

Optique Adaptative

Version 2013-2014

Introduction

La résolution obtenue avec de grands télescopes ($>8\text{m}$), même sur les meilleurs sites (Chili, Hawaï), n'est jamais supérieure à la résolution obtenue avec un télescope de 30 cm de diamètre ! La cause de cette dégradation de la qualité des images astronomiques est la turbulence atmosphérique. Le rêve des astrophysiciens est de se débarrasser de l'effet de cette turbulence sur les images astronomiques. L'optique adaptative transforme ce rêve en réalité en compensant en temps réel les dégradations induites par la turbulence sur le front d'onde. 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. L'optique adaptative (ou optique active pour les corrections basses fréquences) n'est pas réservée au seul domaine de l'astrophysique. Cette technique se répand rapidement à tous les domaines de l'optique instrumentale (optique ophtalmique, compensation de dérive thermique, remise en forme de faisceaux laser, autofocalisation, etc.).

Q0- Pourquoi faire de la correction de surface d'onde?

➤ Calculer la résolution angulaire idéale (limite liée à la diffraction) 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.

En pratique sur un très bon site astronomique, le paramètre de Fried, r_0 , est de l'ordre de 30 cm.

➤ Rechercher ou rappeler comment est défini le paramètre de Fried et calculer la résolution correspondant à un paramètre de Fried de 30 cm en microradians et en secondes d'arc. Par combien est divisée la résolution idéale compte tenu des perturbations de l'atmosphère ?

Le système d'optique adaptative que vous allez étudier au cours de ce TP est constitué :

- pour l'analyse de front d'onde d'un analyseur de type Shack-Hartmann HASO 32 comprenant : une matrice de microlentilles (32×32) et une matrice CCD (5 mm x 5 mm)
- pour la compensation des défauts : d'un miroir déformable MIRA0 à 52 actionneurs.

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 cet asservissement. L'optique adaptative est un asservissement numérique MIMO (multiple input, multiple output) qui utilise largement les propriétés de l'algèbre linéaire.

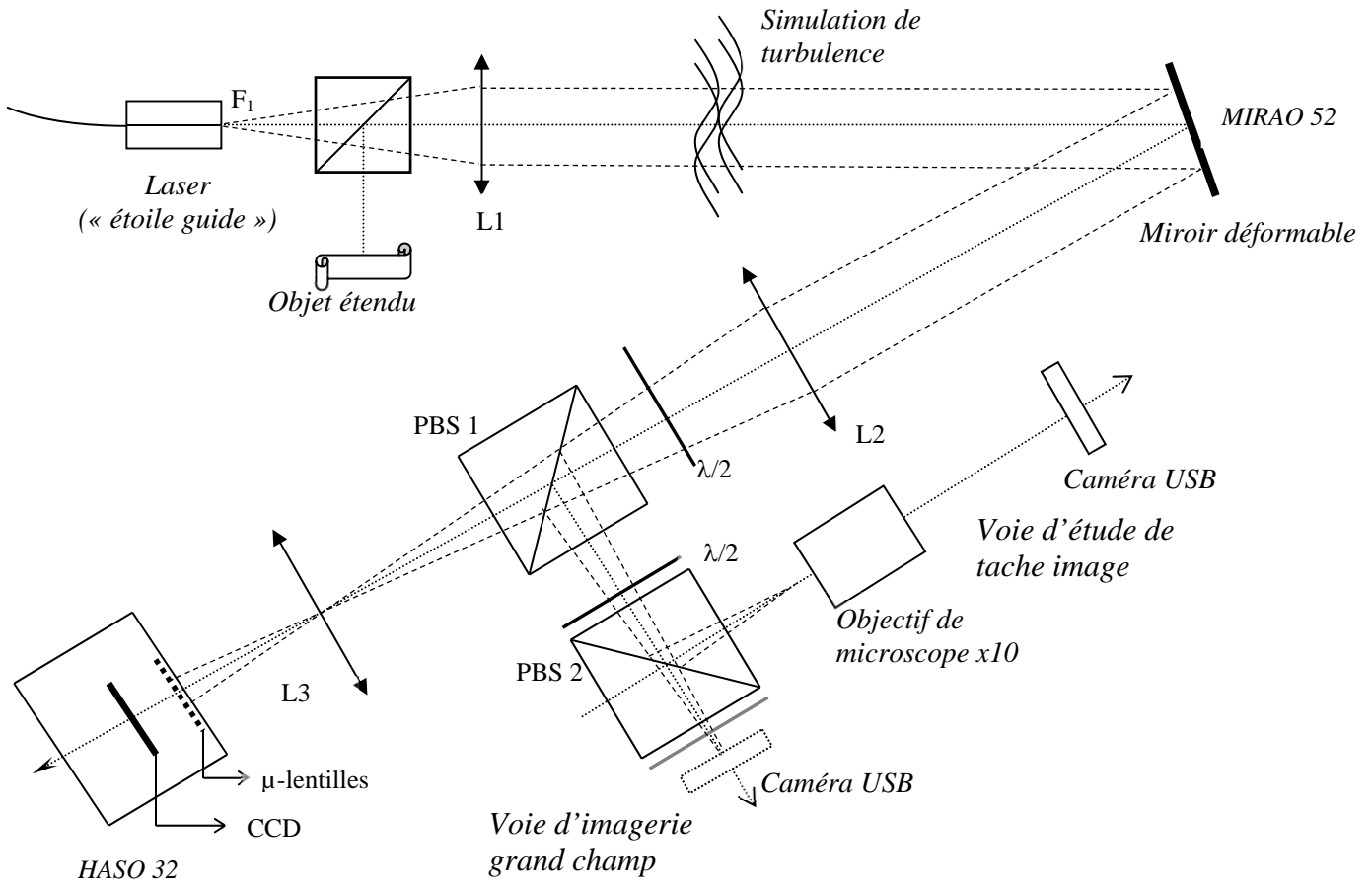
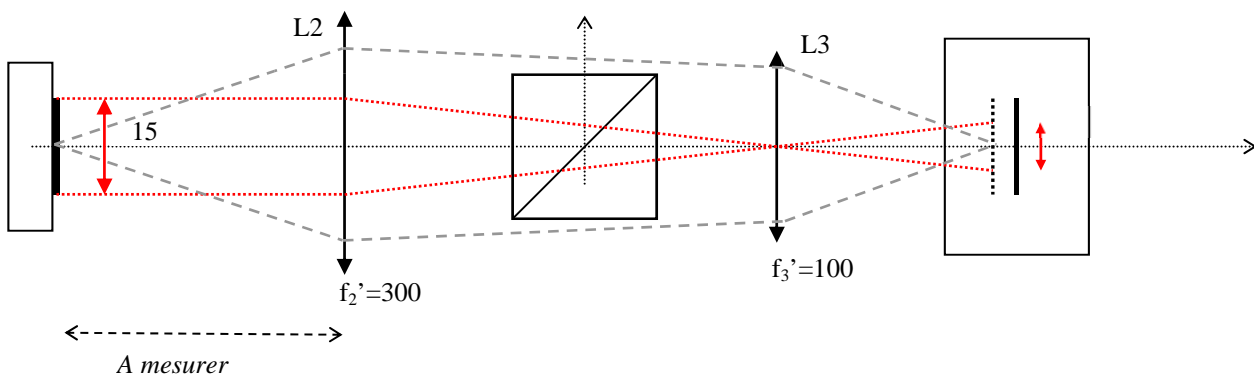


Schéma du montage

Etude et réglage de la voie d'analyse : conjugaison pupillaire

La source ponctuelle qui jouera le rôle d' « étoile guide » est l'extrémité d'une fibre monomode injectée par une diode laser à 670 nm.

- ☞ 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.
- ☞ Etudier les différents éléments et vérifier leur position.
- ☞ Noter bien que l'HASO mesure un front d'onde divergent. Le terme de courbure et de tilt de la surface d'onde sera systématiquement soustrait pour ne s'intéresser qu'au défaut du front d'onde.
- ☞ Vérifier que la pupille du système complet est le miroir déformable, MIRA0.

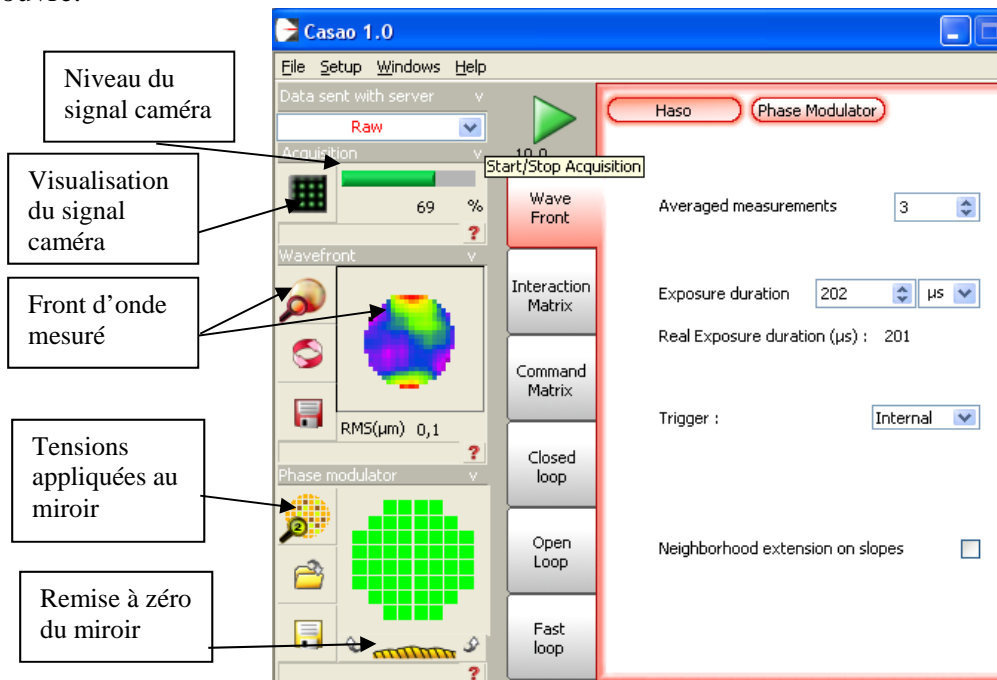




Le diamètre du miroir déformable est 15 mm, alors que la matrice de microlentilles de l'analyseur de front d'onde est un carré de 5 par 5 mm.

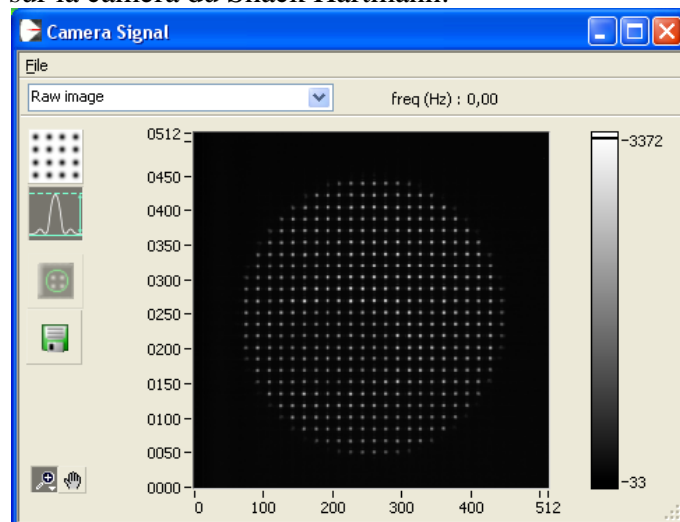
Le système optique constitué par les 2 Clairaut L_2 et L_3 doit conjuguer le miroir déformable et l'analyseur de front d'onde (en dimension et en position).


Q1 : Expliquer pourquoi cette conjugaison est nécessaire. Dans le cas contraire, que se passe-t-il si l'on applique un tilt important au miroir déformable ? Faites un schéma pour répondre clairement à cette question. En particulier, expliquer le rôle des lentilles L_2 et L_3 .

☞ Allumer les alimentations du miroir et de l'HASO, puis lancer le logiciel CASAO. Après avoir cliqué sur OK sans rien modifier dans la fenêtre « session setup », la fenêtre principale suivante s'ouvre.



☞ Lorsque le système optique est bien réglé, en cliquant sur le bouton  puis , vous devez obtenir l'image suivante sur la caméra du Shack Hartmann:



☞ Lancer l'acquisition avec le bouton Play , et régler l'alimentation de la diode laser pour obtenir un niveau de signal suffisant, mais non saturé.

☞ Centrer la pupille sur l'HASO.

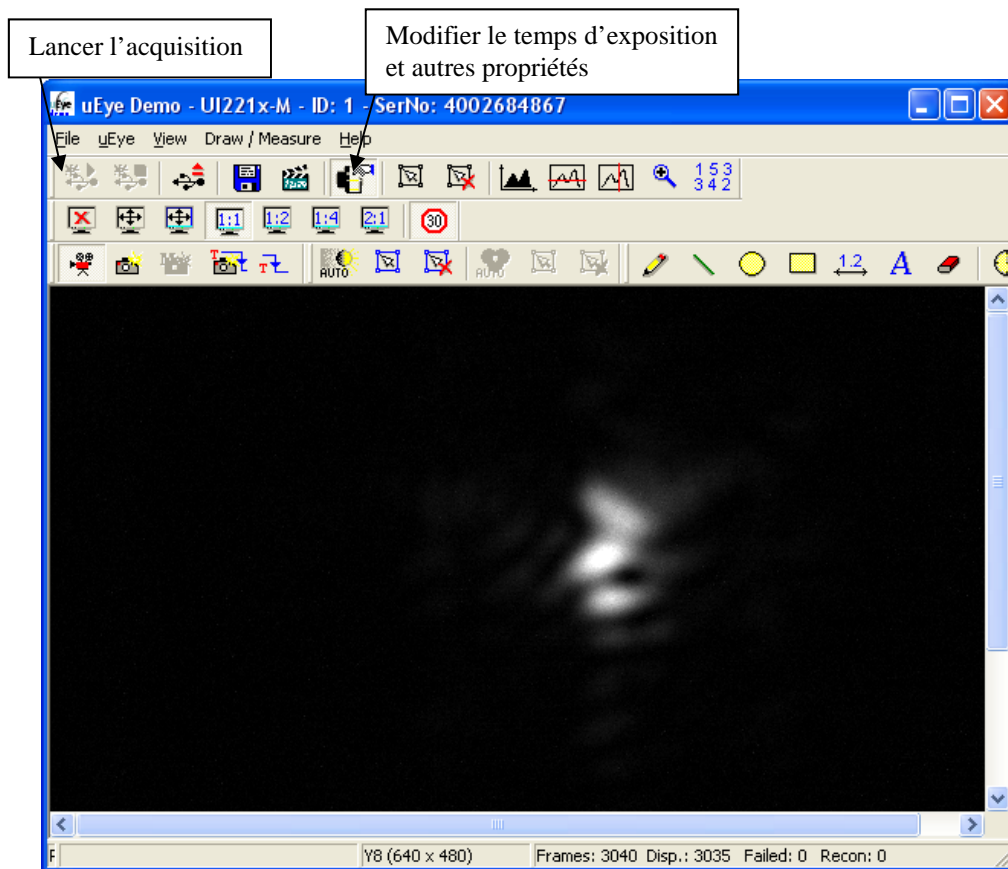
☞ En pivotant **très** légèrement le miroir déformable, vérifier que les taches images se déplacent, mais pas la pupille dans son ensemble.

Q2 : Expliquer pourquoi on vérifie ainsi la qualité de la conjugaison entre le miroir déformable et l'HASO ?

Etude de l'analyseur de front d'onde

Le défaut du front d'onde obtenu est essentiellement dû à la forme du miroir déformable, lorsqu'on n'applique aucune tension. On peut, sur la voie étude de la « tache image », observer l'effet de ce défaut sur la tache image.

☞ Lancer le logiciel uEye qui pilote la caméra USB.



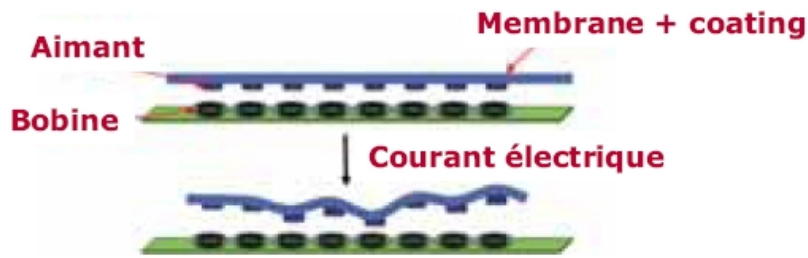
☞ Régler la position de l'objectif de microscope et le temps d'exposition pour obtenir la PSF dans le plan de meilleure mise au point.

Le logiciel CASAO lance en parallèle le logiciel HASO qui permet de faire à partir de la mesure du front d'onde les calculs habituels : décomposition sur les polynômes de Zernike, calcul de la PSF et FTM.

Q3 : Vérifier que le logiciel HASO mesure le même défaut de front d'onde. Quel est le coefficient le plus important dans la décomposition du front d'onde sur les polynômes de Zernike ? Cela est-il en accord avec la forme de la PSF obtenue sur la caméra uEye. Comparer la tache image obtenue sur la caméra uEye et la PSF calculée par le logiciel HASO. Relever le rapport de Strehl et l'allure de la FTM.

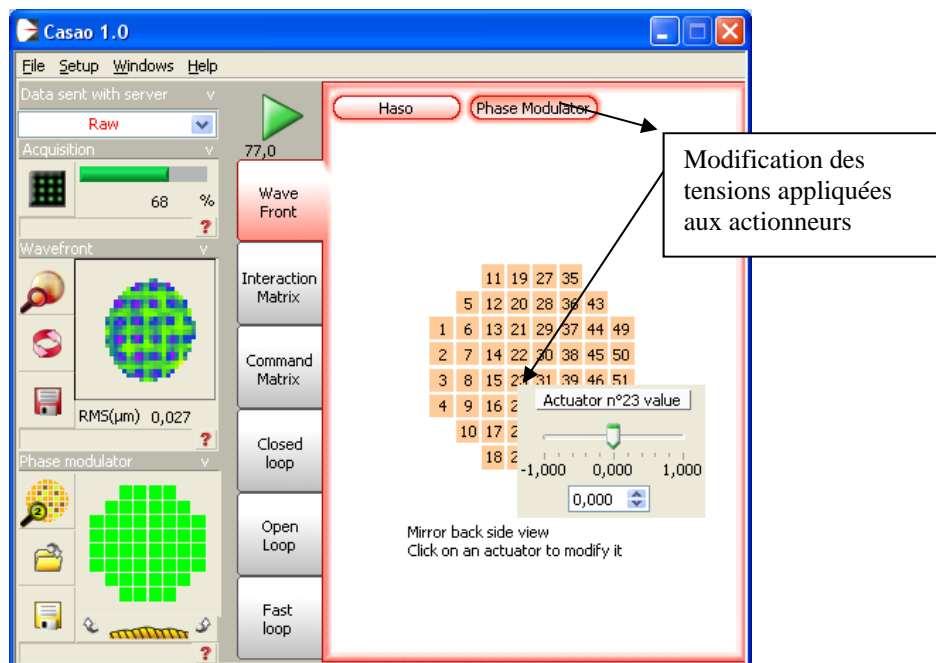
Etude du miroir déformable

Le miroir Mirao est un miroir magnétique. De petits aimants collés à l'arrière du miroir sont attirés ou repoussés par des solénoïdes.



Principe d'un miroir déformable magnétique

☞ Le bouton « Phase Modulator » permet d'ouvrir la fenêtre suivante qui montre la position des actionneurs.



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

Q4 : Quel est le défaut du front d'onde résiduel quand tous les actionneurs sont remis à zéro (mise à zéro du miroir) ?

☞ Il est possible d'enregistrer ce défaut comme front d'onde de référence et d'effectuer une mesure relative par rapport à cette référence.

Expliquer pourquoi ce défaut n'est pas gênant dans un montage d'optique adaptative.

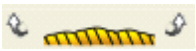
Q5 : Vérifier la linéarité du miroir déformable en fonction de la commande d'un actionneur : étudier la variation du défaut de front d'onde pour différentes consignes appliquées à un actionneur donné. Préciser le domaine de linéarité de l'actionneur.

Q6 : Expliquer ce qu'est le couplage entre les différents actionneurs pour un miroir déformable. Quelle est ici sa valeur ? Quel est l'intérêt d'avoir du couplage sur un miroir déformable ?

Q7 : Quel est le défaut maximum, provoqué par cet actionneur, mesurable avec l'HASO 32 ? Expliquer d'où provient cette limitation.

☞ On appelle « fonction d'influence » la déformation du front d'onde (donc de la surface du miroir) induite par un actionneur pour une valeur nominale de tension.

Q8 : Que faudrait-il faire pour vérifier la linéarité du système global ? Illustrer par un exemple en utilisant deux actionneurs voisins situés dans la partie centrale du miroir : observer successivement les fonctions d'influence, puis simultanément. Dans les deux cas, visualiser le signal caméra, le front d'onde mesuré et la tache image. Conclure sur la linéarité associée à ces deux actionneurs et sur la linéarité du système global.

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

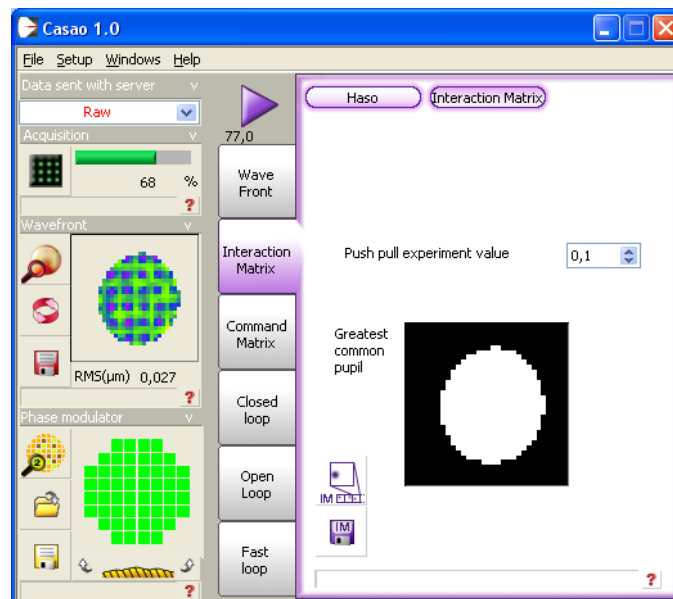
Q9 : Le miroir présente-t-il de l'hystérésis ? Si oui, essayer de le mesurer.

Q10 : Les défauts de linéarité et d'hystérésis sont-ils gênants pour une utilisation en boucle fermée ?

Construction de la matrice d'interaction I_M

Le but de cette étape de calibration (ou d'apprentissage) est de chercher à déterminer les tensions à appliquer au miroir pour compenser les déplacements des taches images des microlentilles dus à une perturbation du front d'onde. Pour cela, on procède de façon inverse : on applique des commandes connues sur chaque actionneur, puis on calcule et on mémorise dans la *matrice d'interaction* I_M les déplacements des taches du Shack-Hartmann.

☞ La construction de la matrice d'interaction est effectuée dans l'onglet « Interaction Matrix » et lancée par le bouton Play.



Le logiciel pilote les actionneurs un par un, en les poussant, puis en les tirant (*Push/Pull experiment*). Pour chacun des actionneurs, on calcule le déplacement des taches images entre ces deux commandes. Ainsi, pour chaque actionneur, j_{act} , on obtient un vecteur $[\dots, \Delta G_{i,x}, \Delta G_{i,y}, \dots]$ pour i variant de 1 à $N_{sous-pupilles}$, nombre de taches du Shack-Hartmann dans la pupille. Ce vecteur de 400 lignes environ est la $j_{act}^{ème}$ colonne de la matrice d'interaction, \mathbf{I}_M . La matrice d'interaction, \mathbf{I}_M , est donc une matrice rectangulaire de 52 colonnes par environ 400 lignes ($2 \times N_{sous-pupilles}$). Le logiciel calcule aussi les 52 fonctions d'influence des 52 actionneurs du miroir. Leur visualisation est obtenue en ouvrant la fenêtre « Interaction Matrix ».

Q11 : Commenter l'allure et l'amplitude relative de ces fonctions d'influence. Décrire précisément la procédure utilisée pour leur calcul et expliquer l'intérêt de cette procédure. Pourquoi les fonctions d'influence nous informent-elles sur la disposition des actionneurs et sur leur réponse ? Que peut-on dire du couplage

Calcul de la matrice de commande

L'asservissement le plus simple du système d'optique adaptative implique la résolution du problème inverse : On mesure le vecteur des déplacements, provoqués par un front d'onde perturbé, des taches images par rapport à la consigne, c'est-à-dire : $\Delta \vec{G}_{xy} = \vec{G}_{xy_consigne} - \vec{G}_{xy}$. On doit ensuite calculer les tensions à appliquer au miroir déformable pour compenser le mieux possible ces déplacements. Résoudre ce problème peut se faire en passant par une décomposition en valeurs singulières (SVD, *Singular Value Decomposition*) de la matrice d'interaction. Les valeurs singulières peuvent être tronquées (TSVD, *Truncated SVD*) pour améliorer le conditionnement de la matrice avant de procéder à la pseudo-inversion.

La matrice d'interaction \mathbf{I}_M (qui est donc rectangulaire) peut être décomposée en un produit de 3 matrices :

$$\mathbf{I}_M = \mathbf{U} \cdot \mathbf{W} \cdot \mathbf{V}^T$$

avec : \mathbf{U} matrice réelle **orthogonale** $400_{environ} \times 52$,

\mathbf{W} matrice réelle **diagonale** 52×52 ,

\mathbf{V} matrice réelle **orthogonale** 52×52 . (Le symbole T indique la transposition).

Les éléments diagonaux de la matrice \mathbf{W} , toujours réels et positifs, sont appelés les **valeurs singulières** de la matrice d'interaction. Les matrices \mathbf{U} et \mathbf{V} étant **orthogonales**, cette décomposition permet de calculer la matrice $52 \times 400_{environ}$ appelée le *pseudo-inverse* de la matrice d'interaction :

$$\mathbf{P} = \mathbf{V} \cdot \mathbf{W}^{-1} \cdot \mathbf{U}^T$$

où \mathbf{W}^{-1} est la matrice diagonale constituée des inverses des valeurs singulières. L'intérêt du pseudo-inverse de la matrice d'interaction est qu'il permet de déterminer un vecteur de tensions,

$\vec{V}_{act} = \mathbf{P} \cdot \Delta \vec{G}_{xy}$, **solution du problème au sens des moindres carrés**, c'est à dire vérifiant :

$$\left\| \Delta \vec{G}_{xy} - \mathbf{I}_M \cdot \vec{V}_{act} \right\| \text{ est minimale et la norme } \left\| \vec{V}_{act} \right\| \text{ est minimale.}$$

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 singulières indique l'existence d'une combinaison de tensions (ou *mode de commande* du miroir déformable) ayant un effet faible, voire négligeable, sur les déplacements des barycentres.



La matrice \mathbf{I}_M présente toujours plusieurs valeurs singulières de ce type. Par exemple, si on applique la même tension sur tous les actionneurs, on obtient un mode appelé « mode piston » : le miroir ne fait que se translater dans son ensemble. Un tel déplacement ne peut effectivement pas être mesuré par le dispositif de Shack-Hartmann et n'a par ailleurs aucune influence sur la qualité de l'image.

Prendre en compte une valeur singulière trop faible est une source de problème, puisque dans la matrice diagonale « \mathbf{W}^{-1} » la valeur correspondante devient énorme (mauvais conditionnement), entraînant rapidement la saturation des actionneurs et donc l'échec complet de la correction.

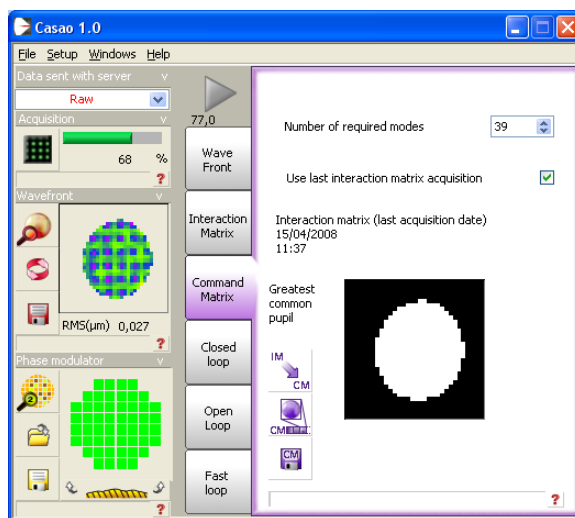
La solution consiste à filtrer ces valeurs, c'est-à-dire à les remplacer par des **zéros** dans la diagonale de « \mathbf{W}^{-1} ». Pour l'asservissement, on utilisera donc, comme matrice de commande, la matrice *pseudo-inverse régularisée*, \mathbf{P}^* , définie par:


$$\mathbf{C} = \mathbf{P}^* = \mathbf{V} \cdot (\mathbf{W}^{-1}_{\text{filtrée}}) \cdot \mathbf{U}^T$$

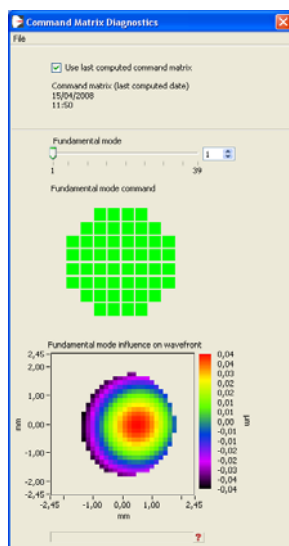
Le choix du nombre de modes filtrés est un compromis entre deux propriétés qui s'opposent : la stabilité de l'asservissement et la qualité de la correction.

☞ Le calcul de la matrice de commande est obtenu dans l'onglet « Command Matrix » en utilisant le bouton  . On choisit le nombre de modes filtrés par l'entrée «Number of required modes ».

☞ Dans un premier temps, choisissez de garder les 52 modes.



☞ Utiliser, pour visualiser la forme de ces modes, le bouton  qui ouvre la fenêtre suivante :



Q12 : Expliquer clairement comment sont calculés ces modes à partir de la décomposition en valeurs singulières de la matrice d'interaction.

Q13 : Identifier les premiers modes en termes de fronts d'onde d'aberration. Proposer une explication de leur allure bien spécifique.

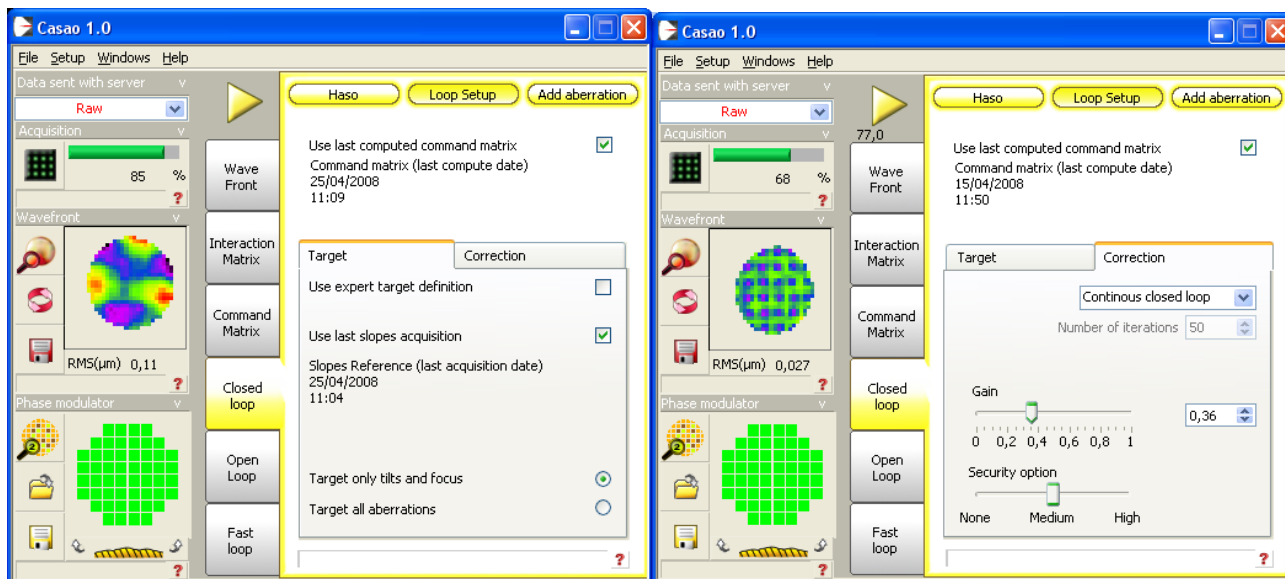
Q14 : Observer les modes les plus élevés qui correspondent aux valeurs singulières de la matrice d'interaction les plus faibles. Constaté qu'ils correspondent à des tensions appliquées aux actionneurs très élevées (la couleur des actionneurs indique les tensions relatives appliquées).

Q15 : Combien de modes choisirez-vous de filtrer ?

☞ Recalculer la matrice de commande en filtrant ces modes.

Fonctionnement en boucle fermée

☞ Passer maintenant à l'onglet suivant, « Closed loop ». Puis régler les paramètres de l'asservissement par le bouton « Loop Setup ».



Onglet Consigne ou « Target » : La consigne de l'asservissement est en principe le vecteur $\vec{G}_{xy_consigne}$ des positions des taches images sur l'HASO correspondant à un front d'onde parfaitement sphérique.

☞ Dans l'onglet « Target », on choisit comme consigne le dernier front d'onde mesuré par l'onglet « Wave Front », dont on a soustrait toutes les aberrations (on ne garde que les termes de focus et de tip et tilt du front d'onde mesuré par l'HASO).

Q16 : Dans la configuration actuelle du banc, pourquoi la consigne d'asservissement est-elle un front sphérique et non un front d'onde plan, correspondant à une consigne nulle $\vec{G}_{xy_consigne} = \vec{0}$? Proposer une modification de la configuration optique qui permettrait d'utiliser une consigne nulle. Quels seraient les avantages et les défauts de cette configuration ?

Onglet « Correction » : Le *gain* règle l'amplitude de la correction. La matrice effectivement utilisée dans la boucle d'asservissement est donc la matrice de commande **C** multiplié par le *Gain*. Si le gain est réglé à 1, les tensions 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 d'être instable.

On va maintenant chercher à corriger au mieux 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 ; on obtient un vecteur déplacement :

$$\Delta \vec{G}_{xy} = \vec{G}_{xy_consigne} - \vec{G}_{xy}$$

III. calcul du produit de ce vecteur par la matrice de commande $\mathbf{C} = \mathbf{V} \cdot (\mathbf{W}^{-1}_{filtrée}) \cdot \mathbf{U}^T$ et multiplié par le gain choisi :

$$\Delta \vec{V}_{act} = Gain \cdot \mathbf{C} \cdot \Delta \vec{G}_{xy}$$

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

$$\vec{V}_{act_Nouveau} = \vec{V}_{act_Précédent} + \Delta \vec{V}_{act}$$

Q17 : En écrivant l'équation de mise à jour des tensions en fonction du temps discret, expliquer pourquoi il s'agit d'un asservissement de type « intégrateur pur ».

☞ Lancer l'asservissement et observer simultanément l'amélioration de la tache image sur la caméra uEye et le défaut du front d'onde.

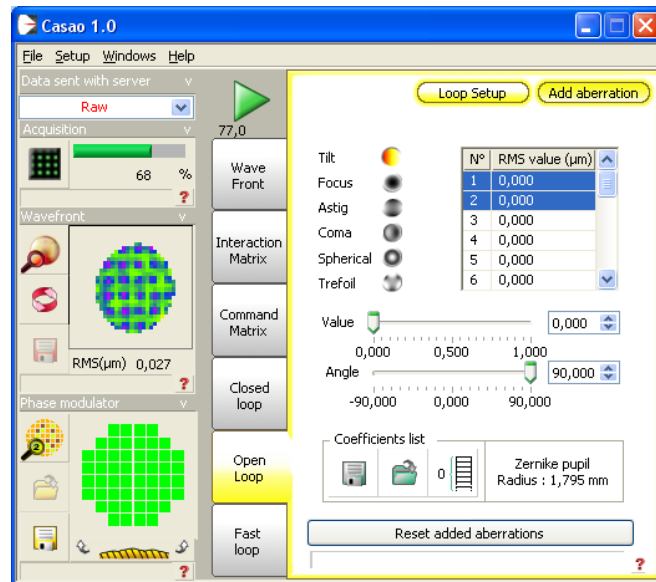
Q18 : À l'aide du logiciel HASO, mesurer le défaut du front d'onde résiduel en boucle fermée. Etudier la PSF et relever le rapport de Strehl et l'allure de la FTM.

Fonctionnement en boucle fermée

Consigne : front d'onde aberrant

☞ En utilisant l'onglet « Add aberration », 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 polynôme de Zernike.

Q19 : Observer sur la tache image et sur le front d'onde, l'effet d'un tilt, d'un défocus, d'une coma. Commenter la qualité des résultats obtenus.



Correction en temps réel d'une perturbation

On va maintenant chercher à corriger au mieux, en temps réel, une perturbation variable du front d'onde. Cette perturbation est réalisée par une lame de verre de très mauvaise qualité tournant lentement sur le trajet de la lumière provenant de la source.

☞ En utilisant l'onglet « Fast loop », la boucle d'asservissement est beaucoup plus rapide car les informations concernant le front d'onde et le miroir sont rafraîchies moins souvent (*diagnostics period* : 1 s, par exemple).

☞ Bien comprendre la différence de fonctionnement entre « Closed loop » et « Fast loop »



☞ La fréquence de la boucle d'asservissement est affichée sous l'icône : 77,0 = 77 Hz..

☞ Lancer la boucle d'asservissement et observer la stabilité en modifiant le gain.

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

☞ Placer délicatement la lame de verre qui joue le rôle de perturbation du front d'onde dans le faisceau et 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 l'HASO, puis lancer l'asservissement et observer l'amélioration de la tache image : **MAGIQUE !!**

☞ Augmenter progressivement la vitesse du moteur. Noter le décrochement de l'asservissement.

Q20 : Quelles sont la période et la fréquence d'échantillonnage de l'asservissement ?

Q21 : Expliquer ce que représente la bande passante de correction d'un asservissement. Quelle est approximativement, à votre avis, la bande passante de correction de cet asservissement ? Expliquer (sans faire de calcul).

Q22 : Pourquoi, même quand le moteur tourne très lentement, la correction n'est-elle pas parfaite ?

Correction en temps réel d'une perturbation sur un objet étendu

- ☞ Stopper le moteur qui fait tourner lame de verre.
- ☞ Remettre à zéros les actionneurs du miroir déformable.
- ☞ Eclairer l'objet test par la diode électroluminescente blanche et déplacer la caméra USB sur la voie d'imagerie grand champ. Deux objets sont possibles : une lame opaline blanche sur laquelle sont gravés des motifs ou des réticules de petite taille ou une lame de microscope aluminée (qui simule très bien un « ciel étoilé »)
- ☞ Il faudra sans doute augmenter le temps d'exposition de la caméra et régler la mise au point.
- ☞ 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 !!

Q23 : 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	±1V max in each actuator sum of positive voltages < 18V sum of negative voltages > -18V
Coating	Protected silver
Reflectivity	>95% in [410nm, 560nm] >98% in [560nm, 800nm]
Max. admitted light power in continuous mode	5W/cm ²
Bandwidth	>200Hz
Hysteresis	< 2%
Linearity	> 95%
Surface quality in active flat configuration	0.006µm RMS
Wavefront quality in active flat configuration	0.012µm RMS
Zernike Wavefront range	Defocus 35µm PV Astigmatism 30µm PV Coma 10µm PV Trefoil 25µm PV Spherical aberr 08µm PV 4th order astigm 08µm PV

Annexe 2 : Spécifications de l'analyseur de front d'onde Shack-Hartman
HASO 32

Dimension de la pupille d'analyse	5*5 mm²
Nombre de sous-pupilles pour l'analyse	32*32
Dynamique de mesure du tilt	> ± 3° (520 lambda)
Dynamique de mesure de la courbure	± 0.025 m à 0.08 m (200 lambda)
Répétabilité (RMS)	< lambda/200
Exactitude de mesure en mode absolu du front d'onde RMS	~ lambda/100
Exactitude de mesure en mode relatif du front d'onde RMS	~ lambda/150
Sensibilité de mesure du tilt RMS	3 µrad
Sensibilité de mesure de la courbure RMS	0.001 m
Résolution spatiale	~160 µm
Fréquence d'acquisition max	77 Hz
Fréquence de traitement (selon config)	4-30 Hz
Longueur d'onde de fonctionnement	350-1100 nm

