l'image au meilleur foyer (utilisez le vernier de position longitudinale de la tête de mesure gradué au micron).

↪ Évaluez le chromatisme axial.

Q6 Ce chromatisme dégradera-t-il la qualité de l'image ?

↪ Mesurez aussi la position transversale du meilleur foyer (utilisez cette fois le vernier de position transversale de la tête de mesure placé derrière le photomultiplicateur).

↪ Pivotez de quelques degrés le collimateur, notez bien la position angulaire et déplacez transversalement la tête d'analyse pour visualiser la tache image. Relevez précisément la position transversale du meilleur foyer.

Q7 Déduisez des mesures précédentes la distance focale de l'objectif. Estimez l'incertitude de mesure.

Remarquez bien que la distance focale est une grandeur définie dans le cadre du modèle paraxial de l'objectif (modèle linéaire ou modèle de Gauss)

↪ Placez maintenant le collimateur au champ objet maximum correspondant au capteur associé à l'objectif étudié.

↪ Relevez précisément les nouvelles positions, longitudinale et transversale, de la tête de mesure de l'ACOFAM.

Q8 L'objectif possède-t-il un défaut de courbure de champ ou un défaut de distorsion ?

↪ Mesurez ces deux défauts (distorsion et courbure de champ).

↪ Mesurez à pleine ouverture la dimension de la tache image en lumière blanche.

Q9 Quelles aberrations principales cet objectif présente-il ? Est-il bien adapté à la résolution du capteur choisi ? Quel sera en lumière blanche, sur l'axe et pour le champ objet l'**ordre de grandeur** de la largeur à mi-hauteur de la FTM ?

6 Principe de la mesure de FTM avec l'ACOFAM

Pour obtenir une valeur de la FTM à une fréquence spatiale image donnée, la méthode la plus directe, utilisée dans la première partie du TP, consiste à disposer dans le plan objet une mire de luminance sinusoïdale et de mesurer le taux de modulation obtenu dans l'image de la mire. On peut mesurer le flux qui traverse une fente fine que l'on balaye dans le plan image (Cas 1, figure 5.6)

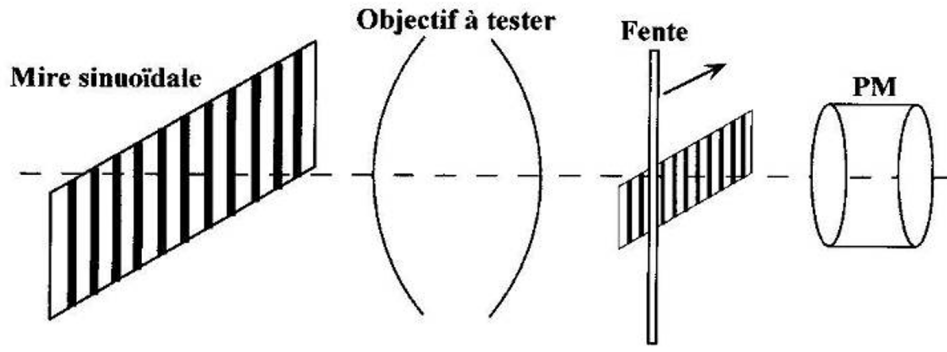


FIGURE 5.6 – Cas 1

Sur le banc ACOFAM, à l'inverse, on balaye, à vitesse constante, une mire sinusoïdale dans le plan image d'une fente objet très fine (Cas 2, figure 5.7) :

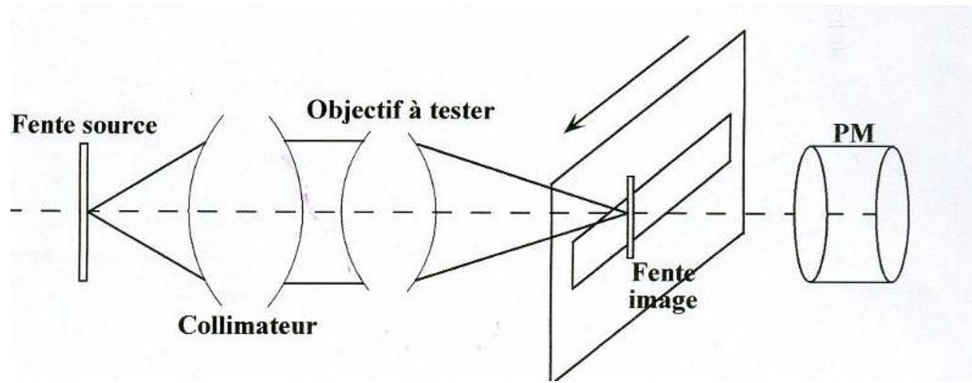


FIGURE 5.7 – Cas 2

Dans les deux situations, le signal obtenu dépend de produits de convolution de la réponse percussionnelle $RPI(x, y)$ du système optique avec une fente (décrite par une fonction porte $\Pi_F(x)$) et la mire sinusoïdale de période spatiale X_m $M_m(x) = A \times \sin(x/X_m)$. Les cas 1 et 2 sont exactement équivalents. En effet, compte tenu du grandissement, g_y , du système collimateur + objectif à tester :

Cas 1 :

Le signal obtenu résulte de la convolution de l'image géométrique de la mire sinusoïdale objet avec la RPI du système optique et la fente placée dans le plan-image, soit :

$$S(x') = M_m(x') * RPI(x', y') * \Pi'_F(x')$$

avec $M_m(x') = A \times \sin(x'/(g_y X_m))$ l'image de la mire. Dans l'espace de Fourier, cela correspond simplement à un signal à la fréquence spatiale $\sigma_m = \frac{1}{g_y X_m}$

$$\tilde{S}(\sigma_m) = FTM(\sigma_m, 0) \times \tilde{\Pi}'_F(x')$$

Cas 2 :

Le signal obtenu résulte de la convolution de l'image géométrique de la fente source avec la RPI du système optique et la mire sinusoïdale placée dans le plan image, soit :

$$S(x') = M'_m(x') * RPI(x', y') * \Pi_F(x')$$

Les deux résultats sont équivalents, dès lors que la largeur de la fente placée dans l'espace-image (dans le cas 1) est bien identique à la largeur de l'image géométrique de la fente source (cas 2).

Q10 Quelle est l'amplitude de la modulation observée à la fréquence spatiale σ_m ? Quelle est la contrainte sur la largeur de la fente ?

7 Mesures des FTM avec l'ACOFAM

Dans la pratique, on s'arrangera pour que la fente soit toujours suffisamment fine (par rapport à la largeur de la réponse percussionnelle) pour ne pas avoir besoin d'en tenir compte.

La mire sinusoïdale utilisée dans le plan image est une mire métallique usinée avec une très grande précision. Elle est constituée de sinusoïdes par morceaux de pas de plus en plus petits. Cette mire va défiler dans le plan de l'image de la fente donnée par l'objectif à étudier (voir figure 5.8). On mesure le flux transmis par un photomultiplicateur placé juste derrière la mire. Ainsi, le signal obtenu correspond au flux dans l'image de la fente traversant la mire métallique sinusoïdale par morceaux.

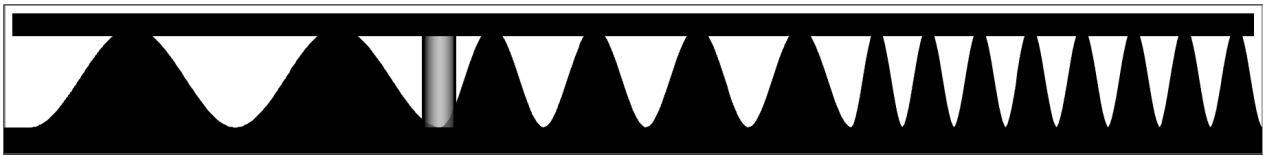


FIGURE 5.8 – Mire sinusoïdale par morceaux dans l'ACOFAM défilant devant l'image de la fente

Q11 Montrez qu'il est équivalent d'utiliser une mire sinusoïdale comme celle de l'ACOFAM plutôt qu'une mire dont le facteur de transmission serait parfaitement sinusoïdal.

La mire étant sinusoïdale par morceau, il en est de même pour le signal enregistré pendant le défilement de la mire devant l'image de la fente. Le taux de modulation du signal, $S(t)$, est la valeur de la FTM de l'objectif pour la fréquence spatiale, ν (en mm^{-1}), correspondante dans le plan image de l'objectif étudié.

$$\text{FTM}(\nu) = \frac{S_{\max}(\nu) - S_{\min}(\nu)}{S_{\max}(\nu) + S_{\min}(\nu)}$$

La mire sinusoïdale par morceau dans l'ACOFAM est partagée en 7 portions de sinusoïdes dont les fréquences spatiales sont : 0,15 - 0,4 - 0,6 - 0,8 - 1 - 1,2 - 1,4 mm^{-1} . L'ACOFAM est équipé d'un objectif de microscope de reprise de grandissement $\times 50$.

Q12 Expliquer comment ce grandissement doit être pris en compte et pourquoi il doit être connu très précisément pour effectuer une mesure de la FTM avec le banc ACOFAM.

Q13 Calculez les fréquences spatiales images pour lesquelles la FTM de l'objectif étudié sera mesurée. Comment pourrait-on obtenir d'autres valeurs de fréquences spatiales ?

Q14 On mesure ainsi la FTM selon la direction perpendiculaire à la fente-source. Comment pourrait-on obtenir la FTM selon d'autres directions ?

7.1 Mode d'emploi pour la mesure des FTM

:

La figure 5.9 indique les éléments de contrôle de l'instrument.

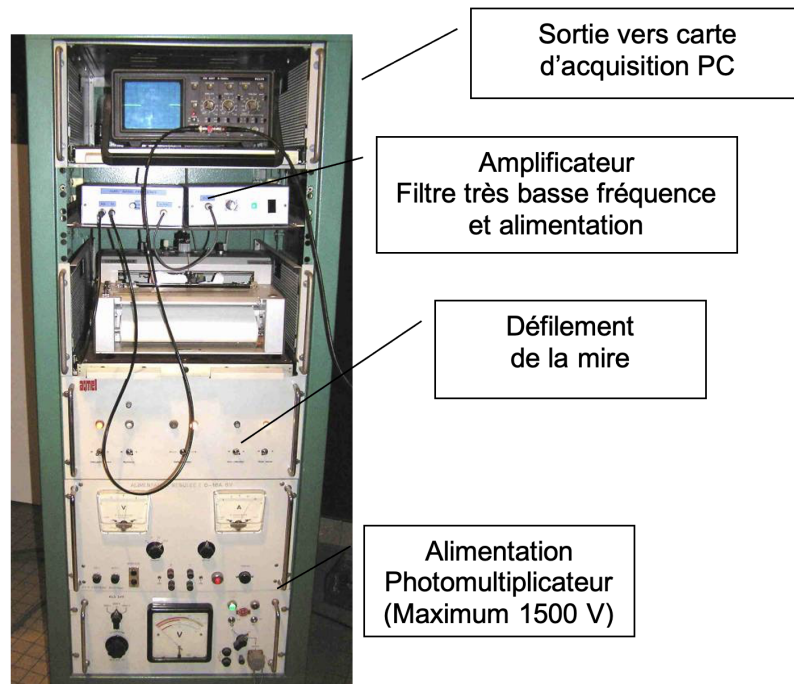


FIGURE 5.9 – Alimentations et acquisition du signal

- ↪ Réglez à nouveau le collimateur dans l'axe.
- ↪ Remplacez délicatement le trou source par la fente verticale réglable en largeur.
- ↪ Observez l'image de la fente et diminuer sa largeur jusqu'à ce qu'elle soit suffisamment fine.

Dans la pratique, on s'arrangera pour que l'image de la fente source soit toujours suffisamment fine (par rapport à la largeur de la réponse percussionnelle) pour ne pas avoir besoin d'en tenir compte pour la mesure des FTM .

Q15 Comment vérifiez-vous que la largeur de la fente source est suffisamment faible pour ne pas avoir à en tenir compte dans la mesure de la FTM de l'objectif étudié ?

Remarque : Pour l'acquisition du signal, le niveau d'éclairement peut être très faible car le détecteur utilisé est un photomultiplicateur (PM) de très grande sensibilité. Sa sensibilité augmente très vite avec la haute tension qui polarise les dynodes et l'anode du photomultiplicateur (voir figure 5.10).

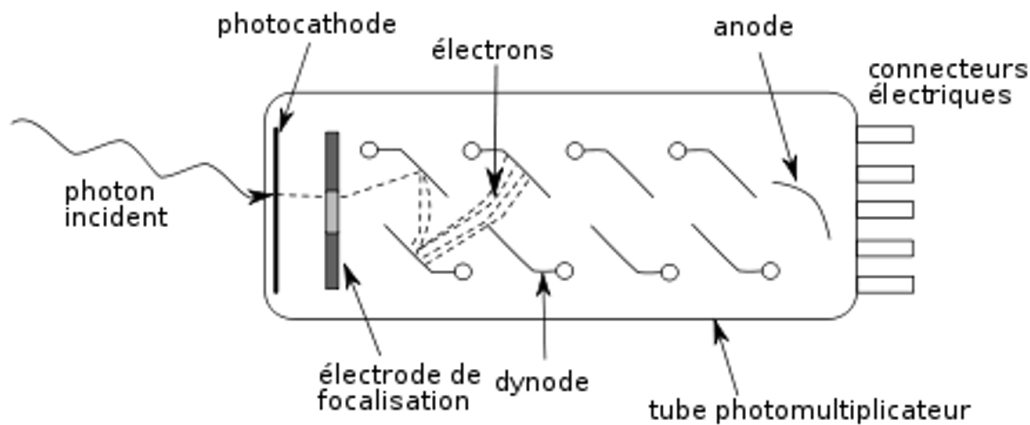


FIGURE 5.10 – Schéma de principe d'un photomultiplicateur

Q16 Expliquez rapidement le principe de fonctionnement d'un photomultiplicateur.

Le signal délivré par le photomultiplicateur est amplifié, filtré très basse fréquence, visualisé sur un oscilloscope de contrôle et envoyé simultanément sur l'entrée d'une carte d'acquisition.

- ↪ Allumez la tension d'alimentation de photomultiplicateur. **Ne dépasser pas 1500 V !**
 - ↪ Placez le miroir escamotable sur la position « Mesure ». **ATTENTION : le bouton d'escamotage du miroir est très fragile.**
 - ↪ Vérifiez les branchements et réglez la tension d'alimentation du photomultiplicateur pour obtenir un signal visualisé par l'oscilloscope de 0,5 à 2 volts dans cette position « Mesure ».
 - ↪ Enfin lancez `Matlab` ou `FTM_ACO2` sous `Matlab`.
 - ↪ Pour mesurer une FTM, sélectionner le sous- menu « Effectuer une acquisition ».
- Le programme demande d'abord d'acquérir le signal maximum.
- ↪ Placez-vous sur la position « Mesure » et appuyez sur « OK ».
- Le programme demande ensuite d'acquérir le niveau bas : signal d'obscurité.
- ↪ Placez-vous sur la position « Observation visuelle » (le miroir escamotable masque le flux) et appuyer sur « OK ».
 - ↪ Pour l'acquisition, placez-vous à nouveau sur la position « Mesure ». Appuyez sur « OK » puis immédiatement après lancez le défilement de la mire (le sens est indifférent).

Attention, l'acquisition prend 1 minute et 30 secondes. Patience !

↪ Observez le signal à l'oscilloscope.

↪ Validez l'enregistrement effectué s'il semble correct.

↪ Après avoir entré dans le menu « Configuration » le grandissement de l'objectif de microscope de reprise, modifier le nombre d'ouverture de objectif étudié et la longueur d'onde en nanomètres (0 pour une mesure en lumière blanche), les étapes du calcul sont :

- Filtrage numérique passe bas du signal (Butterworth 8ème ordre)
- Calcul de la FTM : Détection des minima et maxima de la courbe et calcul du facteur de modulation des 7 portions de sinusoïde.
- Affichage de la FTM mesurée.

Remarque : les mesures de FTM sont toujours délicates. Vérifiez bien la mise au point, le niveau de signal, la largeur de fente suffisamment fine ...

Placez-vous bien dans l'obscurité complète pendant la mesure !

Faites vérifier tous ces réglages par l'enseignant·e.

Contrôlez et interprétez vos résultats au fur et à mesure.

7.2 Mesures sur l'axe

↪ Mesurez soigneusement les FTM de l'objectif en monochromatique et en polychromatique au plan de meilleure mise au point pour $N = 1.4, 2, 2.8, \dots$. Vous pouvez sauvegarder les courbes (Matlab : Export au format png).

Q17 Commentez et comparez les FTM obtenues. Vérifiez que les mesures de FTM sont compatibles avec les mesures d'aberrations au point lumineux.

7.3 Mesures dans le champ

↪ Mesurez soigneusement les FTM de l'objectif étudié pour le champ objet maximum, Chp_maxi, en lumière blanche pour $N = 1.4, 2, 2.8, \dots$.

Q18 Commentez et comparez les FTM obtenues. Vérifiez qu'elles sont compatibles avec les mesures visuelles au point lumineux du début du TP.

8 Comparaison avec les FTM et les PSF calculées par le ZYGO

↪ Dévissez l'objectif vidéo après avoir repéré soigneusement sa position autour de son axe sur le banc ACOFAM et placez-le sur le ZYGO dans la même position afin de mesurer ses aberrations à pleine ouverture, d'abord sur l'axe.

Q19 La longueur d'onde de mesure n'est pas la même : 633 nm (Zygo) au lieu 540 nm (ACOFAM). Comment pouvez-vous en tenir compte ?

Q20 Comparez la PSF et la FTM mesurée à partir du défaut du front d'onde par le ZYGO pour les mêmes ouvertures, $N = 1.4, 2 \dots$ Commentez.

Attention : N'oubliez pas de rentrer la focale et le diamètre dans « Focus plane option » du logiciel du Zygo avant de calculer les PSF et les FTM.