

heig-vd

Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion  
du Canton de Vaud

---

Banc de démonstration d'optique  
adaptative  
Travail de diplôme

---

Auteur : Gabriel Mühlebach  
Professeur : François Wildi  
Classe : MIM2006

# Table des matières

Résumé	5
Cahier des charges	6
Introduction	8
<b>1 Design optique</b>	<b>15</b>
1.1 Les sources . . . . .	15
1.1.1 Le champ évanescent . . . . .	16
1.1.2 Interfaçage des sources . . . . .	19
1.2 Montage afocal . . . . .	21
1.3 Voie scientifique webcam . . . . .	22
1.4 Résultats obtenus . . . . .	24
1.4.1 Collimateur . . . . .	25
1.4.2 Afocal . . . . .	25
1.4.3 Webcam . . . . .	26
<b>2 Les reconstituteurs</b>	<b>29</b>
2.1 Reconstituteur modal . . . . .	29
2.2 Reconstituteur zonal . . . . .	31
<b>3 Régulation du DM52</b>	<b>32</b>
3.1 Actuateurs . . . . .	32
3.1.1 Gain d'actuateur trop élevé . . . . .	32
3.1.2 Non linéaire et non stationnaire . . . . .	34
3.1.3 Effet non stationnaire . . . . .	34
3.2 Résultats de la régulation . . . . .	36

---

<b>4 Algorithmes et GUI</b>	<b>39</b>
4.1 Centroides . . . . .	39
4.2 Utilisation de la GUI . . . . .	39
<b>Conclusion</b>	<b>45</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>47</b>
<b>Remerciements</b>	<b>48</b>
<b>Annexes A1 : Code Matlab</b>	<b>49</b>
<b>Annexes A2 : Liste de pièces</b>	<b>50</b>
<b>Annexes A.3 : Mises en plan</b>	<b>51</b>
<b>Annexes A.4 : CD comprenant toute les données</b>	<b>52</b>

# Table des figures

1	Principe de la boucle de régulation . . . . .	8
2	Résultats de correction en OA . . . . .	9
3	Figure d'Airy . . . . .	10
4	PSF d'une tache de diffraction . . . . .	10
5	Principe de fonctionnement du Shack-Hartmann . .	12
6	Centroides et intégration . . . . .	13
7	Schéma fonctionnel . . . . .	14
8	Schéma optique . . . . .	14
1.1	Calculs Matlab vérifiant la ponctualité de la source .	17
1.2	Zoom sur un centroïde et taches de diffraction . . .	18
1.3	Circuit driver laser (modified data-sheet) . . . . .	19
1.4	Circuit sécurité des personnes . . . . .	20
1.5	Exemple sous Zemax d'un montage afocal . . . . .	21
1.6	Geométrie de Fried . . . . .	21
1.7	Respect de la collimation . . . . .	22
1.8	Image du DM52 sur le Shack-Hartmann . . . . .	22
1.9	Schéma Zemax de l'optique de la webcam . . . . .	23
1.10	Sans la lentille pour allonger la focale . . . . .	24
1.11	Avec la lentille pour allonger la focale . . . . .	24
1.12	Surface d'onde du collimateur . . . . .	25
1.13	Geométrie de Fried (couleurs inversées pour l'impres- sion) . . . . .	26
1.14	Avec et sans lentille négative . . . . .	27
1.15	photo du banc d'essai . . . . .	28
1.16	schéma optique . . . . .	28
2.1	Aberrations classées en mode de Zernike . . . . .	29
3.1	Actuateurs à gain trop élevé . . . . .	33

3.2	52 commandes d'actuateurs présentés dans le temps	34
3.3	10 mesures successives en actuant 10 fois le même actuateur . . . . .	35
3.4	Variance des 10 mesures successives . . . . .	36
3.5	Les Dx et Dy convergent vers la consigne . . . . .	37
3.6	Stabilisation de la commande des actuateurs . . . . .	37
3.7	Comparaison entre le miroir réglé et au repos . . . . .	38
3.8	Reconstruction du front d'onde échantillonné par le Shack-Hartmann . . . . .	38
4.1	GUI au démarrage de l'application . . . . .	40
4.2	Mode actuateur, affichage de la surface d'onde . . . . .	41
4.3	Mode actuateur, affichage centroïdes . . . . .	41
4.4	Construction du reconstructeur . . . . .	42
4.5	Régulation avec affichage des centroïdes . . . . .	43
4.6	Régulation avec affichage de la surface d'onde . . . . .	43
4.7	Réglage de la caméra Lumenera . . . . .	44

# Résumé

Ce travail consiste à réaliser un banc d'essai pour un miroir déformable. Un miroir déformable sert à corriger un front d'onde déformé en entrée afin d'en obtenir un plan à la sortie. C'est ce qu'on appelle de l'optique adaptative (OA). Ce travail comprend donc le dimensionnement optique, la conception mécanique, la conception électronique des drivers lasers ainsi que la programmation d'une interface utilisateur et de la commande du miroir. Le but final est de pouvoir faire fonctionner le système en boucle fermée.

Le dimensionnement optique a été réalisé grâce à Zemax. De ces résultats en découle la conception mécanique compatible micro-bench. Le but est d'avoir le minimum de degrés de liberté inutiles afin que le banc soit utilisable immédiatement sans devoir réaliser des alignements lors de sa mise en service. Une étoile guide a été créée grâce à une sortie de fibre dimensionnée de telle façon à ce que la source ne soit pas résolue. Une caméra industrielle a été équipée d'un senseur de front d'onde Shack-Hartmann, ce système s'appelle analyseur de surface d'onde (ASO). L'instrument scientifique est une webcam munie d'une optique dédiée. Le choix de la webcam se justifie par des raisons de coûts. Le miroir déformable est un miroir de 15 mm de pupille d'entrée et comporte 52 actuateurs.

La démonstration que la source n'est pas résolue a été faite tant par le calcul que par la mesure. A partir de cette condition, le calcul du front d'onde incident sur la caméra est possible. Les modes de chaque actuateur du miroir sont mesurés par l'ASO dans le but de réaliser une régulation basée sur un reconstruteur zonal. Un reconstruteur modal a été créé afin de mesurer les différents types d'aberration.

La régulation en boucle fermée est à présent possible et les résultats obtenus seront amplement détaillés dans ce rapport.

# Cahier des charges

## Cadre

L'optique adaptative (OA) a fait des progrès considérables ces dernières années et a permis des avancées importantes en imagerie à haute résolution en astronomie et en ophtalmologie.

Malheureusement les systèmes existants à ce jour sont complexes et onéreux. Il existe maintenant sur le marché un miroir déformable de nouvelle technologie qui devrait ouvrir l'OA à de nouvelles applications.

Bien que le miroir déformable soit l'élément clé d'un système d'OA d'ordre faible à moyen, il est difficile de se faire une idée de ses performances sans avoir un système d'OA complet avec un analyseur de surface d'onde (ASO) et un calculateur, ce qui n'est pas directement sur le marché.

## Objectifs

Voici la spécification des exigences pour le travail de diplôme.

L'étudiant devra construire et mettre au point un système d'OA de table, transportable basé sur le miroir DM52 développé au **Laboratoire d'Astronomie de l'Observatoire de Grenoble (LAOG)**.

- Le système travaillera aux longueurs d'onde visibles pour que l'utilisateur puisse mieux visualiser le trajet de la lumière.
- Il utilisera 2 sources ponctuelles pour simplifier la mesure du front d'onde et permettre de démontrer la séparation des sources à la limite de résolution.
- Il disposera de 2 voies : une pour l'analyseur de surface d'onde

- et l'autre pour la voie d'imagerie
- Il sera utilisé une caméra industrielle pour l'ASO et une webcam pour la voie visible afin de réduire les coûts
  - La taille devra être minimisée et il devra en tout cas être transportable dans une valise qui puisse voyager en bagage de soute dans un avion sans supplément de coûts.
  - Il devra supporter les voyages sans démontage ou avec un minimum de démontage
  - Il devra pouvoir être mis en oeuvre de manière rapide et simple
  - Il devra tourner en boucle fermée à 50 Hz de fréquence d'échantillonnage

## Démarche

Le concept opto-mécanique de ce banc a été élaboré au cours du travail de semestre et les pièces mécaniques du système fabriquées à l'atelier de la **HEIG-VD**.

1. Mise en oeuvre des éléments optoélectroniques (caméras, sources laser)
2. Montage et alignements des éléments opto-mécaniques
3. Etude, design et implantation de l'algorithme de contrôle de la boucle d'AO
4. Mise en oeuvre du miroir déformable
5. Mise au point de la boucle d'AO complète

L'original du cahier des charges a été signé par :

- Prof. G.Corday : chef du département Systèmes industriels et Microtechniques
- Dr F.Wildi : Professeur responsable
- G.Mühlebach : Candidat au diplôme



# Introduction

En astronomie, le but est d'obtenir une image d'un corps céleste dont la résolution est la plus élevée possible. La résolution d'un télescope est directement liée à son diamètre. Mais nous vivons dans une atmosphère qui perturbe les rayons lumineux qui arrivent sur un télescope. L'atmosphère n'est pas homogène en température, pression et vitesse de déplacement. Cela induit donc que l'indice de réfraction est variable. Ainsi, le but de l'optique adaptative est de pouvoir détecter la perturbation des rayons et de pouvoir corriger leur trajectoire par réflexion sur un miroir déformable. C'est donc une régulation en boucle fermée. Voici une figure qui illustre ce principe.

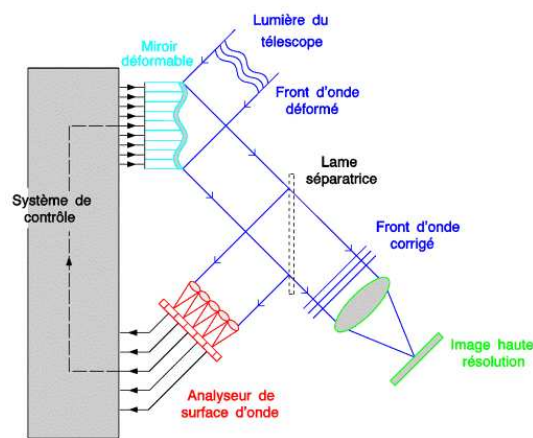


FIG. 1 – Principe de la boucle de régulation

Voici un exemple de résultat pour le moins spectaculaire que l'on peut obtenir grâce à l'optique adaptative.

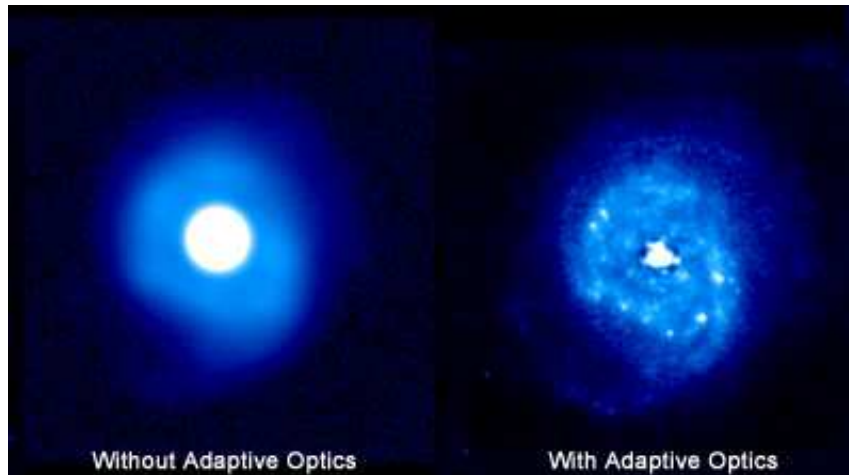


FIG. 2 – Résultats de correction en OA

Le but de ce travail est de réaliser un banc d'essai sur lequel est monté un miroir déformable. Une boucle d'optique adaptative sera donc réalisée sur le banc d'essai avec une sortie de fibre optique couplée à un laser qui servira d'étoile guide. A présent voici quelques définitions et explications de concepts essentiels à la compréhension du dimensionnement d'un tel système.

### Limite de résolution

La limite de résolution est la limite à laquelle on arrive à distinguer deux objets. Lorsque on regarde une photographie prise avec un appareil numérique, on n'arrive pas à distinguer les pixels imprimés les uns des autres. Notre oeil n'arrive pas à résoudre le pixel. En astronomie, le but est de pouvoir distinguer deux étoiles séparées faiblement angulairement. Cette notion n'est pas à confondre avec le grandissement. Lorsque on zoom sur une photo grâce à un logiciel, on augmente le grandissement mais ce n'est pas pour autant qu'on améliore la résolution, on voit donc les pixels. La figure 2 présente deux images dont le grandissement est strictement le même mais pas la résolution.

Il faut également savoir qu'un point ne s'image pas en un point mais en une figure de diffraction qui est appelée figure d'Airy à travers une ouverture circulaire.

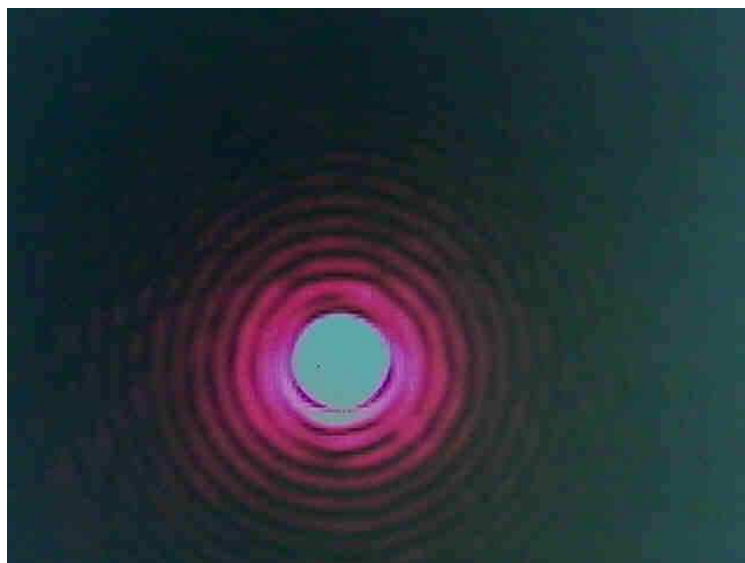


FIG. 3 – Figure d'Airy

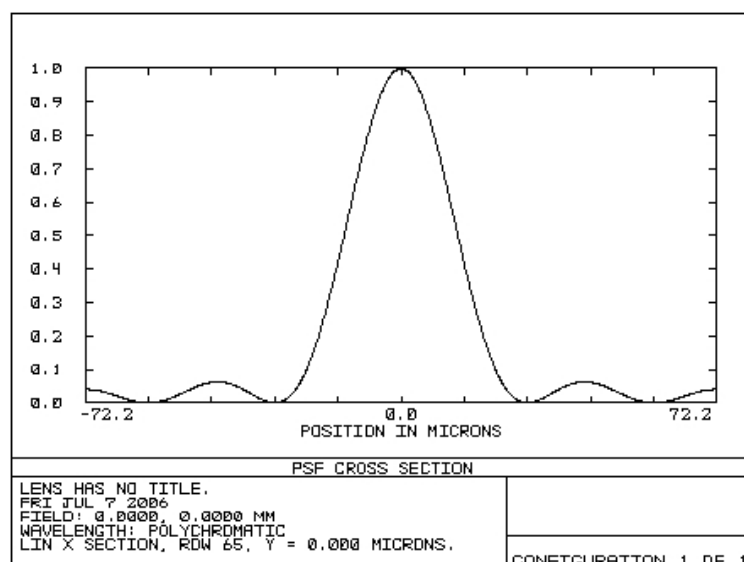


FIG. 4 – PSF d'une tache de diffraction

On distingue nettement le centre et les anneaux qui entourent le point central (image de la source sur la webcam). D'après le critère de Rayleigh, on est à la limite de résolution lorsque les maxima sont distants de  $\rho$ .  $\rho$  étant le rayon du premier zéro. Pour une ouverture circulaire :

$$\rho = 1.22 \cdot \frac{\lambda \cdot f}{D} \quad (1)$$

- $\lambda$  : longueur d'onde
- $f$  : focale du système
- $D$  : diamètre de l'ouverture

C'est seulement dans le cas théorique qu'un point va s'imager selon une figure d'Airy. Lorsque le front d'onde est perturbé, la tache d'Airy sera irrégulière et d'intensité moindre donc la limite de résolution en souffre. Voilà pourquoi on souhaite absolument corriger les fronts d'onde incidents (rayons lumineux) sur un système optique. La description de la limite de résolution a été fournie, voici l'explication de ce qu'est un front d'onde.

## Front d'onde

Par définition, un front d'onde est le lieu géométrique des points qui sont à la même phase. C'est une surface qui se propage perpendiculairement aux rayons. Donc si on mesure un front d'onde parfaitement plan, cela revient à dire qu'on mesure un faisceau de rayons lumineux parfaitement parallèles. A présent, on peut se demander pourquoi le front d'onde incident, dans un cas idéal, doit être plat. On imagine une étoile qui émet de la lumière isotropiquement (de la même façon dans toutes les directions). Le front d'onde émis de cette étoile sera sphérique. Un observateur muni d'un télescope à une distance importante de cette étoile ne percevra qu'une partie de ce front d'onde. Etant donné la distance et la portion infinitésimale du front d'onde perçue, celui-ci apparaîtra comme étant plan. Autrement dit, les rayons incidents sur le télescope sont tous parallèles dans un cas idéal. Mais comme dit précédemment, l'atmosphère perturbe le trajet de la lumière et il faut corriger la surface d'onde non plane en une surface plane. Quand le front d'onde est plan, les rayons sont parallèles, on parle alors de faisceau collimaté. Dans une boucle d'optique adaptative il est vital de connaître la surface d'onde incidente sur l'objet scientifique utilisé. Voici l'explication du fonctionnement d'un analyseur de surface d'onde (ASO).

## Analyseur de surface d'onde

L'analyse de surface d'onde (ASO) fournit l'information essentielle dans la boucle d'optique adaptative. Si un objet est à l'infini, il va s'imager sur le point focal de la lentille. Si l'objet est décalé d'un angle  $\alpha$  par rapport à l'axe optique, il va s'imager sous le même angle.

L'analyseur de surface d'onde est basé sur un Shack-Hartmann qui est une matrice de microlentilles. Le front d'onde incident sur le Shack-Hartmann est échantillonné spatialement d'après la taille des microlentilles. Chaque échantillon du front d'onde incident va donc s'imager sur le plan focal en un point qui sera décalé de son centre selon son angle d'incidence. L'image se fait sur la caméra Lumenera, caméra industrielle. Voici une figure qui illustre bien le principe d'un senseur Shack-Hartmann.

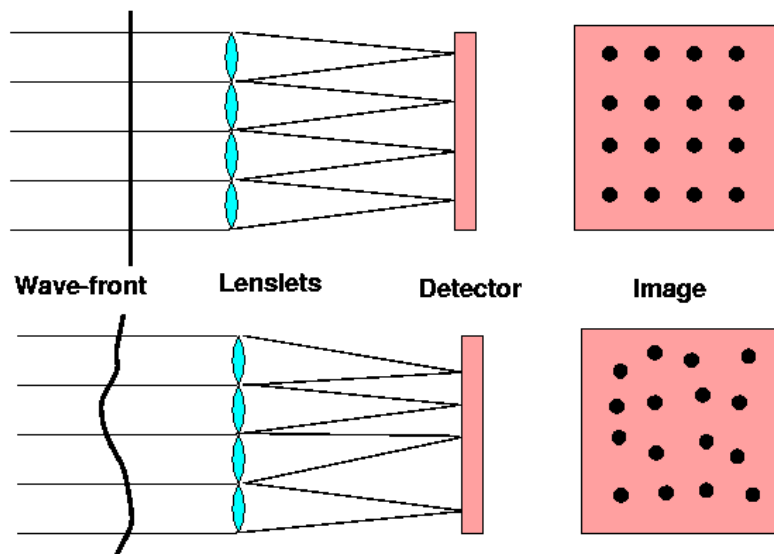


FIG. 5 – Principe de fonctionnement du Shack-Hartmann

Le décalage des centroïdes par rapport à l'axe optique des microlentilles représente la dérivée du front d'onde incident à cet endroit. On peut reconstituer la forme du front d'onde en intégrant cette information.

Mais le but est de pouvoir corriger le front d'onde incident donc il suffit de réguler le système de telle façon à annuler les écarts des

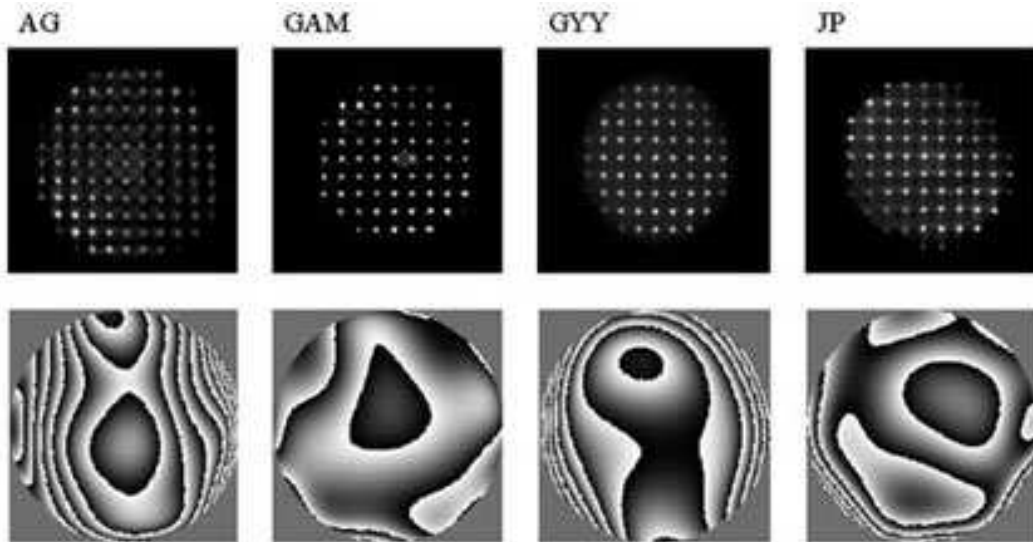


FIG. 6 – Centroides et intégration

centroïdes. C'est pourquoi une caméra industrielle est placée sur le plan focal du Shack-Hartmann.

### Voie scientifique

Pour la voie scientifique, une webcam a été démontée et son optique a été réalisée. Effectivement si on se réfère à l'équation 1, on se rend compte que le rayon du premier zéro en fonction de la taille de l'ouverture et de la longueur d'onde utilisée (resp.  $D=15$  mm  $\lambda = 660$  nm) est de  $1 \mu\text{m}$ . C'est inférieur à la taille du pixel supposée être comprise entre  $5 \mu\text{m}$  et  $20 \mu\text{m}$  pour la majorité des webcams. La focale a donc été rallongée afin de pouvoir échantillonner correctement la tache d'Airy.

Les principes essentiels à la compréhension du développement de ce projet ont été énoncés. A présent voici plus de détail sur chaque élément du projet en commençant par les sources puis en descendant de plus en plus dans le système optique. Après quoi, des explications sur la théorie de la reconstruction et du principe de régulation seront données. Le fonctionnement de certains algorithmes seront développés. Au final, les résultats de la régulation en boucle fermée seront présentés. Voici le schéma fonctionnel du système qui va être décrit ainsi que le schéma optique.

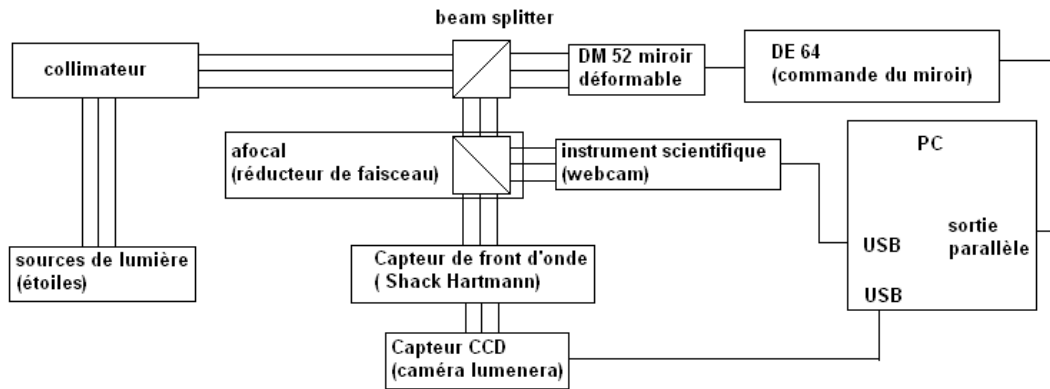


FIG. 7 – Schéma fonctionnel

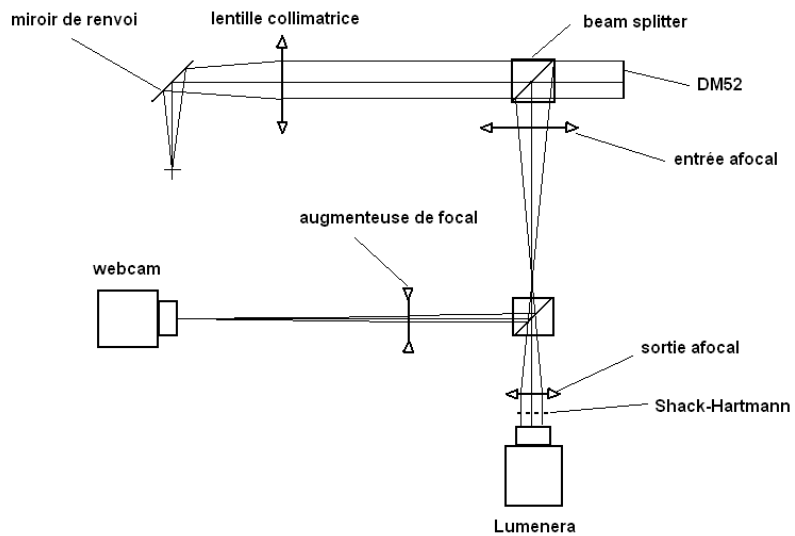


FIG. 8 – Schéma optique

# Chapitre 1

## Design optique

### 1.1 Les sources

Deux sources seront utilisées, l'une servant d'étoile guide, l'autre servant d'objet. Elles ont respectivement pour longueur d'onde  $\lambda_1 = 670$  nm et  $\lambda_2 = 635$  nm. L'intérêt se porte essentiellement sur l'étoile guide.

Une étoile guide est simulée grâce à un laser couplé sur une fibre optique. Afin de simuler l'étoile, considérons deux choses. La première est que cette étoile est sensée se trouver à l'infini. Une lentille qui renvoie l'image de la source (sortie de fibre) à l'infini doit être positionnée. Comme étant à l'infini, la source envoie un front d'onde plan sur l'instrument scientifique (rayons parallèles). La source est donc collimatée par la lentille dite collimatrice. Plus précisément, la source doit se trouver sur le plan focal de la lentille collimatrice. Le deuxième point important, est que la source ne doit pas être résolue par l'instrument scientifique ni par l'analyseur de surface d'onde (ASO) donc elle doit être ponctuelle. Ainsi il est donc important de choisir un diamètre de fibre le plus petit possible. La réponse impulsionnelle (spatiale évidemment) à travers une ouverture circulaire est la tache de diffraction d'Airy qui n'est autre que la fonction de transfert du système. Il suffit de connaître le champ de la source, qui ne se limite pas au noyau de fibre, et d'en faire le produit de convolution par rapport au système qui nous intéresse. Si le champ de la fibre optique se rapproche d'un Dirac (spatial), la réponse à ce champ sera une tache d'Airy et on pourra affirmer que la source est bien ponctuelle.



### 1.1.1 Le champ évanescent

La source a été décrite comme étant idéalement ponctuelle or ce n'est pas le cas. Des diodes lasers couplées sur fibre optique mono-mode de  $3.8 \mu\text{m}$  de diamètre de noyau sont utilisées. Déjà ici on se rend compte que la source n'est pas ponctuelle. De plus il existe la présence d'un champ évanescent. Autrement dit le champ d'observation n'est pas de  $3.8 \mu\text{m}$  mais il est plus grand. Voici donc le calcul du champ de la fibre optique.

$$I(r) = I_0 \cdot e^{\frac{-2r^2}{\omega_0^2}} \quad (1.1)$$

$\omega_0$  : semi diamètre de mode

Or d'après l'approximation de Marcuse :

$$\frac{\omega_0}{a} = 0.65 + 1.619V^{-\frac{3}{2}} + 2.879V^{-6} \quad (1.2)$$

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda_0} \cdot ON$$

$a$  : rayon du coeur de la fibre

$$ON = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad n_1 : \text{indice coeur}, \quad n_2 : \text{indice gaine}$$

De ces quelques équations, on détermine précisément le champ de sortie de fibre. A présent, afin de prouver que le champ de sortie de fibre est bien ponctuel, le produit de convolution de celui-ci avec la figure d'Airy doit être effectué (importation de points sous Zemax pour une lentille paraxiale de 300 mm de focale et 15 mm de diamètre).

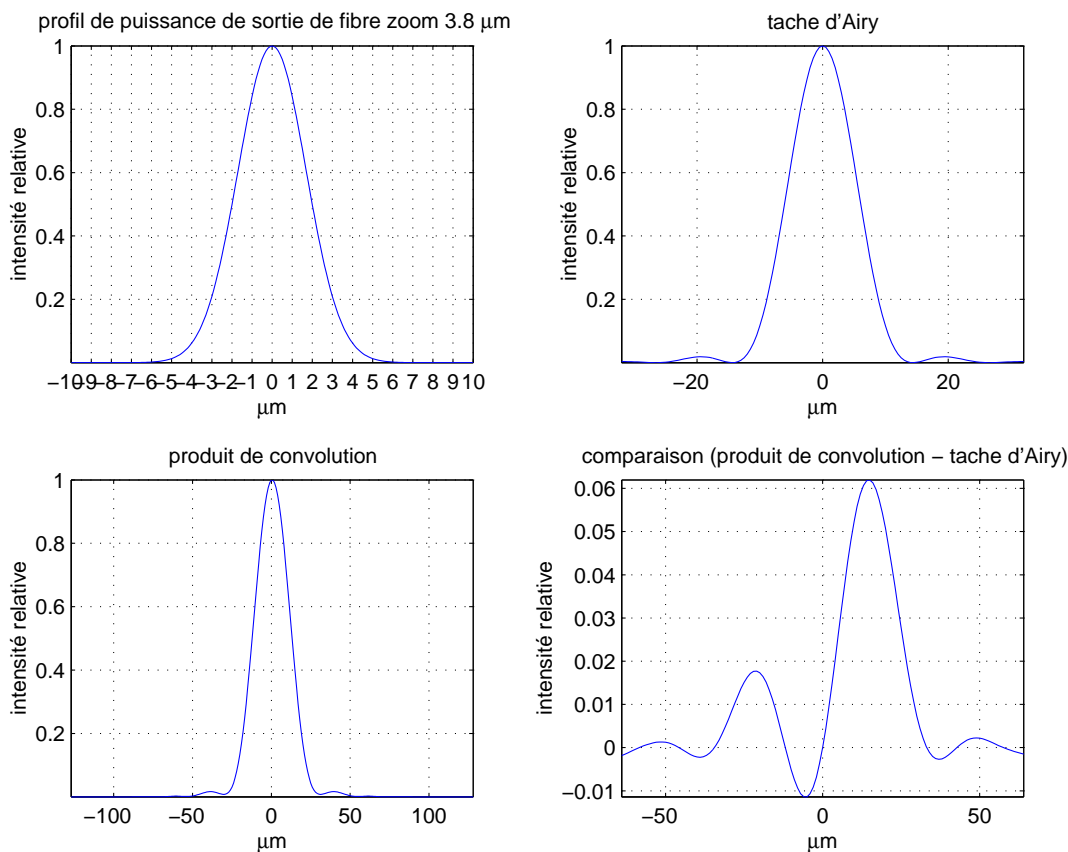


FIG. 1.1 – Calculs Matlab vérifiant la ponctualité de la source

Par le calcul, il a été démontré que le source est ponctuelle en utilisant une lentille de 300mm de focale et une fibre de  $3.8\mu\text{m}$  de diamètre de coeur. A présent, voici une mesure qui permet de vérifier si la source est bien ponctuelle.

Durant la phase de développement, un Shack-Hartmann (focale : 40 mm, microlentille :  $300\mu\text{m}$ ) a été employé. Par une ouverture carrée de côté  $D$  et selon l'un des axes  $x$  ou  $y$ , les minima de diffraction s'observeront en :

$$\sin\theta_k = k \cdot \frac{\lambda}{D} \quad (1.3)$$

pour  $k = 1$  et en approximant  $\sin\theta_k \cong \theta_k$  (petits angles), on obtient :

$$\theta_1 = \frac{\lambda}{D} \quad (1.4)$$

Si on nomme  $R_0$  la distance entre le maxima et le premier minima,

on a :

$$\theta_1 = \frac{R_0}{f} \quad (1.5)$$

En combinant ces deux dernières équations, on obtient donc :

$$R_0 = f \cdot \frac{\lambda}{D} = 89\mu m \approx \quad (1.6)$$

De plus la taille des pixels de la caméra utilisée est connue :  $L_p = 7.4 \mu m$ . Pour la mesure de la taille de la tache d'Airy, on compte le nombre de pixel au travers d'un centroïde et on compare cette valeur à ce qui a été calculé théoriquement. On voit donc qu'il faut qu'il y ait 12 pixels entre le maximum et le premier minimum. Voici une image prise avec la caméra lumenera :

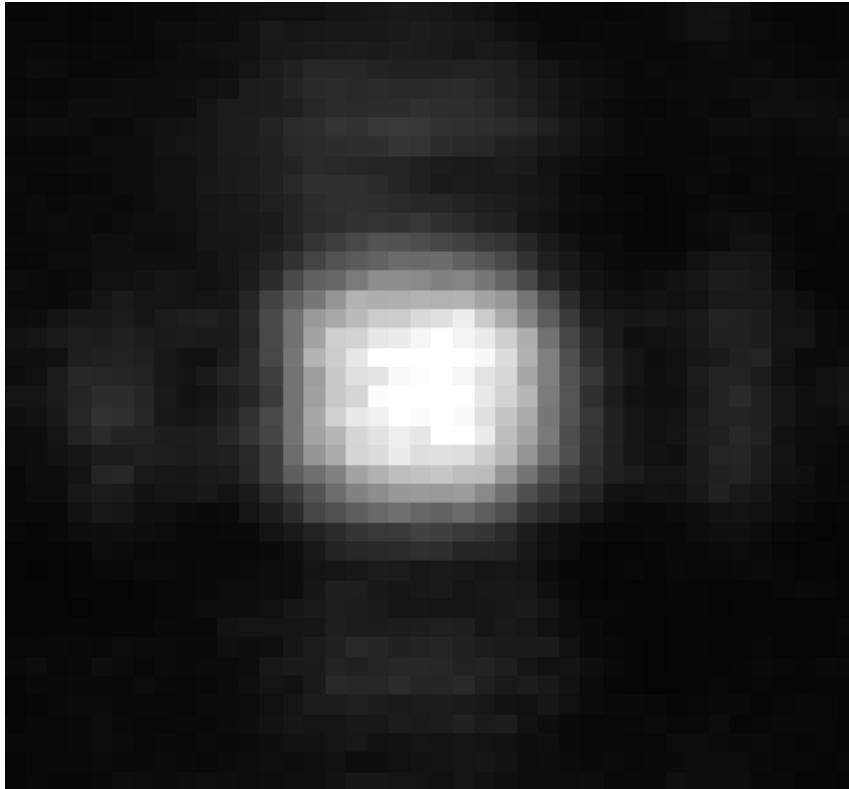


FIG. 1.2 – Zoom sur un centroïde et taches de diffraction

On arrive à résoudre les pixels sur cette image et donc les compter. On distingue également les premières taches de diffraction. Le lecteur pourra donc compter le nombre de pixels entre le maximum et le premier zéro et il devrait en compter environ 12-13. Or  $L_p \cdot 12$

= 89  $\mu\text{m}$ . Autant par le calcul que par la mesure, la preuve a été donnée que la source peut être considérée comme étant ponctuelle et n'est pas résolue.

Le choix de la lentille de collimation s'est porté sur une focale de 300 mm. Etant donné la longueur focale de cette lentille, un miroir de renvoi à 45 degrés a été ajouté afin de rationaliser les dimensions du banc. La simulation Zemax indique que la lentille doit se trouver à 298.4 mm pour une qualité de surface d'onde  $\lambda/10$ .

### 1.1.2 Interfaçage des sources

Un driver laser a été utilisé afin de commander les diodes. Le circuit d'interfaçage est très bien décrit dans la data-sheet du constructeur. La commande d'intensité lumineuse des lasers s'effectue via un potentiomètre sur la face avant du boîtier. L'enclenchement s'effectue par un interrupteur à clé pour la sécurité des personnes.

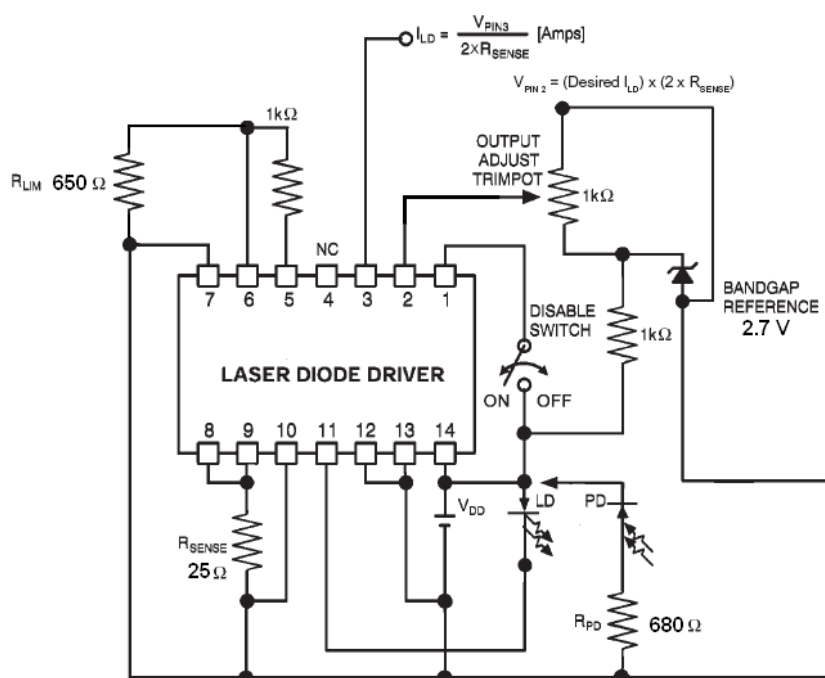


FIG. 1.3 – Circuit driver laser (modified data-sheet)

La démarche du dimensionnement des sources et de la lentille collimatrice, afin de pouvoir simuler une étoile sur un banc d'essai,

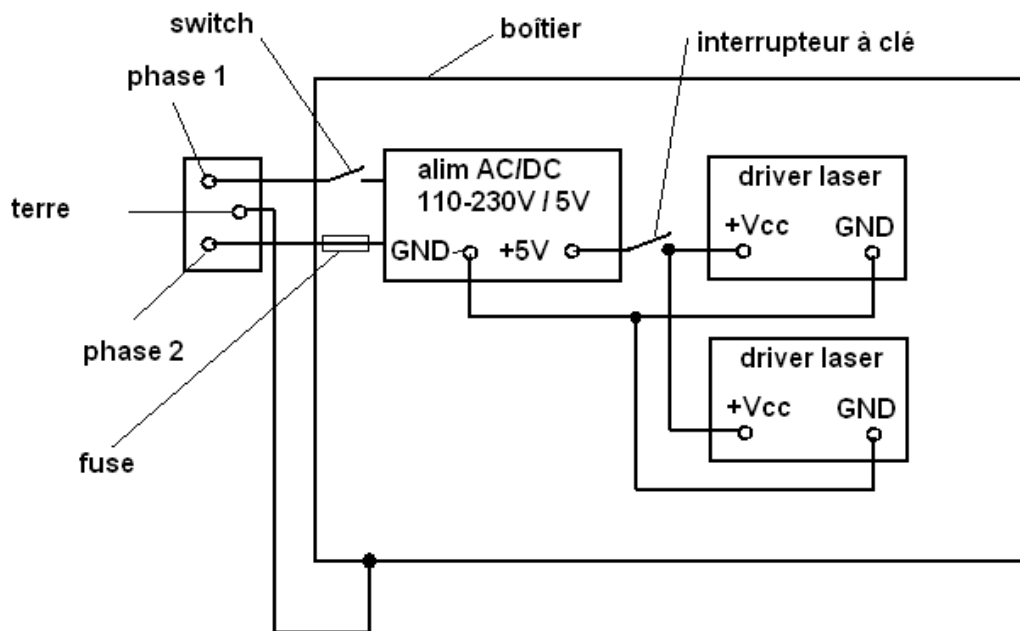


FIG. 1.4 – Circuit sécurité des personnes

a été donnée. On en a conclut que la source se comporte donc comme une source ponctuelle que ça soit par le calcul et la mesure. Il a été également vu que si une lentille collimatrice de focale trop courte avait été utilisée, on risquait de résoudre la source. A présent, voici la présentation sur la partie afocale du système.

## 1.2 Montage afocal

Lorsque on entre avec un faisceau collimaté dans un afocal, le faisceau ressortira collimaté. Le rapport entre les focales des deux lentilles, donne le rapport entre le diamètre du faisceau d'entrée et de sortie. L'afocal est donc utilisé comme réducteur de faisceau.

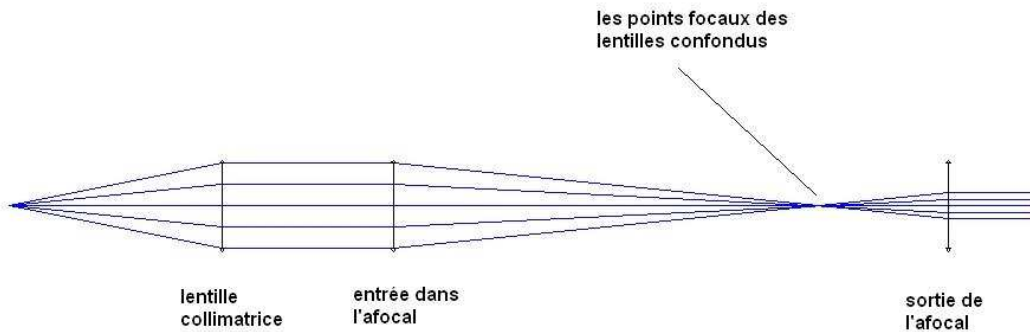


FIG. 1.5 – Exemple sous Zemax d'un montage afocal

On remarque la réduction de faisceau. Dans le cas présent, la réduction du faisceau s'impose pour les raisons suivantes. Un senseur Shack-Hartmann ayant des ouvertures carrées de 0.5 mm de côté est employé. Le miroir déformable possède 52 actuateurs dont le pitch (l'écart) est de 2.5 mm. Le choix s'est porté sur la géométrie de Fried. L'image de la pupille d'entrée (le miroir déformable) se fait sur le Shack-Hartmann de manière à ce que le conjugué de chaque actuateur se trouve sur les intersections des bords des microlentilles.

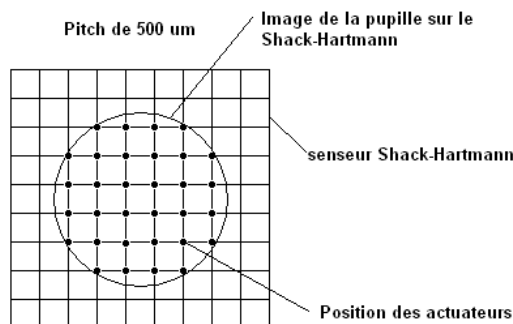


FIG. 1.6 – Géométrie de Fried

Il faut donc un facteur de réduction de 5. La lentille d'entrée a une focale de 150 mm et celle de sortie 30 mm. On a donc deux contraintes, le maintien de la collimation et faire en sorte que l'image du DM52 (miroir déformable) se situe sur le Shack-Hartmann. Voici deux simulations Zemax, la première sert à garantir la collimation et la seconde reprend les distances entre les objets pour donner la position de l'image du DM52 sur le Shack-Hartmann.

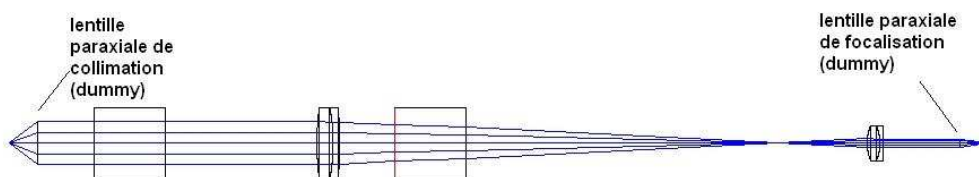


FIG. 1.7 – Respect de la collimation

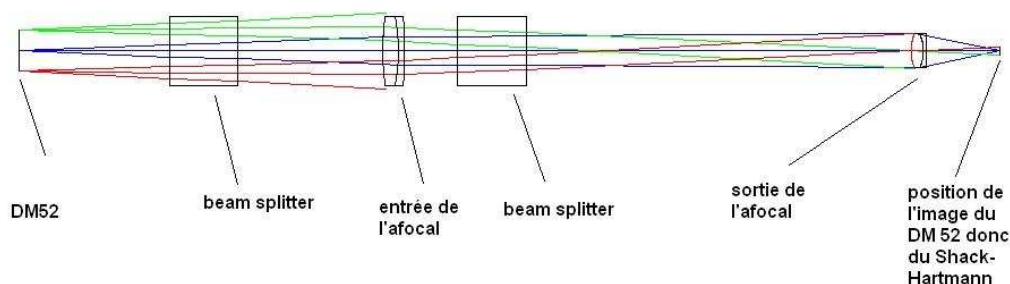


FIG. 1.8 – Image du DM52 sur le Shack-Hartmann

Les données de Zemax (optimisation tool) permettent d'affirmer que les deux lentilles de l'afocal sont distantes (face 2 de la première à la face 1 de la seconde) de 185 mm et l'image se situe à 27 mm de la face 2 de la lentille de sortie. Ceci avec un front d'onde plan à  $0.02\lambda$  RMS.

### 1.3 Voie scientifique webcam

Une webcam a été utilisée pour la voie scientifique par soucis d'économie. Elle a été démontée et fixée sur un support. La lentille d'origine a été retirée afin d'utiliser des optiques spécifiées.

Le beam splitter qui sépare la voie optique menant d'un côté à l'ASO et de l'autre à la webcam est à la limite du common path (cf. fig 8). Il est très important de ne pas introduire d'aberration optique après cet endroit. Si elle est du côté de l'ASO celle-ci sera corrigée alors qu'il n'y a pas d'aberration sur la voie menant à la webcam. Si elle est du côté de la webcam, elle ne sera pas vue par l'ASO et ne sera pas corrigée.

La lentille d'entrée de l'afocal sert de lentille de focalisation pour la webcam. Elle a une focale de 150 mm Or :

$$\rho = 1.22 \cdot \frac{\lambda \cdot f}{D} \quad (1.7)$$

On a donc :  $\rho = 8 \mu\text{m}$

En fonction de la taille incertaine des pixels de la webcam, la probabilité est grande d'être sous échantillonné et donc de ne pas voir les disques d'Airy qui prouve la limite de diffraction. C'est la raison pour laquelle une lentille négative a été ajoutée afin d'allonger la focale du système. Voici le schéma Zemax et les deux PSF (point spread function) avec et sans lentille pour allonger la focale.

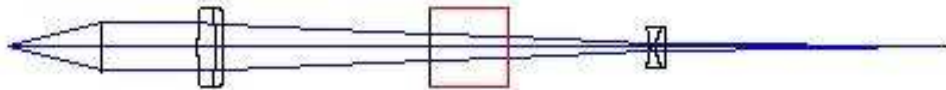


FIG. 1.9 – Schéma Zemax de l'optique de la webcam



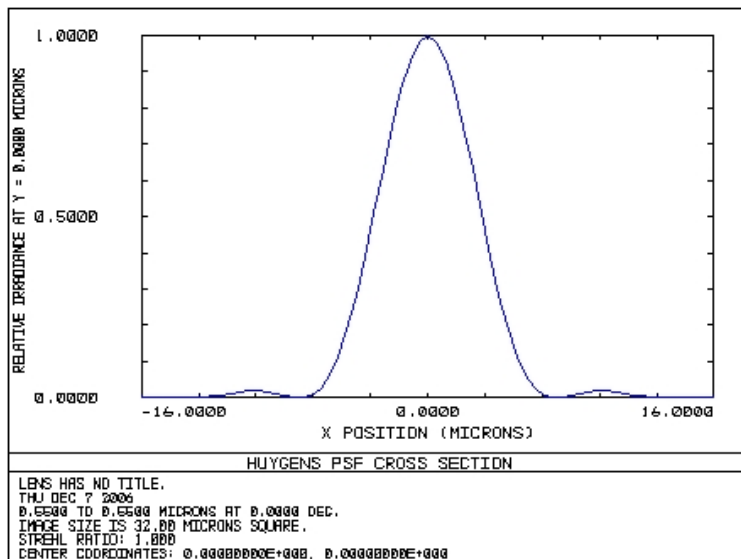


FIG. 1.10 – Sans la lentille pour allonger la focale

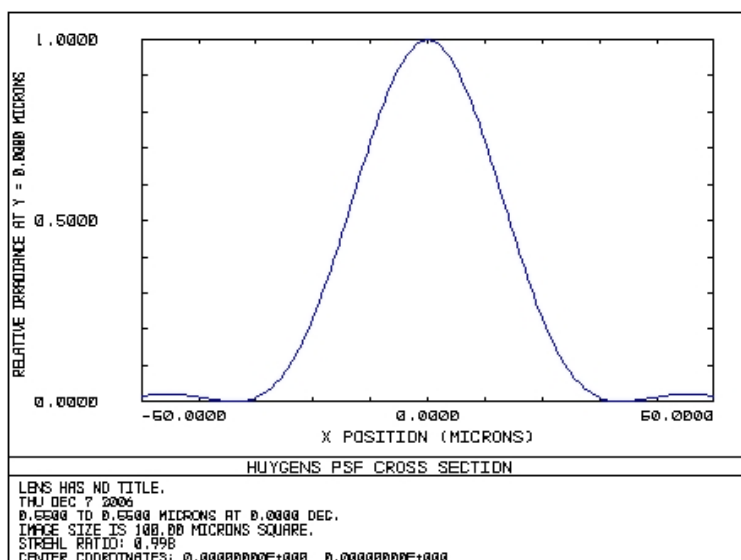


FIG. 1.11 – Avec la lentille pour allonger la focale

On constate donc que le risque d’être sous échantillonné est écarté.

### 1.4 Résultats obtenus

Dans cette section, vont être présentées des images de caméra ainsi que des comparaisons entre les simulations Zemax et les mesures. Les mesures de distance entre les optiques sont approximatives (à

la règle sur les barillets de support).

### 1.4.1 Collimateur

La lentille possède une focale de 300 mm. Zemax donne 297.8 mm pour obtenir  $\lambda/10$ . La mesure sur le banc est d'environ 335 mm pour  $\lambda/10$  également.

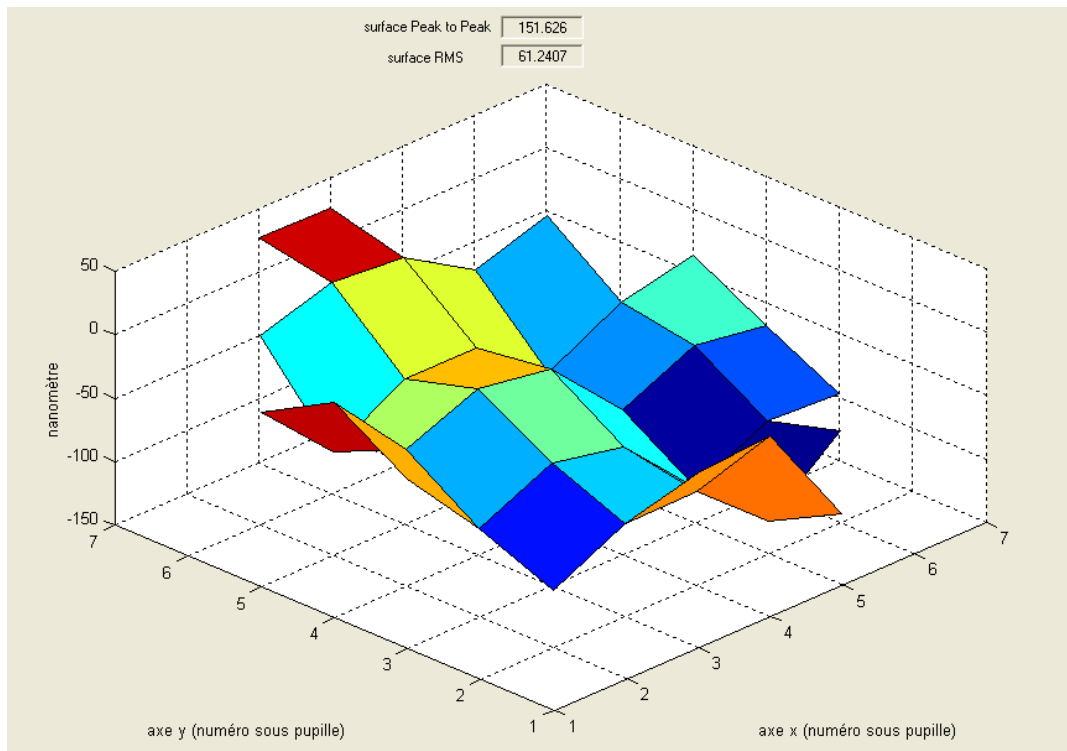


FIG. 1.12 – Surface d'onde du collimateur

La mesure a été effectuée avec le Shack-Hartmann (pitch :0.5 mm focale :19.7 mm) et la caméra Lumenera. On remarque donc une grosse différence entre la simulation et la réalité de la mesure. Aucune explication n'a été trouvée pour expliquer cette différence.

### 1.4.2 Afocal

Zemax donne une distance de 186 mm entre les deux lentilles. De plus la géométrie de Fried est respectée.

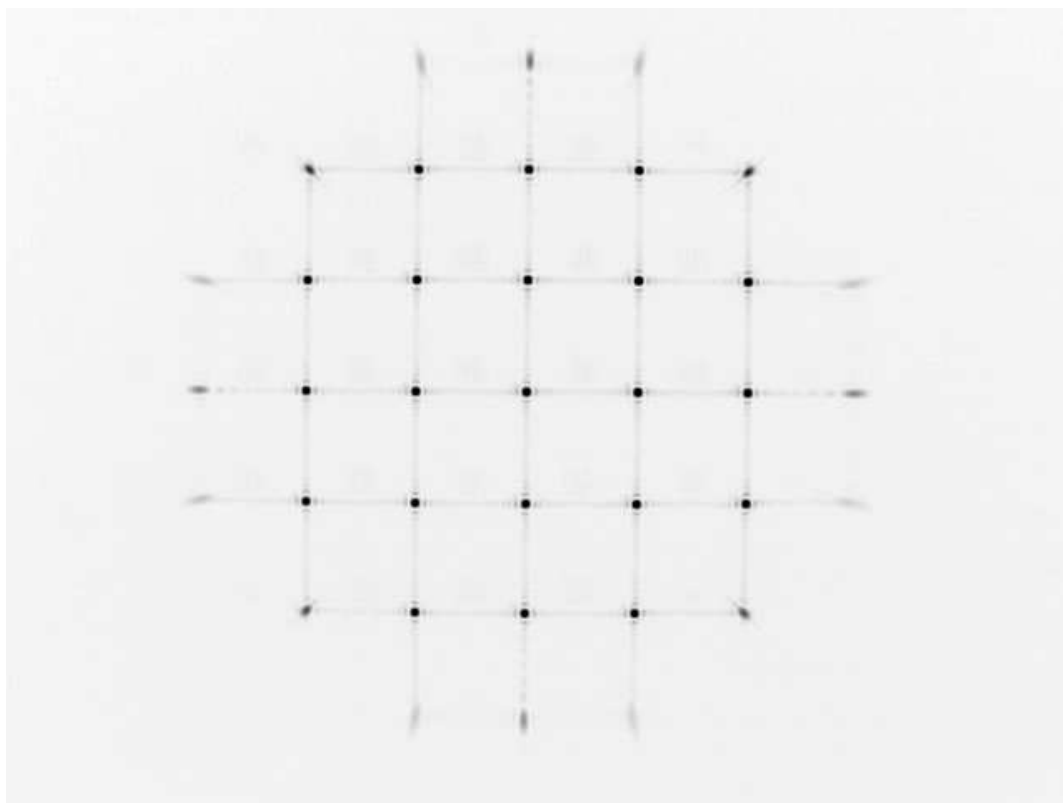


FIG. 1.13 – Géométrie de Fried (couleurs inversées pour l'impression)

Cette image a été saisie à partir d'un dummy mirror positionné à l'endroit exacte du DM52 (Miroir face avant de spécifications inconnues). La position de la lentille de sortie de l'afocal est très sensible à la position de l'image de la pupille d'entrée du système (DM52) mais n'a quasiment pas d'influence sur la qualité de la surface d'onde. Inversement pour la lentille d'entrée de l'afocal. Dans la pratique, le DM52 crée un defocus important au repos, on le corrige avec la lentille d'entrée. Ceci est correct car la lentille d'entrée de l'afocal est encore dans le common path (vu par l'ASO et la webcam). La comparaison entre la mesure de la distance entre les deux lentilles et la simulation n'est donc pas significative. Cette simulation n'est utile que pour obtenir les ordres de grandeur pour la conception mécanique.

### 1.4.3 Webcam

Les pixels de la webcam sont certainement trop gros pour échantillonner la tache de diffraction imagée par la lentille d'entrée

de l'afocal. Nous avons donc rajouté une lentille négative afin de rallonger la focale. L'essentiel n'est pas de garantir une focale de X mm mais de pouvoir montrer les anneaux d'Airy. Ainsi voici deux images comparatives avec et sans lentille allongeuse de focale.

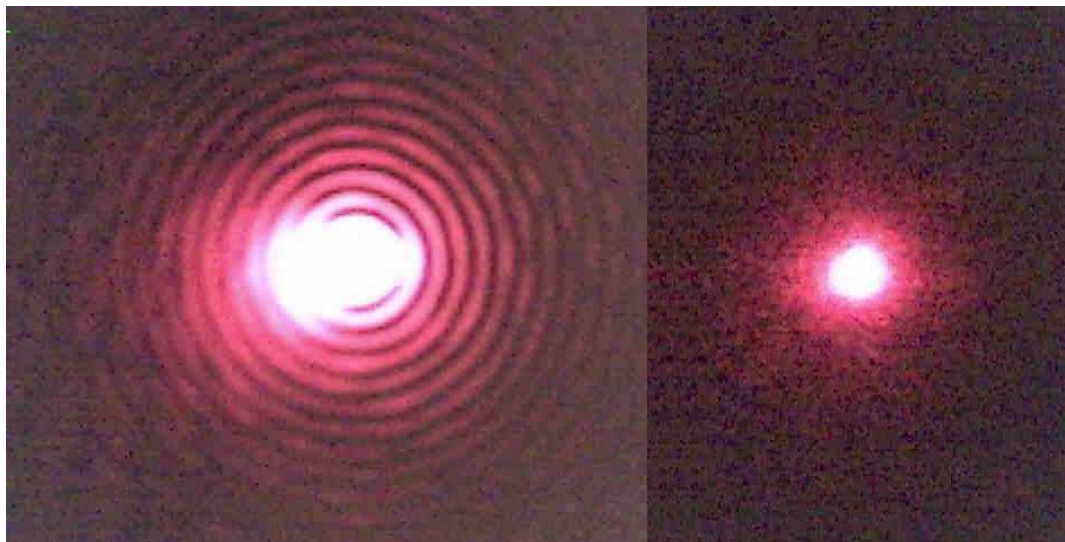


FIG. 1.14 – Avec et sans lentille négative

La constatation que la lentille allongeuse de focale est nécessaire s'impose. Ces images ont été prises à saturation de la webcam. A la page suivante, une photo du banc d'essai en comparaison avec le schéma optique.

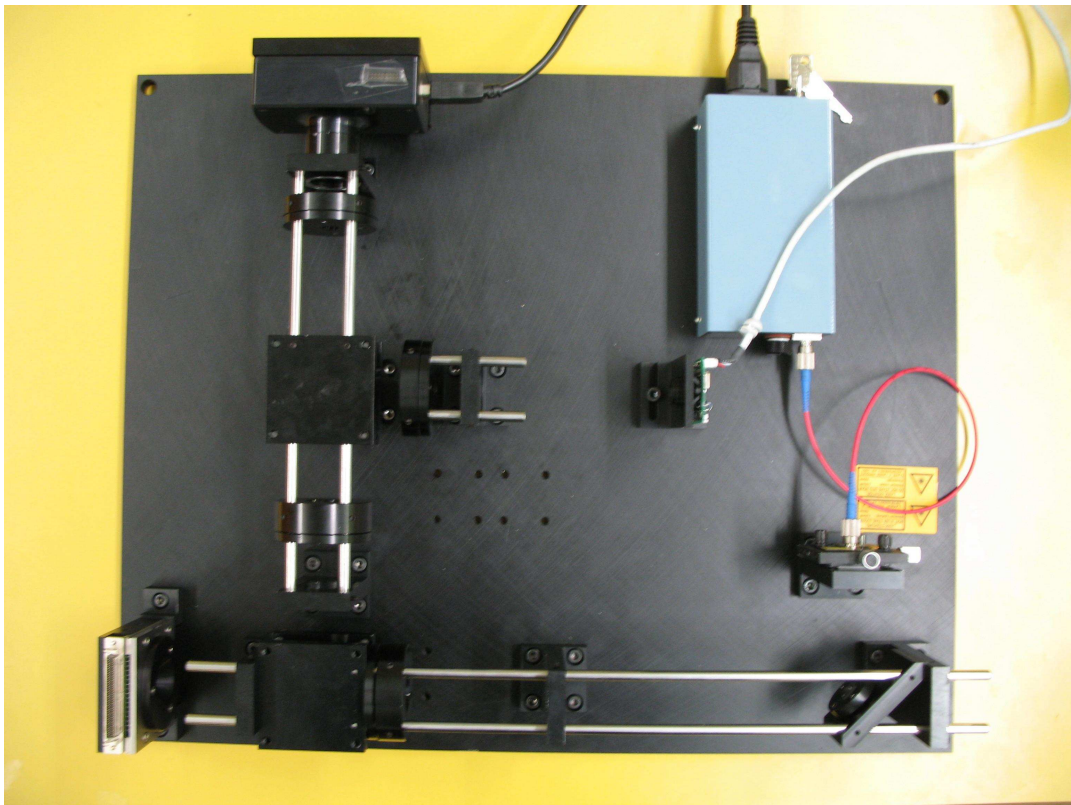


FIG. 1.15 – photo du banc d'essai

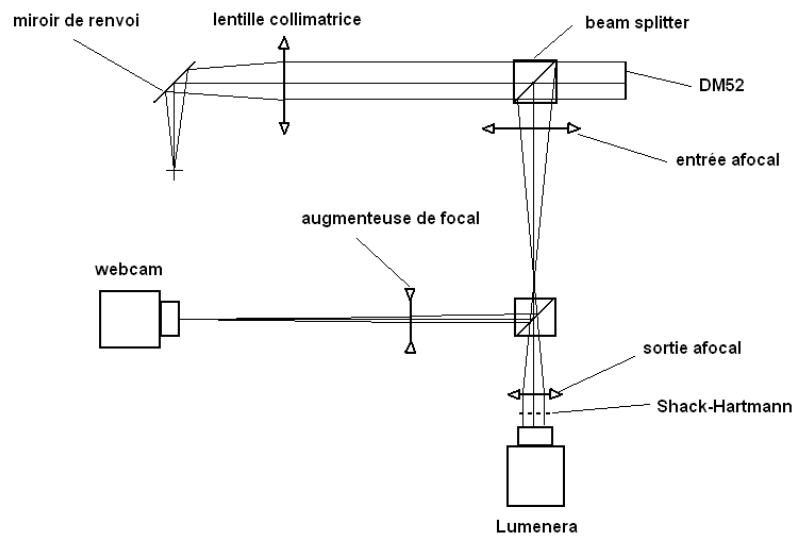


FIG. 1.16 – schéma optique

# Chapitre 2

## Les reconstructeurs

### 2.1 Reconstructeur modal

Les aberrations optiques sont classées en fonction du type de déformation que subit le front d'onde. Voici un tableau qui décrit quelques types d'aberration.

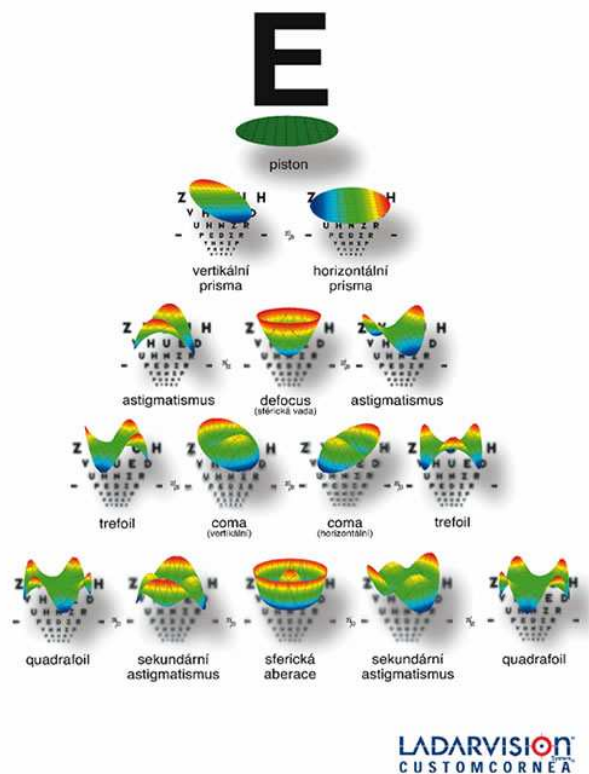


FIG. 2.1 – Aberrations classées en mode de Zernike

Les polynômes de Zernike sont une base polynomiale orthogonale

créée à partir du développement de fonction de surface d'onde pour les systèmes optiques à pupille circulaire. Théoriquement il y en a une infinité mais on se limite à une base de  $N-1$  polynômes pour  $N$  actuateurs. La mesure du piston, ordre 0, est impossible avec un Shack-Hartmann d'où  $N-1$  polynômes. Avec le DM52 il est possible de corriger 51 modes sachant qu'on peut générer 52 modes avec 52 actuateurs.

Le but est donc à partir du décalage des centroïdes de pouvoir quantifier 51 types d'aberration. Voici la description du reconstructeur modal tel qu'il a été réalisé.

Soit  $\vec{s}$  un vecteur de pentes. 37 microlentilles sont éclairées (cf. figure 1.13) donc :

$$\vec{s} = [dx_1 \ dx_2 \ \dots \ dx_{37} \ dy_1 \ dy_2 \ \dots \ dy_{37}]^t \quad (2.1)$$

Effectivement,  $\vec{s} = 74 \times 1$  (écrit ainsi pour des raisons de mise en page). Les 52 premières surfaces d'onde ont été générées via Matlab d'après le développement mathématique des modes de Zernike (l'ordre 0 pas pris en compte). Ensuite les gradients de ces surfaces d'onde ont été calculés, puis le gain sur le gradient en fonction de la focale du Shack-Hartmann a été ajusté. Ainsi la position des centroïdes est connue en fonction des modes de Zernike. Ces 51 vecteurs de pente sont ordonnés dans une matrice :

$$D = [\vec{s}_1 \ \vec{s}_2 \ \dots \ \vec{s}_{51}] \quad (2.2)$$

Cette matrice donne en fonction des modes de Zernike la position des centroïdes. Or c'est l'inverse qui est désiré, mesurer la position des centroïdes et déterminer la surface d'onde en terme de coefficients de Zernike. La pseudo inverse de  $D$  doit être calculée (la matrice n'est pas carrée) pour obtenir la matrice  $D_{mod}^+$  :

$$D_{mod}^+ = (D \cdot D^t)^{-1} \cdot D^t \quad (2.3)$$

A partir d'un vecteur de pente  $\vec{s}$ , on peut connaître les coefficients de Zernike du front d'onde incident sur la système :

$$Z_{coef} = D_{mod}^+ \cdot \vec{s} \quad (2.4)$$

Cette fonction est implémentée sur le programme Matlab. L'accès au coefficient de Zernike est donc possible.

## 2.2 Reconstructeur zonal

C'est le reconstructeur zonal qui est utilisé pour la régulation du miroir sur le banc. Il a été choisi pour sa simplicité, ce qui va être démontré dans ce qui suit.

Le premier élément est la construction de la matrice de fonctions d'influences. On la construit en actuant chaque actuateur successivement à une tension  $V_{influ}$ . On mesure pour les 52 actuateurs le déplacement des centroïdes sur les 37 sous pupille. On obtient ainsi une matrice :

$$D_{influ} = [\vec{s}_1 \ \vec{s}_2 \ \dots \ \vec{s}_{52}] \quad (2.5)$$

Comme auparavant, on désire savoir quelle commande de tension doit être appliquée aux 52 actuateurs afin d'obtenir une position pour les 37 centroïdes et pas l'inverse. On calcul la pseudo inverse de la matrice  $D_{influ}$  selon l'équation 2.3 et on obtient la matrice  $D_{zon}^+$ . Soit la position désirée des 37 centroïdes  $P_{cible}^{\vec{}}$  et leur position actuelle  $P_{pos}^{\vec{}}$ , on doit obtenir un vecteur  $D_{pos}^{\vec{}}$  :

$$D_{pos}^{\vec{}} = P_{cible}^{\vec{}} - P_{pos}^{\vec{}} \quad (2.6)$$

Afin d'obtenir le vecteur de commande  $\vec{C} = [V_1 \ V_2 \ \dots \ V_{52}]^t$  :

$$\vec{C} = V_{influ} \cdot D_{zon}^+ \cdot D_{pos}^{\vec{}} \quad (2.7)$$

Le vecteur  $\vec{C}$  contient donc les tensions à fournir à chacun des actuateurs dans le but que les centroïdes se trouvent sur la cible. Les reconstructeurs modal et zonal tel qu'utilisés sur le banc ont été décrit. C'est le reconstructeur zonal qui est utilisé pour la régulation du miroir, voici donc le chapitre qui traite de la régulation.



## Chapitre 3

# Régulation du DM52

La régulation du DM52 est basée sur un régulateur I dont voici la loi de commande :

$$\vec{C}_i = C_{i-1} + g \cdot D_{zon}^+ \cdot D_{pos}^{\vec{}} \quad (3.1)$$

### 3.1 Actuateurs

Comme évoqué au chapitre précédent, la matrice  $D_{zon}^+$  est construite à partir de la matrice d'interaction  $D_{influ}$ . Il est essentiel que le comportement des actuateurs sur le miroir soit stationnaire et linéaire. Or lors de manipulations sur le miroir celui-ci a été dégradé. L'identification des actuateurs erratiques est donc nécessaire. Une fois identifiés ceux-ci seront simplement éliminés de la matrice d'interaction  $D_{influ}$ . La conséquence qui s'en suit est que pour N actuateurs éliminés on aura N modes de Zernike corrigibles en moins.

#### 3.1.1 Gain d'actuateur trop élevé

C'est le plus frustrant des défauts à constater sur un actuateur même si cet actuateur se comporte de façon stationnaire. Lors de la construction de la matrice d'interaction, on mesure le déplacement de chaque centroïde. Si le plus grand déplacement de centroïde est faible, le gain sur l'actuateur sera très élevé. La conséquence est que le vecteur de commande exigera d'imposer une tension de 8V à l'actuateur à grand gain alors qu'on est à la limite de la détérioration à 1V. Indépendamment de la puissance

que possède cet actuateur, il est important que son effet soit très localisé. Quand on se trouve face à ce comportement, on ne peut strictement rien faire pour corriger ce problème. Voici une figure de mesure saisie au **LAOG** qui met en évidence certains actuateurs ayant le comportement à grand gain.

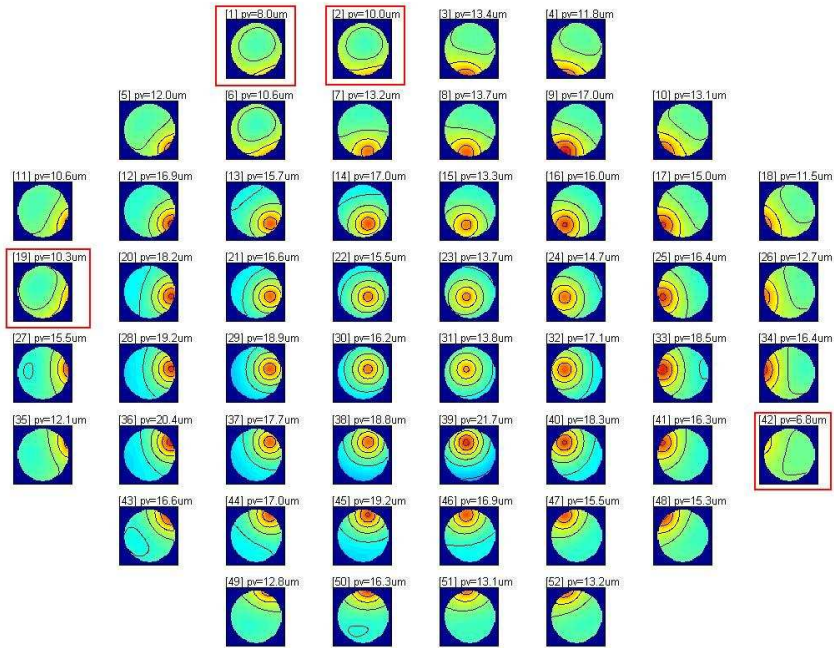


FIG. 3.1 – Actuateurs à gain trop élevé

Voici les conséquences sur les commandes illustrées sur la figure ci-dessous.

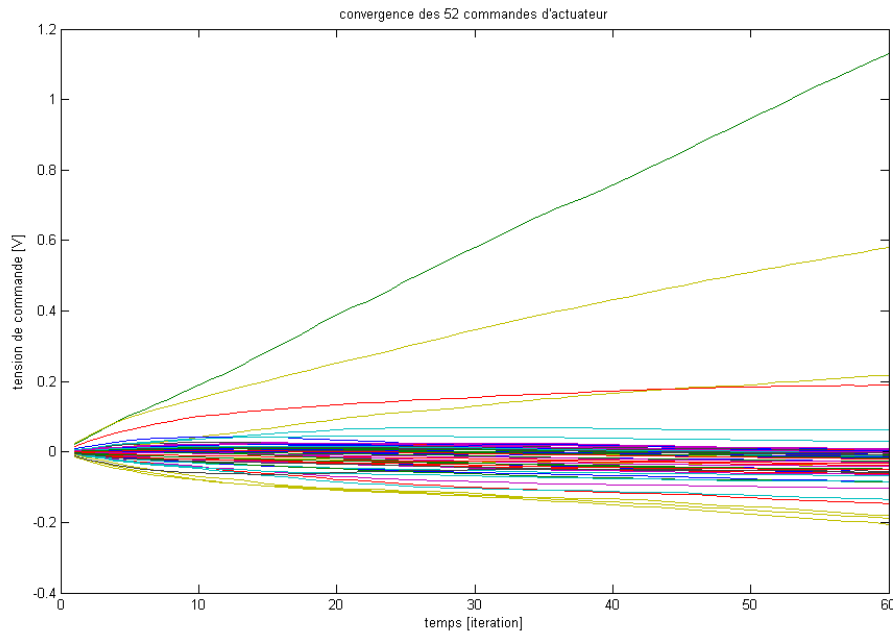


FIG. 3.2 – 52 commandes d’actuateurs présentés dans le temps

On remarque que certaines commandes ne trouvent pas une valeur de stabilisation.

### 3.1.2 Non linéaire et non stationnaire

C’est le cas typique d’un actuateur erratique. C’est un actuateur absolument inexploitable.

### 3.1.3 Effet non stationnaire

Ce défaut peut être rattrapé selon certaines circonstances. On peut imaginer que l’actuateur a un degré de stationnarité relativement élevé. Cela signifie que lors de plusieurs mesures successives sur l’effet de cet actuateur, seul quelques une d’entre elles sont des erreurs grossières. Dans ce cas, lors de la construction de la matrice d’influence, il est important de pouvoir identifier quel vecteur d’interaction est erratique. C’est le cas où le comportement grossier de l’actuateur s’est manifesté lors de la construction de la matrice d’interaction  $D_{influ}$ .

Deux cas de figure se présentent, le gain est trop élevé (gamme de tension exploitable) ce qui implique que la régulation demande

plus d'itération que prévu. Le gain est trop faible, on dépasse la consigne mais on finit tout de même par se stabiliser. De plus on peut ajuster le gain de boucle afin de lisser le problème. Il est donc possible de réguler malgré ces quelques problèmes. Cependant les résultats seront de toute façon moindres par rapport à un système parfaitement linéaire et stationnaire. Ici une figure montrant la valeur RMS de surface d'onde suite à 10 mesures successives sur tous les actuators en appliquant une tension de 0.1V. On active 10 fois de suite le même actuateur avec une remise à zéro entre chaque essai et on passe au suivant.

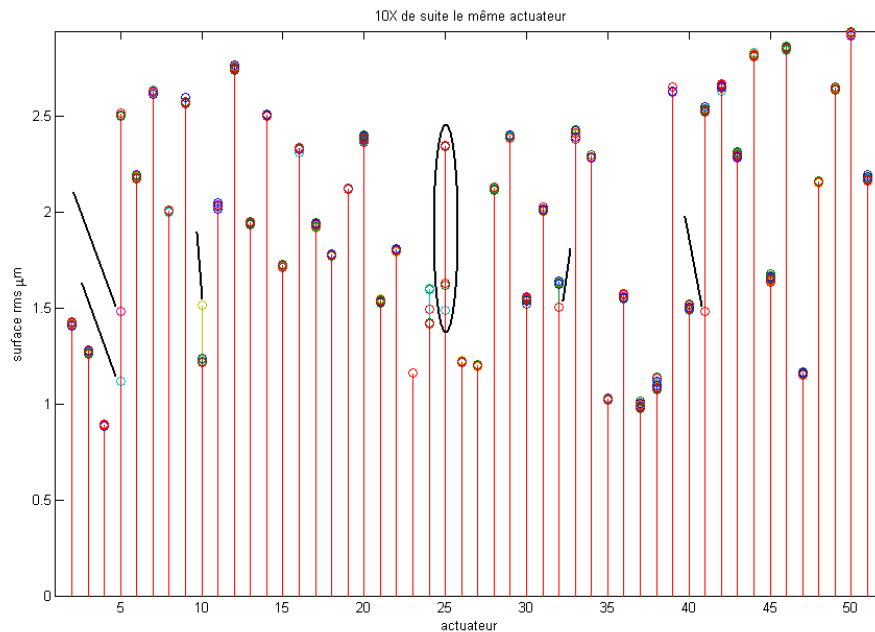


FIG. 3.3 – 10 mesures successives en actuant 10 fois le même actuateur

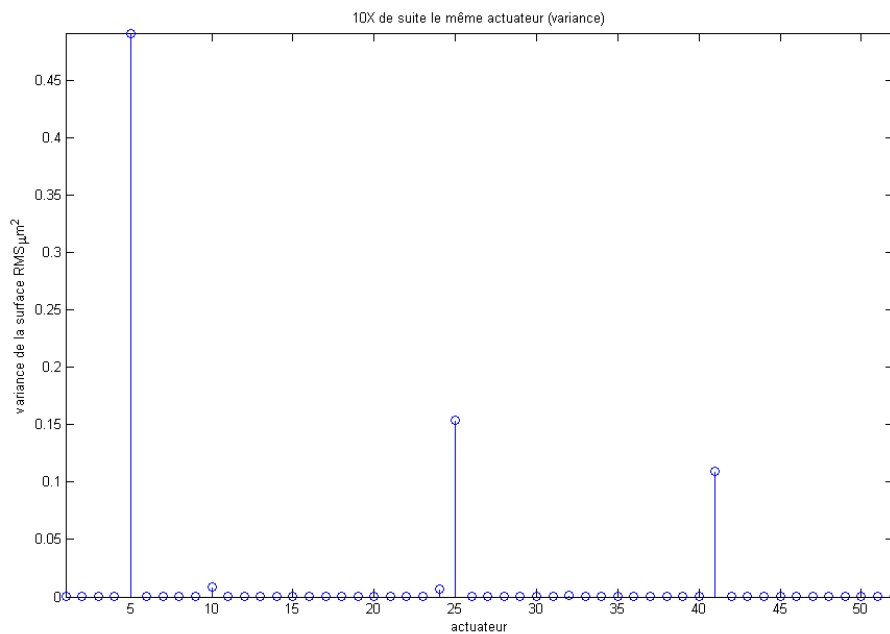


FIG. 3.4 – Variance des 10 mesures successives

On constate qu'il peut y avoir des variations assez importantes d'une commande à l'autre sur certains actuateurs. Ce genre de comportement péjore la qualité de la régulation.

### 3.2 Résultats de la régulation

La régulation a été effectuée en supprimant quelques actuateurs présentant des défauts. On améliore grandement la qualité de surface d'onde. Voici deux figures illustrant tant pour la position des centroïdes que pour la commande l'effet de convergence vers la consigne qui est une surface d'onde plane.

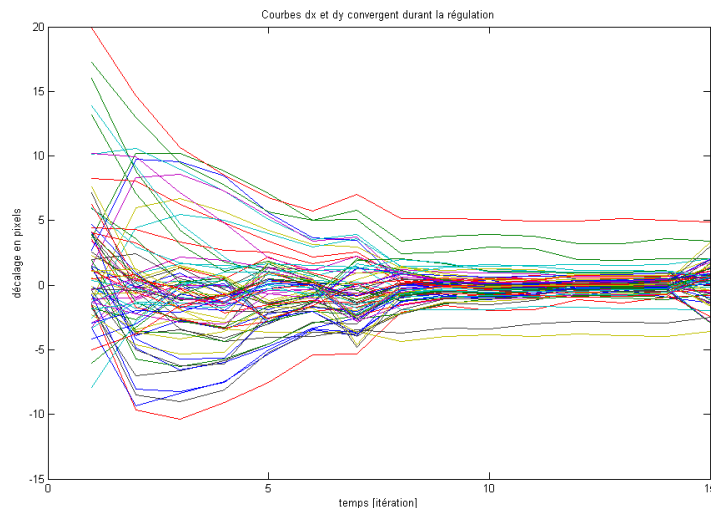


FIG. 3.5 – Les Dx et Dy convergent vers la consigne

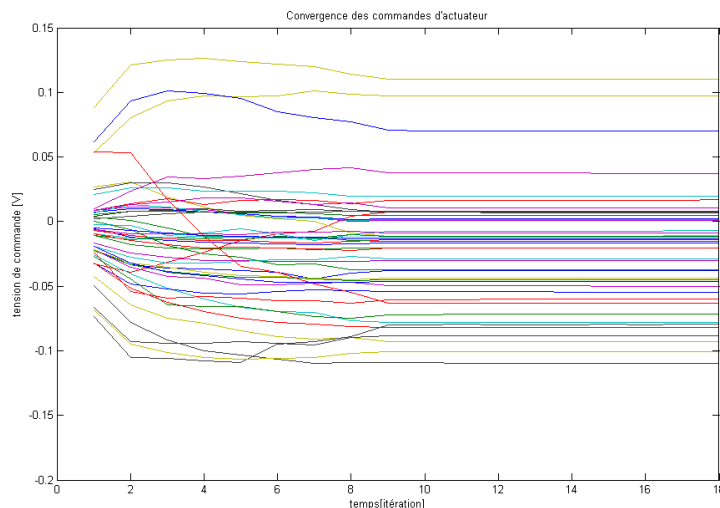


FIG. 3.6 – Stabilisation de la commande des actuateurs

Certains Dx et Dy ne s'annulent pas. Etant donné que certains actuateurs sont inutilisés, tous les modes de Zernike ne peuvent être corrigés. Ainsi il subsiste des différences résiduelles. Les graphiques ci-dessus représentent une surface d'onde  $S = \lambda$  peak to peak,  $S = \lambda/3$  RMS. Voici le résultat sur la webcam ainsi que la forme du front d'onde échantillonné par le Shack-Hartmann.

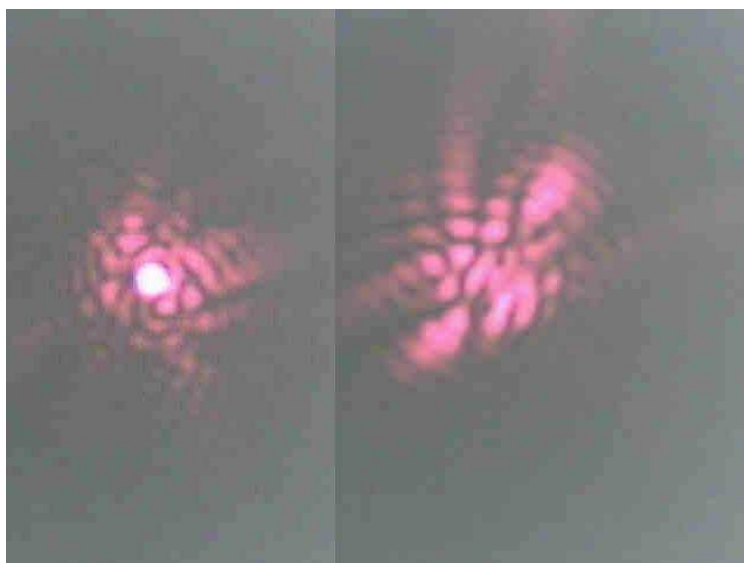


FIG. 3.7 – Comparaison entre le miroir régulé et au repos

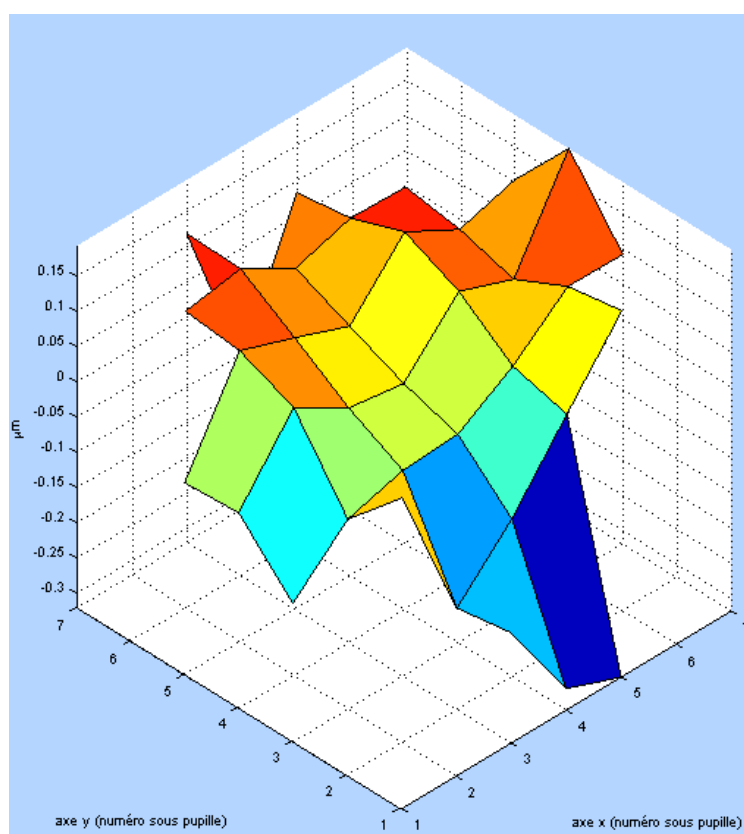


FIG. 3.8 – Reconstruction du front d'onde échantillonné par le Shack-Hartmann

## Chapitre 4

# Algorithmes et GUI

### 4.1 Centroïdes

La recherche des centroïdes est l'élément de la programmation le plus crucial. La régulation est construite à partir de cette information, de plus la dynamique du système en dépend. La recherche des centroïdes est basée sur le principe du barycentre des pixels pondérés par rapport à leur intensité. Le calcul se fait à partir de la dernière coordonnée connue du centroïde et non pas par rapport au centre de l'axe optique de la microlentille du Shack-Hartmann. L'énorme avantage de cette méthode de calcul est qu'il n'y a pas de limitation de la dynamique par rapport à la taille de la microlentille. Le désavantage est que si entre deux calculs de centroïdes ceux-ci se sont déplacés d'une distance plus grande que la fenêtre de calcul, l'algorithme va choisir n'importe quel région un peu plus intense dans la fenêtre pour déterminer qu'il s'agit d'un centroïde. On est donc perdu et dans ce cas, il faut arrêter la régulation. Les dernières coordonnées connues des centroïdes sont contenues dans une variable globale qui est une matrice.

### 4.2 Utilisation de la GUI

La GUI (Graphic User Interface) permet à l'utilisateur de jouir des fonctionnalités du banc d'essai. Ici seront donc expliquées les différentes possibilités existantes actuellement au niveau software.



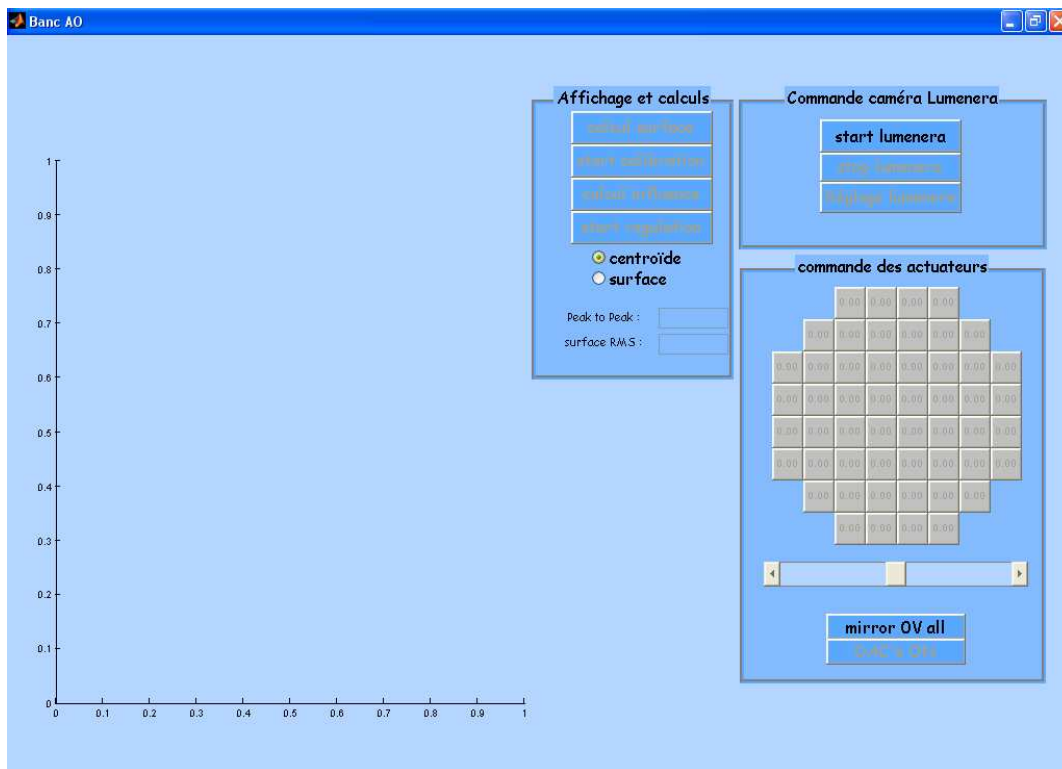


FIG. 4.1 – GUI au démarrage de l'application

La première chose à effectuer est de démarrer la caméra Lumenera. Lorsque on démarre la caméra, les variables telles que le dark field ou le reconstituer sont chargées depuis un fichier. L'initialisation des autres variables est effectuée. Pour pouvoir mettre les Dac's du DE64 sur ON, il faut impérativement appuyer sur le bouton "mirror 0V all" qui initialise les registres de tension du DE64 à 0V (initialisés à 0X00 impose -2V!). Le bouton "DAC's ON" devient disponible.

Une fois le miroir enclenché, on peut observer soit les centroïdes soit la surface d'onde. L'utilisateur peut sélectionner les actuateurs qui deviennent rouge pour leur imposer une tension grâce au slider. En les deselectionnant, il peut en sélectionner d'autre afin de leur imposer une nouvelle tension sans réinitialisation. Il y a autant de combinaisons de tension possibles que l'on désire.

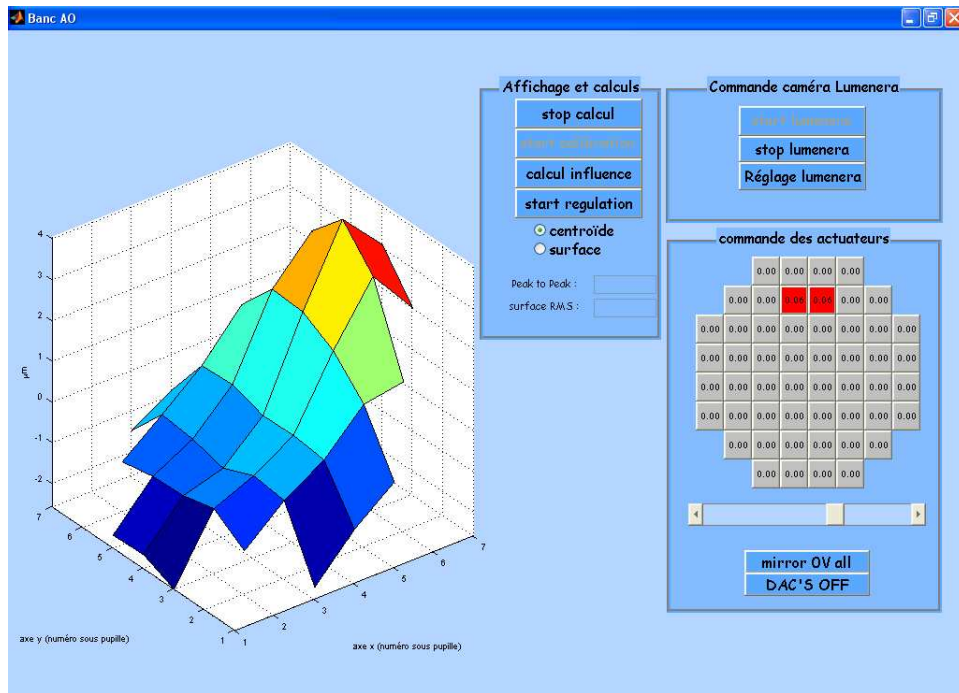


FIG. 4.2 – Mode actuateur, affichage de la surface d'onde

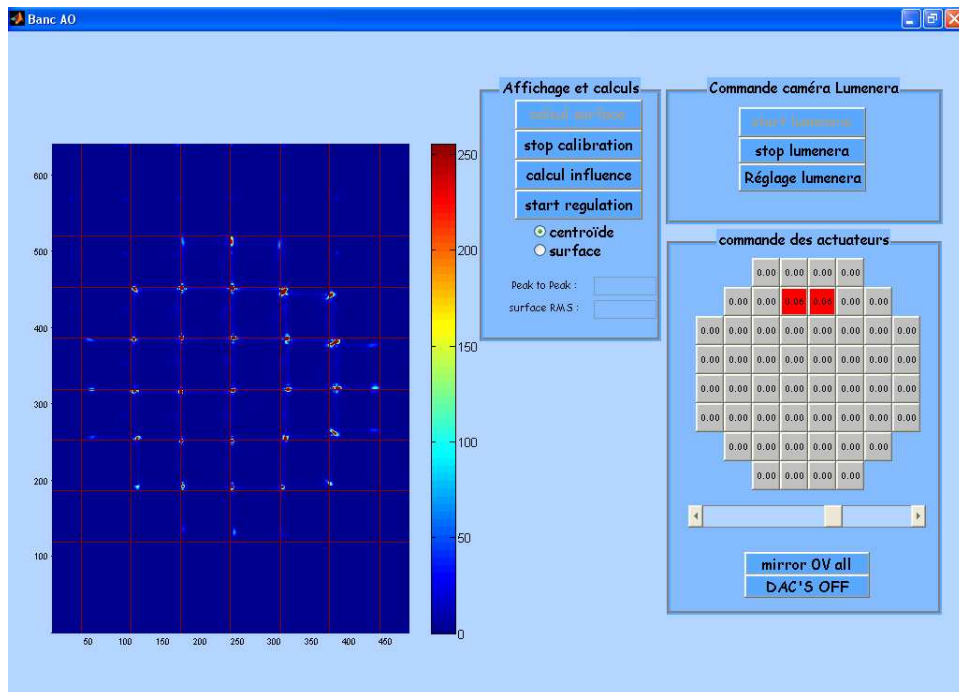


FIG. 4.3 – Mode actuateur, affichage centroïdes

On peut également créer le reconstructeur modal en appuyant sur le bouton "calcul influence". Durant une minute on verra chaque actuateur s'activer et les centroïdes se déplacer en fonction. Une croix est affichée sur chaque centroïde ce qui permet à l'utilisateur de vérifier si les centroïdes sont calculé correctement. Le reconstructeur est ensuite enregistré dans un fichier .mat accessible ultérieurement.

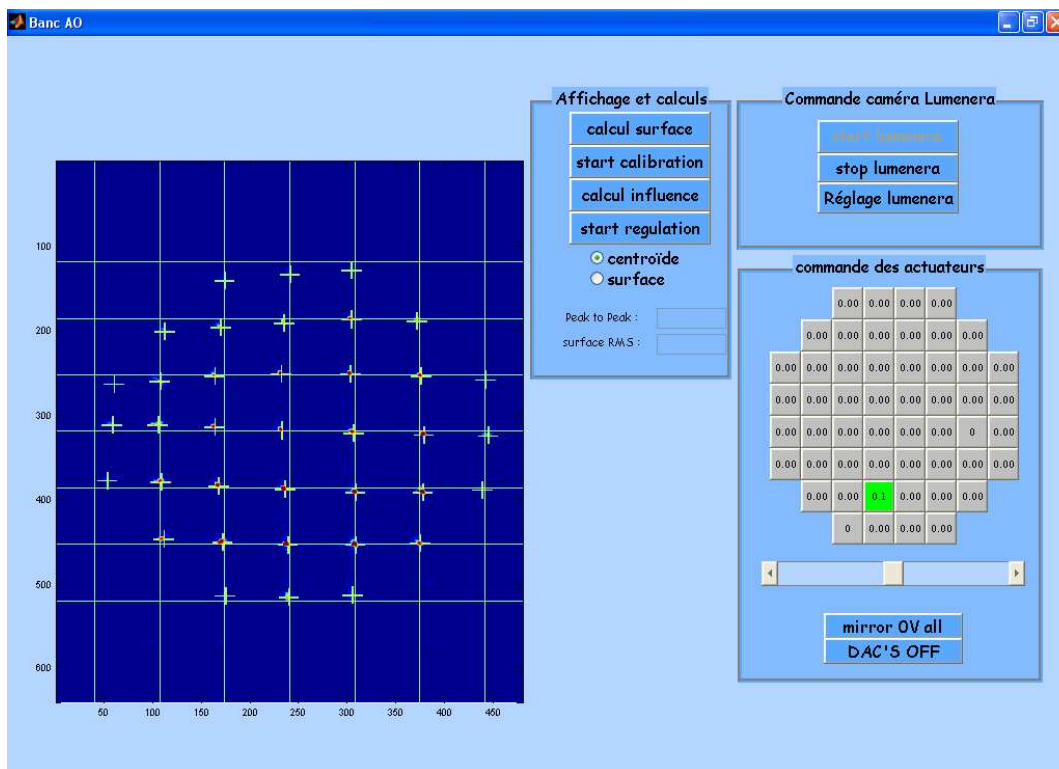


FIG. 4.4 – Construction du reconstructeur

La régulation peut s'effectuer en appuyant sur le bouton "start régulation". Deux modes d'affichage peuvent être sélectionné avec les "radio buttons" centroïde et surface. La qualité de surface d'onde en terme RMS et peak to peak est affichée durant la régulation.

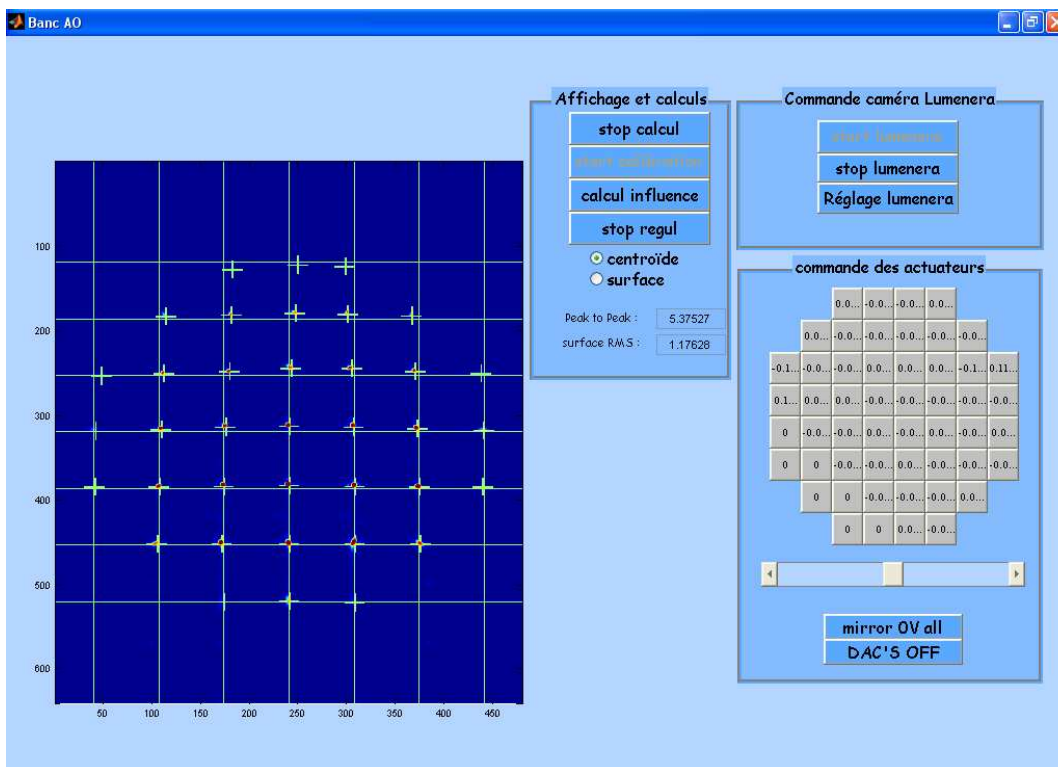


FIG. 4.5 – Régulation avec affichage des centroïdes

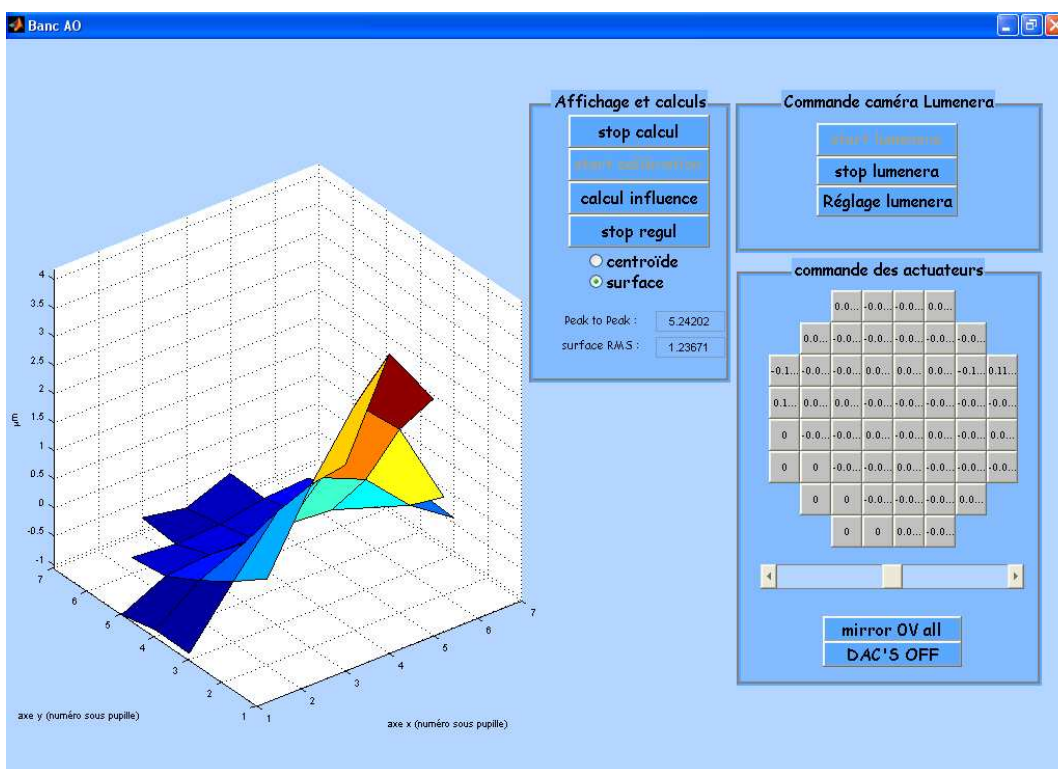


FIG. 4.6 – Régulation avec affichage de la surface d'onde

On peut également commander les caractéristiques de la caméra Lumenera avec le bouton "Réglage Lumenera".

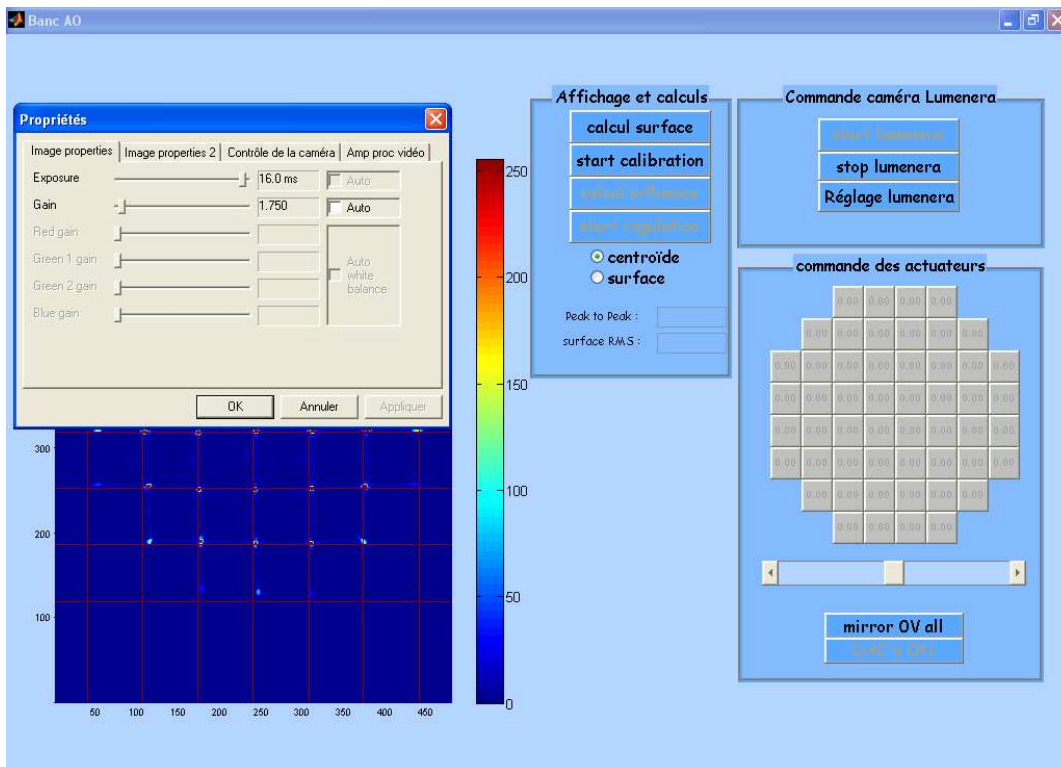


FIG. 4.7 – Réglage de la caméra Lumenera

# Conclusion

Les résultats ont été présentés et il s'agit de démontrer dans quelle mesure ce projet respecte le cahier des charges.

**Le système travaillera aux longueurs d'onde visibles pour que l'utilisateur puisse mieux visualiser le trajet de la lumière.**

Vu l'intensité de la source et étant donné que le banc est destiné à fonctionner dans un milieu éclairé (exposition), il est difficile de visualiser le trajet de la lumière si ce n'est au points de focalisation.

**Il utilisera 2 sources ponctuelles pour simplifier la mesure du front d'onde et permettre de démontrer la séparation des sources à la limite de résolution.**

N'ayant reçu le lien à fibre que le (LAOG) devait développer, il est difficile de prouver qu'on peut séparer les deux sources. Cependant étant donné la surface d'onde qu'il est possible d'obtenir, il est prévisible qu'on puisse séparer les deux sources du point de vue de la résolution.

**Le banc devra supporter les voyages sans démontage ou avec un minimum de démontage. La taille devra être minimisée et doit être transportable dans une valise.**

Le banc n'a jamais été testé après avoir voyagé, cependant aucun démontage n'est à envisager pour son transport. Son poids est dans les normes pour éviter les surcoûts de transport et une valise

est prête à être commandée (sans la commande DE64). Aucune mise en oeuvre spécifique n'est à effectuer.

### **Il devra pouvoir tourner en boucle fermée à 50Hz de fréquence d'échantillonnage**

Le système tourne en boucle fermée mais pas à une vitesse de 50Hz. Il tourne avec les affichages à chaque boucle aux environs de 1Hz.

### **Améliorations**

Actuellement, il est donc possible de tourner en boucle fermée. Nous ne sommes pas diffraction limit  $\lambda/10$  lors des meilleures résultats mais à  $\lambda/3$ . Des essais avec un miroir non dégradé n'ont pu être effectués. Cependant il est certain qu'avec 52 actuateurs en bon état, les résultats seraient bien meilleurs. Au niveau de la lenteur, en évitant d'afficher des graphiques à chaque itération, il faudrait utilisé une interruption Timer. En passant par une carte ADLINK au lieu du port parallèle standard, la fréquence d'échantillonnage serait améliorée. Il faut donc reprogrammer la fonction send voltage. Il est nécessaire de lancer le programme de la webcam séparément de la GUI et on ne peut afficher l'image dans la GUI. Il serait donc intéressant de pouvoir commander la webcam depuis la GUI.

# Bibliographie

- [1] Eugène Hecht, Optique 4ème édition, Pearson Education
- [2] <http://www.astrosurf.com/>
- [3] <http://www.librecours.org/>
- [4] <http://www.umoncton.ca/genie/electrique/cours/hamam/>
- [5] <http://wyant.opt-sci.arizona.edu/zernikes/zernikes.htm>
- [6] <http://cfao.ucolick.org/>
- [7] <http://www-luan.unice.fr/ITHD/fichiers%20PDF/GerardRousset.pdf>
- [8] <http://mathworld.wolfram.com/ZernikePolynomial.html>
- [9] Benjamin Girardet, Optimisation à posteriori et en ligne d'un régulateur multi-variables d'un système d'optique adaptative, 2004
- [10] Gabriel Mühlebach, Banc de démonstration d'optique adaptative (travail de semestre), 2006



# Remerciements

M. François Wildi pour m'avoir soumis un projet multidisciplinaire ambitieux ainsi que pour sa disponibilité et sa transmission de savoir.

M. Frédéric Rooms, M. Julien Charton, M. Laurent Jocu membres du **LAOG** pour leur partenariat et leur collaboration.

M. Gilles Berchier, pour notre soutien mutuel en tant que collègues de laboratoire.

M. Aquilon Michel, pour avoir usiné les pièces du banc qui sont d'une qualité remarquable.

Ma famille qui m'a soutenu et qui m'a donné tous les moyens pour que je puisse réussir ma formation.

## Annexes A.1 : Code Matlab

## Annexes A.2 : Liste de pièces

## Annexes A.3 : Mises en plan

**Annexes A.4 : CD comprenant  
toute les données**