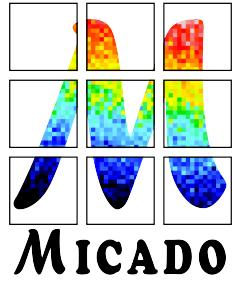


Rapport de projet OSAE



Développement d'un analyseur de front d'onde de type pyramide pour les TP du master OSAE

Encadrant : Eric Gendron
LESIA, 5 place Jules Janssen, 92190 Meudon

Observatoire de Paris - PSL
Master 2 OSAE

Livré le: 30/12/2022

Fleury Valentin
Piekarski Tom

Résumé

Le Master OSAE organise depuis longtemps un travail expérimental sur la caractérisation d'un front d'onde perturbé par des aberrations. L'expérience est effectuée aujourd'hui grâce à un analyseur de front d'onde type Shack-Hartmann inventé dans les années 70. Aujourd'hui, ce système est peu à peu remplacé par un analyseur de type pyramidal (Ragazzoni. 1996 [**Ragazzoni_1996**]) comme on le voit sur les optiques adaptatives dédiées à l'ELT. Le but de ce projet est donc de faire de même pour ce TP OSAE.

Après avoir opté pour une solution à deux prismes en toit bien moins coûteuse qu'une pyramide, un dimensionnement et une commande de l'analyseur ont été effectués. La durée de livraison empêche d'intégrer l'analyseur au montage pour le moment. Cependant, une monture mécanique et une simulation numérique de l'expérience modélisant l'analyseur et le front d'onde déformé ont été réalisées. La réception et l'intégration de l'analyseur seront réalisées en Janvier ou Février 2023.

Abstract

The Master OSAE organizes since a long time an experimental works about the characterization of an aberration perturbed wavefront. The experiment is today performed with a Shack-Hartmann wavefront analyzer, invented on the 70's. Nowadays, such device is gradually replaced by a pyramidal wavefront sensor (Ragazzoni. 1996 [**Ragazzoni_1996**]), as seen on the adaptive optics dedicated to the ELT. The goal of this project is then to apply the same process on this OSAE practical work.

After opting for a double roof prisms solution, much cheaper than a pyramid, sizing and ordering have been performed. The delivery time prevents to integrate the analyzer to the actual setup, for now. However a mechanical mount and a numerical simulation of the experiment, modelizing the analyzer and the perturbed wavefront have been realised. The analyzer's reception and integration will be done in January or February 2023.

Table des matières

1	Introduction	3
2	Mis à jour du montage expérimental	4
2.1	Contexte et théorie	4
2.1.1	Instrument actuel: Le Shack-Hartmann	4
2.1.2	L'analyseur pyramidal	4
2.2	Une solution technique: deux prismes en toit	5
2.2.1	Matériel à disposition	5
2.2.2	Avantages et dimensionnement	7
2.2.3	Cahier des charges et commande	10
3	Monture mécanique pour l'analyseur	14
3.1	Espacement des prismes	14
3.1.1	Critère sur le front d'onde	14
3.1.2	Critère sur la défocalisation du faisceau	15
3.1.3	Bilan	16
3.2	Premier prototype	16
4	Simulation de la situation et de résultats	18
4.1	Outils pédagogique	18
4.2	Simulation de résultats	19
5	Conclusion	21
6	Annexe	22
6.1	Devis des fournisseurs	22
6.2	Monture mécanique pour l'analyseur: Dessin technique	23

1 Introduction

A l'heure de la construction du plus grand télescope par l'Observatoire Européen austral (ESO), des moyens technologiques sont étudiés et mis en oeuvre dans le but d'extraire toutes les informations que les photons apportent avec eux. La position terrestre du télescope Extremely Large Telescope (ELT) soumet le front d'onde à la turbulence atmosphérique. Pour la corriger, des instruments tels que MICADO, HARMONI ou encore METIS seront dotés, à terme, d'un analyseur de front d'onde de type pyramidal. Cette technique de caractérisation introduite par Mr Ragazzoni en 1996, remplace peu à peu celle développée par Mr Hartmann et reprise par Mr Shack en 1970.

C'est dans ce contexte d'instrumentation spatiale de précision que les futurs professionnels du secteur doivent se former à ces nouvelles technologies. C'est pourquoi Mr Eric Gendron, chercheur au LESIA travaillant sur l'optique adaptative de MICADO, et enseignant cette discipline aux étudiants du master OSAE, souhaite faire évoluer son enseignement pratique vers ces nouvelles méthodes.

Actuellement équipé d'un banc optique et du matériel nécessaire à l'utilisation d'un analyseur Shack-Hartmann, ce projet consiste à faire évoluer ce montage en analyseur de front d'onde pyramidale, en respectant les contraintes imposées (coût, délais, pédagogie...). En ce sens, ce rapport s'attachera en premier lieu à expliciter cette méthode de caractérisation, puis présentera la solution technique fournie comprenant le cahier des charges de l'analyseur. Il sera complété par la présentation d'un prototypage de socle pouvant accueillir l'analyseur, et par une simulation numérique.

2 Mis à jour du montage expérimental

2.1 Contexte et théorie

2.1.1 Instrument actuel: Le Shack-Hartmann

Le Shack-Hartmann, inventé en 1970 a longtemps été l'analyseur de front d'onde privilégié en optique adaptative. Il s'agit d'un analyseur dont le principe est basé sur la détection de la pente locale du front d'onde grâce à la déviation du faisceau incident.

Cet analyseur consiste en une matrice de micro-lentilles focalisant chacune un rayon collimaté sur leur plan focal. On part donc d'une pupille d'entrée unique à une ensemble de sous-pupilles de sortie. Sur un front d'onde plan ou sphérique non déformé, les spots des lentilles sur le plan images seront uniformément espacés comme la matrice du Shack-Hartmann (figure 1 gauche). Cependant, si le front d'onde subit des déformations liées à la turbulence, les spots seront décalés sur le plan images (figure 1 droite). Il est montré que le décalage des spots est proportionnel au gradient de la phase. On peut alors relier le décalage des spots par rapport à leur position initiale et la pente du front d'onde incident.

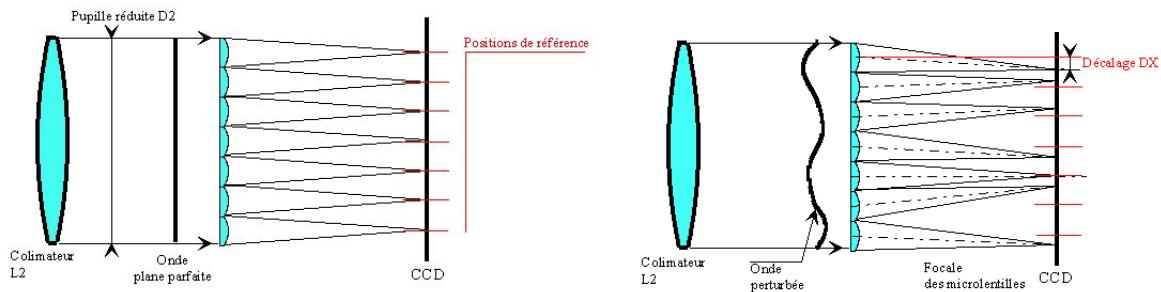


Figure 1: Gauche: division d'un front d'onde parfait par un Shack-Hartmann, Droite: division d'un front d'onde déformé entraînant un décalage des positions des spots dans le plan image

Un premier inconvénient de cet analyseur est qu'il nécessite un front incident de la taille de la pupille (pupille réduite D_2 sur la figure 1). Une collimation est donc nécessaire avant l'arrivée du Shack-Hartmann. Un autre problème concerne l'échantillonnage des spots sur le plan image. Celui-ci est directement lié au nombre de micro-lentilles. Changer cet échantillonnage est donc impossible à moins de changer de Shack-Hartmann. C'est pour contrer ces problèmes qu'un nouveau type d'analyseur, dit pyramidal, a été conçu.

2.1.2 L'analyseur pyramidal

L'analyseur pyramidal, inventé par Roberto Ragazonni en 1996 (Ragazonni. 1996 [Ragazzoni_1996]) s'inspire du test du couteau de Foucault, utilisé par les astronomes amateurs. La méthode d'analyse du front d'onde par pyramide remplace peu à peu le Shack-Hartmann en raison de sa plus grande sensibilité et de son échantillonnage sur le plan image beaucoup plus flexible. Ici, les micro-lentilles sont remplacées par une pyramide à quatre faces placée au point focal d'un système optique (téléscope/lentille). Cette pyramide, suivie d'une lentille de relais, va diviser le front d'onde incident en quatre pupilles de sorties numérotées 1 à 4. La somme des quatre pupilles redonne ainsi l'image de la pupille d'entrée. Dans le cas d'un front d'onde parfait avec des rayons convergents exactement à la pointe de la pyramide, ces quatre pupilles de sorties

seront d'intensités égales. Cependant, si la turbulence déforme le front d'onde et que les rayons ne convergent pas tous parfaitement à la pointe, l'intensité ne sera plus répartie également entre les pupilles. C'est de ces différences d'intensité que l'on déduit le gradient de la phase du front d'onde. L'autre particularité ingénieuse est d'effectuer une modulation c'est à dire des oscillations périodiques de la pyramide. Il a été prouvé que ces modulations permettent de linéariser la mesure du gradient de phase. Cependant, ce procédé entraîne une diminution de la sensibilité du dispositif. L'amplitude de modulation doit donc être assez petite pour gagner en linéarité, sans pour autant perdre beaucoup de sensibilité.

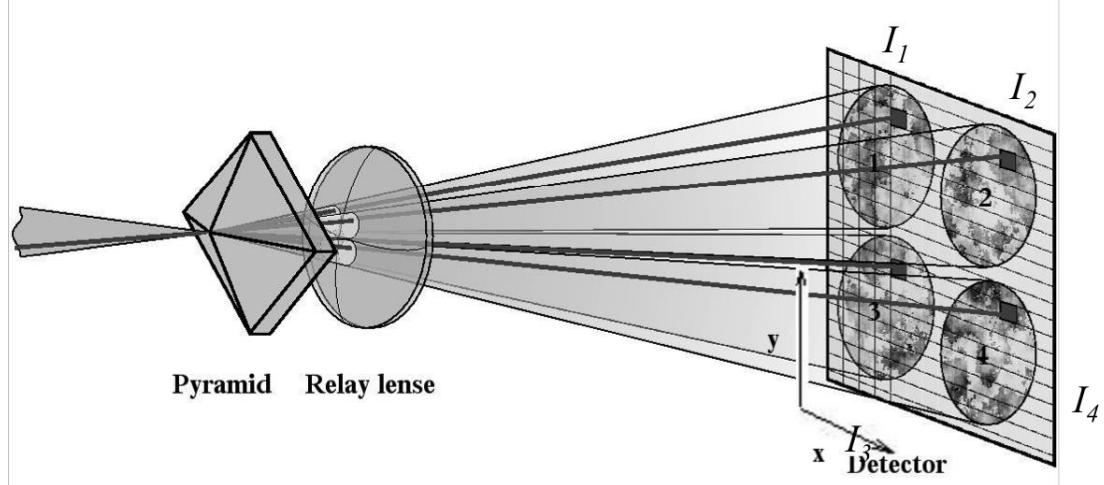


Figure 2: Schéma de l'analyseur pyramidal [Pazder_2017]

([Ragazzoni_1996]). Si on note A, B, C et D les 4 pupilles et (x, y) les coordonnées dans le plan image, W le front d'onde, δV la modulation et F la focale de la lentille de relais on obtient alors:

$$\frac{\partial W}{\partial x} = \frac{(I_A + I_B) - (I_C + I_D)}{I_A + I_B + I_C + I_D} \frac{F}{\delta V} \quad (1)$$

$$\frac{\partial W}{\partial y} = \frac{(I_A + I_C) - (I_B + I_D)}{I_A + I_B + I_C + I_D} \frac{F}{\delta V} \quad (2)$$

On voit clairement dans ces deux équations en quoi la focale de la lentille de relais et la modulation rentre en compte dans l'échantillonnage (i.e la taille des pupilles de sortie) et la sensibilité de l'analyseur. La sensibilité accrue de la pyramide est également un de ses points forts. Dans le cadre de ce projet, effectuer une modulation étant, de base, une option exclue en raison d'un coût trop élevé (miroir de modulation, électronique de synchronisation avec le détecteur, optiques de relais), le choix de l'utilisation d'une source étendue a été fait en remplacement d'une source ponctuelle modulée.

2.2 Une solution technique: deux prismes en toit

2.2.1 Matériel à disposition

On se propose de faire un état des lieux actuel du matériel disponible. Une représentation du montage est visible sur la figure 3.

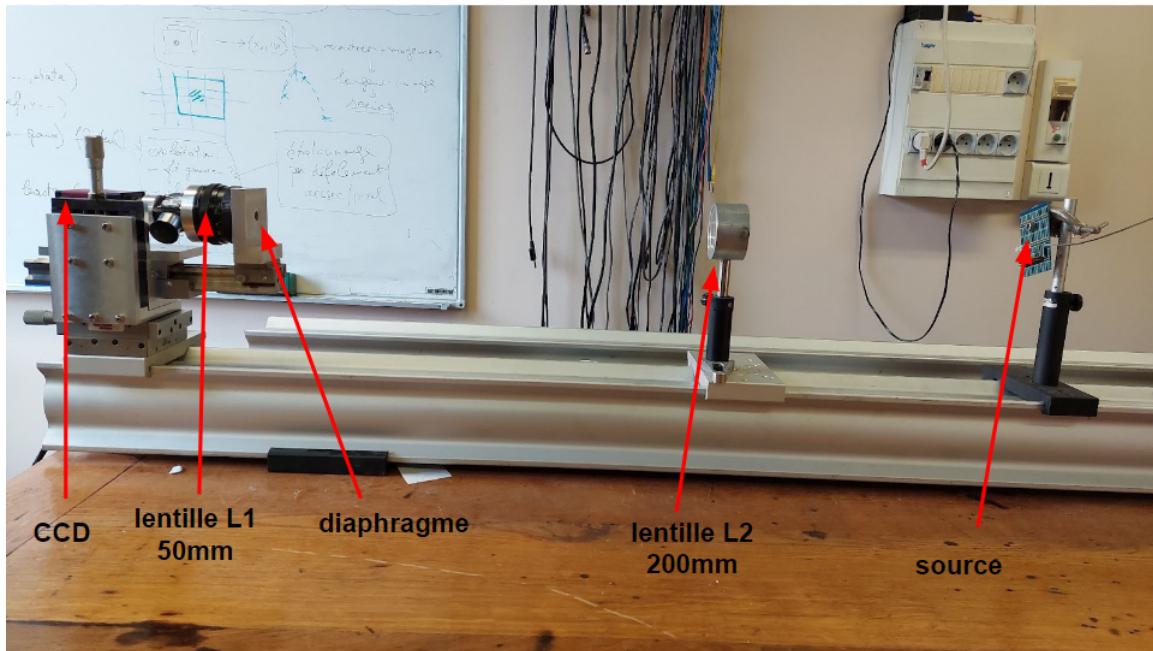


Figure 3: Prise de vue du montage actuel dans la salle de TP du télescope de 1 m.

Matériel à disposition (figure 3):

- Un banc optique d'une longueur d'environ 2 m
- Un détecteur type CCD de format 640×480 pixels, avec des pixels de dimension $7.4\mu\text{m}$, de chez Allied Vision, modèle Prosilica GE-680 [[GE_680_datasheet](#)].
- Une objectif d'appareil photo de focale $f_1 = 50$ mm qu'on notera L1. Cet objectif fait office de lentille de relais pour l'imagerie de la pupille sur la caméra.
- Un diaphragme de diamètre fixe $D = 7.2$ mm
- Un film transparent déformant le front d'onde
- Une lentille de focalisation de longueur focale $f_2 = 200$ mm qu'on notera L2
- Une source étendue de largeur $200 \mu\text{m}$, monochromatique, de longueur d'onde $\lambda = 0.65\mu\text{m}$
- D'un ordinateur équipé d'un logiciel d'affichage des données (logiciel 'maison' développé à l'Observatoire en python 3 et affichage PyQt pour les besoins des TP)
- Des câbles de connexion d'usage

Pour répondre à la contrainte de coût la réflexion a été adapté afin d'utiliser le matériel déjà existant. Néanmoins ce projet requiert les éléments supplémentaires ci dessous:

- 2 prismes en toit (voir section 2.2.3)
- Le support des prismes pensé et modélisé (voir section 3)

2.2.2 Avantages et dimensionnement

Principe du montage expérimental

Le design optique repose sur le principe introduit en fig.4. Les choix effectués sont explicités dans ce qui suit.

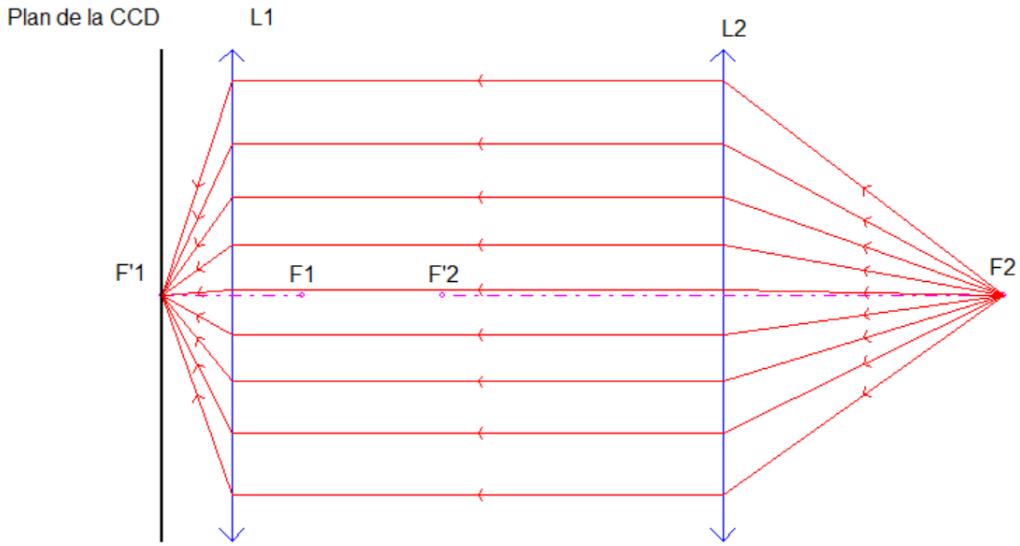


Figure 4: Schéma de principe du montage. En accord avec la fig.3 la direction de propagation de la lumière s'effectue de droite à gauche comme indiqué par les flèches présentes sur les rayons. Les deux lentilles et le plan de la CCD sont concentriques. Le plan objet est représenté par une source ponctuelle positionnée au point focal objet F_2 . Ce point particulier appartient au plan pupille du système. Les rayons tracés schématisent l'imagerie de la pupille.

On adopte les notations suivantes :

- Pour chaque calculs l'origine des positions est défini par rapport au système optique traversé, avec la partie positive dans le sens de propagation des rayons.
- x_{ob} : la position de l'objet
- x_{im} : la position de l'image
- f'_i : la distance focal de la lentille L_i , où $i \in 1, 2$

Pour s'affranchir des variations de champ introduits par les longueurs, le montage optique a été pensé de sorte à conjuguer le plan pupille positionné au point F_2 avec le plan du détecteur en F'_1 . En se plaçant dans le cadre de l'optique paraxiale, et faisant l'approximation de lentilles minces pour L_1 et L_2 , il est possible de montrer la conjugaison de ces plans. Pour cela on calcul la position de l'image de la pupille produite par la lentille L_2 :

$$\frac{1}{x_{im}} - \frac{1}{x_{ob}} = \frac{1}{f'_2}$$

$$\frac{1}{x_{im}} = \frac{1}{f'_2} + \frac{1}{x_{ob}}$$

pour $x_{ob} = -f'_2 = -200mm$ on trouve:

$$\frac{1}{x_{im}} \longrightarrow 0$$

soit $x_{im} \longrightarrow \infty$

L'opération est répétée avec L_1 , tels que l'image produite par la première lentille traversé devient l'objet:

$$\frac{1}{x_{im}} - \frac{1}{x_{ob}} = \frac{1}{f'_1}$$

$$\frac{1}{x_{im}} = \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{x_{ob}}$$

pour $x_{ob} \longrightarrow \infty$ d'où:

$$\frac{1}{x_{im}} = \frac{1}{f'_1}$$

soit $x_{im} = f'_1 = 50mm$

L'avantage majeur de ce type de montage est que quelque soient les composants optiques laissant l'image se former à l'infinie (comme les prismes en biseau, prismes en toit, pyramides ou rien) pouvant se trouver entre les deux lentilles de la fig4, et quelque soit la distance entre les deux lentilles, chaque point source du plan objet (x_{ob}, y_{ob}) sera focalisé sur le plan image du détecteur (x_{im}, y_{im}) .

La pseudo pyramide

Comme susmentionné, l'avantage majeur de l'utilisation de prismes en toit croisés plutôt qu'une pyramide est le coût de production qui est de plus de 10000 euros par pyramide. Cette différence vient de la nécessité de fabriquer la pointe de la pyramide de façon précise, problème n'intervenant pas pour des prismes en toit. L'équivalence de ce montage est démontrée dans Lozi et al. 2019 [[Lozi_2019](#)] et Van Kooten. 2017 [[Van_Kooten_2017](#)]. Les arêtes des toits doivent être positionnés à 90 degrés l'un de l'autre. La pointe de la pyramide se retrouve alors au point d'intersection apparent des deux arêtes des toits respectifs. Ces arêtes ne doivent pas entrer en contact afin d'éviter tout dommage. Cependant, elles doivent être assez proches l'une de l'autre pour ne pas s'éloigner du modèle de la pyramide. L'espacement des prismes sera discuté en partie 3.

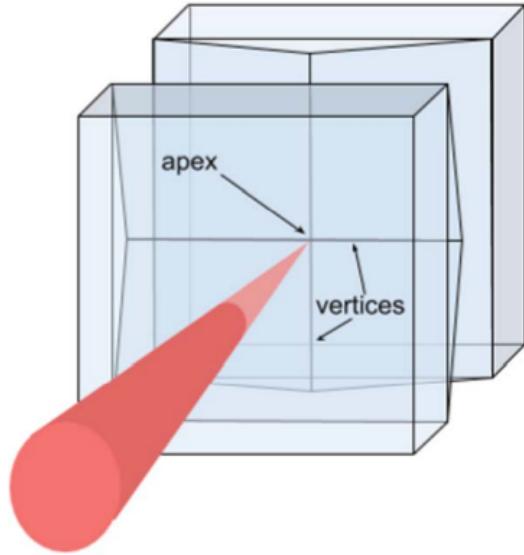


Figure 5: Schéma d'un analyseur pyramidal en double prisme [Lozi _ 2019]

Dimensionnement

Afin de répondre à la contrainte de coût imposé par le projet, il a été décidé de conserver l'ensemble des éléments existants. Pour réaliser une image de 4 pupilles circulaires, au maximum tangentes 2 à 2 i.e sans recouvrement, et restants dans le champs de la CCD, il a fallu adapter le montage à l'élément le plus coûteux: le détecteur. Positionné selon la fig4, on a pu déterminer son champ de vue (FOV) minimum (eq.3 et 4) et donc un diamètre angulaire maximum (eq.5) pour chaque pupille.

$$FOV_x = \frac{640 \cdot 7.4 \cdot 10^{-6}}{50 \cdot 10^{-3}} = 94.7 \text{ mrad soit } 5.43^\circ \quad (3)$$

$$FOV_y = \frac{480 \cdot 7.4 \cdot 10^{-6}}{50 \cdot 10^{-3}} = 71 \text{ mrad soit } 4.10^\circ \quad (4)$$

Cette grandeur indique le diamètre angulaire maximal, vu depuis L_2 , que doit avoir chacune des 4 pupilles sur le détecteur. On notera cette quantité γ_m .

$$\gamma_m = \frac{\min(FOV_x; FOV_y)}{2} = 2.05^\circ \quad (5)$$

En se référant à l'article [Lozi _ 2019] qui fournit la relation 6 entre γ_m , l'indice de réfraction du prisme n et l'angle au sommet des prismes en toit Φ , on parvient à dimensionner cet angle:

$$\gamma_m = \Phi \cdot (1 - n) \quad (6)$$

Comme on le verra plus tard dans le cahier des charges, le choix de la silice, un matériau optique classique, a été fait pour la production des prismes. Il possède un indice de réfraction $n = 1.456$ à $\lambda = 650\mu\text{m}$ d'où:

$$\Phi = \frac{\gamma_m}{|1 - n|} = \frac{2.05}{0.456} = 4.5^\circ \quad (7)$$

Pour obtenir les 4 pupilles circulaires sur l'écran, l'objet doit être de la même forme. C'est

pourquoi un diaphragme circulaire est positionné dans le plan objet. La conjugaison de ce montage permet de calculer le diamètre du diaphragme. Dans cette configuration le grossissement G s'exprime à partir du rapport des focales soit dans notre cas :

$$G = \frac{f_2}{f_1} = \frac{200}{50} = 4 \quad (8)$$

Étant donné la largeur du détecteur qui est de $l = 480 \cdot 7.4 \cdot 10^{-6} = 3.55\text{mm}$. On a finalement le diamètre du diaphragme $D = 4 * \frac{3.55}{2} = 7.10\text{mm}$. On justifie le facteur 0.5 par le fait d'une pupille doit occuper seulement la moitié de la largeur l .

2.2.3 Cahier des charges et commande

Après avoir réalisé le dimensionnement des prismes, il est apparu qu'aucun produit sur catalogue ne répondait aux attentes. Il a donc été décidé de faire réaliser les prismes par un fournisseur d'optique. Un cahier des charges contenant les spécifications en termes de dimensions, performances optique, matériau et conditions d'utilisation a été réalisé. Celui-ci a été transmis à divers fournisseurs optiques (voir tableau ci-dessous) fournissant un devis pour 2, 3 et 4 prismes. Les différents prix communiqués par les fournisseurs sont affichés dans le tableau ci-dessous. Les devis reçus sont fournis en annexe de ce rapport (figure 16). Pour comparaison avec le prix d'une pyramide, celles qui ont été commandées pour le prototypage de l'analyseur du module d'OA de l'instrument MICADO ont un prix unitaire variant entre 13000 et 20000 euros.

Notons que pour réduire le coût:

- ont volontairement été omis du devis tout test et rapport de tests sur les spécifications demandées (qualité de surface d'onde transmise, mesure des dimensions, etc) en accord avec notre responsable,
- les tolérances sur la précision de l'arête des toits ont été relâchée par rapport à ce qui aurait été requis pour un système opérationnel sur télescope.

	IOS Optics	Fichou	OPA-OPTICAD
Prix unitaire HT pour 2 prismes (euros)	1250	880	735.75
Prix unitaire HT pour 3 prismes (euros)	995	650	532.50
Prix unitaire HT pour 4 prismes (euros)	825	525	422.20

Table 1: Tableau résumant les montants des devis reçus pour les 3 sous-traitants sollicités

La décision de commander 4 prismes et non 2 seulement permet d'anticiper un risque de détérioration. Il y a aussi une volonté pédagogique de pouvoir faire manipuler un prisme par des étudiants qui réaliseront le nouveau TP OSAE. On veut avoir un prisme que l'on pourra "salir". En s'appuyant sur les prix proposés 1, une commande a été effectuée chez OPA-OPTICAD. Cependant, le délai annoncé d'au moins 6 à 8 semaines (souvent plus en pratique) sort largement des dates limites de ce projet. Le test de l'analyseur n'a donc pas pu être encore effectué.

OBSERVATOIRE DE PARIS

**Request for Quotation
Roof Prism**

ISSUE	DATE	SECTION/PARAGRAPH AFFECTED	REASON / INITIATION DOCUMENTS/REMARKS
1.0	2022.10.28	ALL	Creation
1.1	2022.11.17	3.1 2.1	Rephrase specs to be more detailed. Add contact.

1 Scope

This document describes the requirements for the manufacturing of some roof prisms components, as represented on fig 1. These components aim to realise the equivalent of a pyramidal wavefront sensor that will be used for experimental teaching for students at Paris Observatory.

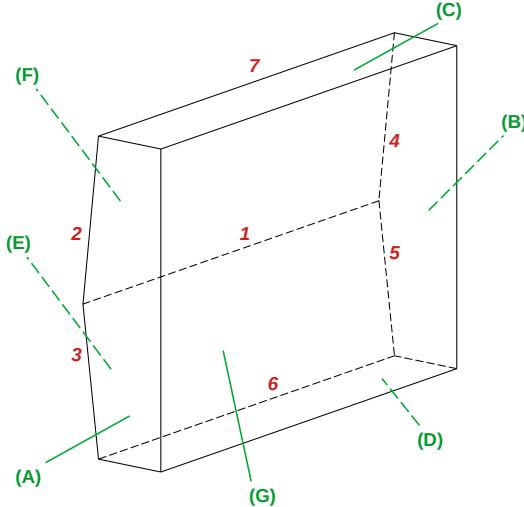


FIGURE 1 – Schematic view of the roof prism component

The supplier is responsible for the compliance with the optical requirements defined in section 3. He will deliver the quotation with a detailed description of the cost corresponding to the realization. No test report is expected. The provider shall deliver the component with no mechanical mount.

2 General information

2.1 Contacts

Any question about this document shall be sent to :

- eric.gendron at obspm.fr
- Valentin.Fleury at obspm.fr
- Tom.Piekarski at obspm.fr

2.2 Working parameters

All the requirements in this document are considered at a 20°C temperature, a 1 bar pressure and a ideal humidity rate between 40% and 70%.

2.3 Labelling and annotations

For these prisms, we use the labelling proposed in figure 2. The edge of the prism labelled (1) is formed by the faces (E) and (F). This edge is a critical detail of the component, because it is crossed by the light beam and it shall be as thin as possible (see SP 004). The lateral faces of the component are (A), (B), (C) and (D). The light goes through the (G) face first, defined as the front face, and goes out through both faces (E) and (F), depending on its incident inclination angle.

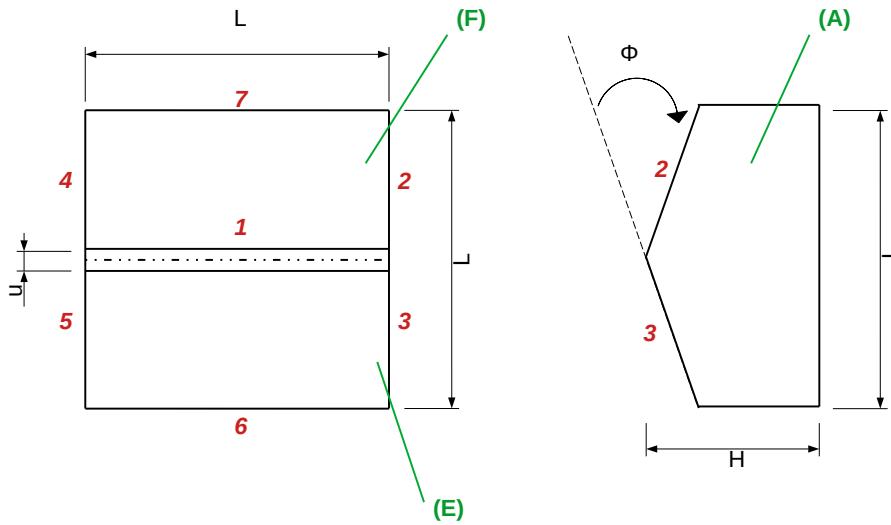


FIGURE 2 – *Left* : Back view of a prism. *Right* :Left cross-sectional view.

3 Requirements for the roof prism

3.1 Geometry

- SP 001 The angle Φ shall be equal to 5 degrees ± 2 arcminutes (this is the angle between face (E) and (F))
- SP 002 The base shall be square, with a width **L** that shall be equal to $25 \pm 0.1\text{mm}$
- SP 003 The thickness **H**, shall be equal to $10 \pm 0.1\text{mm}$
- SP 004 The edge (1) shall be as sharp as possible : its width shall be less than $u < 15\mu\text{m}$
- SS 005 The couples of faces (A)(B) and (C)(D) shall be parallel.

3.2 Optical Performance

- SP 006 The faces (E), (F), (G) shall be polished
- SP 007 The surface flatness of the faces (E), (F), (G) shall be better than 200 nm RMS
- SS 008 The faces (A), (B), (C), (D) may remain unpolished (frosted glass)
- SS 009 No coating is required.

3.3 Material

- SP 009 The roof prism shall be made of fused silica.

3 Monture mécanique pour l'analyseur

Maintenant que l'analyseur est conçu, il s'agit de l'intégrer au montage. Pour cela, un socle mécanique a été réalisé. Ce socle doit respecter les dimensions des prismes mais également du précédent montage mécanique, notamment la taille et la position du diaphragme. Il va être ici d'abord question de l'espacement entre les prismes, question que l'on ne se pose pas avec une pyramide. Ensuite, on abordera le dimensionnement du socle et ses autres particularités.

3.1 Espacement des prismes

Remplacer la pyramide par deux prismes en toit entraîne la focalisation du faisceau au point d'intersection des arêtes de leurs toits. Cette intersection représente en effet le sommet de la pyramide. Cependant, ces arêtes des prismes ne peuvent pas être en contact pour des raisons de dégradations du matériel. Il faut donc dimensionner une distance maximale z entre les deux toits à partir d'un critère bien défini, le problème étant de savoir lequel. Deux calculs distincts sont développés ci-dessous, qui correspondent à deux critères distincts, l'un s'appliquant au front d'onde et l'autre à la quantité physique de défocalisation. Il est montré finalement que ces deux critères reviennent au même.

3.1.1 Critère sur le front d'onde

On part dans cette situation de deux fronts d'onde sphériques avec une courbure légèrement différente tel que l'un focalisera à la distance focale f (sur l'une des arêtes), et l'autre à $f+z$ (sur l'autre arête). Un paramètre important, noté e est la valeur du front d'onde en bord de pupille. Cette distance caractérise la courbure du front, et varie en fonction du point où celui-ci focalise. On s'intéressera ici à mettre un critère sur l'écart de ces fronts d'ondes, écart caractérisé par la grandeur $A = e(f) - e(f+z)$. Il a été posé que cet écart doit être inférieur à $\lambda/4$ (critère de Rayleigh). La situation est schématisée sur la figure 6.

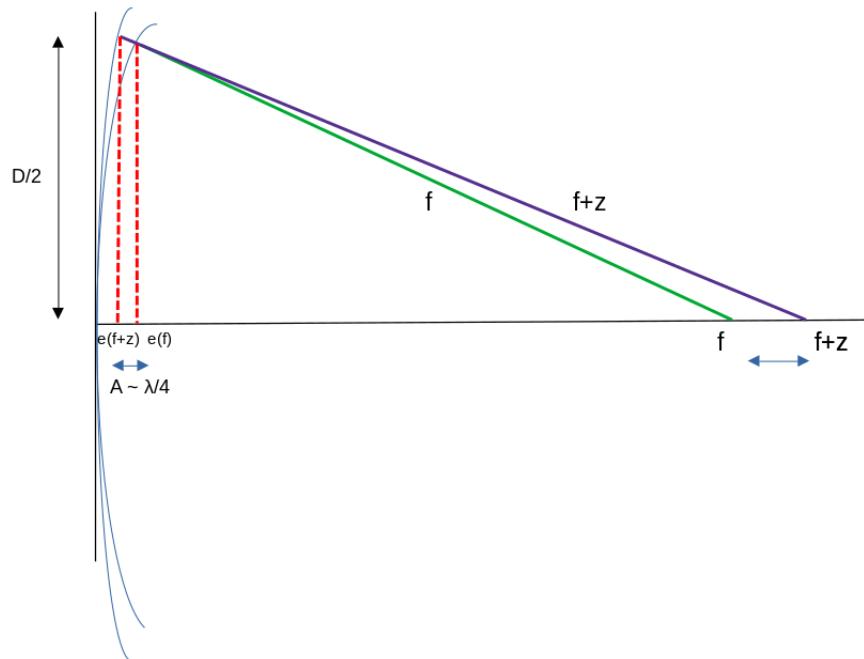


Figure 6: Espace entre les prismes: critère sur l'amplitude maximale, en bord de pupille, due à la différence de courbure des fronts d'onde

Il apparaît ici que:

$$(f + e)^2 = \left(\frac{D}{2}\right)^2 + f^2 \quad (9)$$

Étant donné que $e \ll f$, on a $(f + e)^2 \approx f^2 + 2e$ et donc:

$$\begin{aligned} f^2 + 2ef &= \left(\frac{D}{2}\right)^2 + f^2 \\ 2e &= \left(\frac{D^2}{4}\right) \\ e(f) &= \frac{D^2}{8f} \end{aligned} \quad (10)$$

La grandeur recherchée est $A = e(f) - e(f + z)$. L'écart z étant très petit devant f , $e(f + z)$ peut être approximé par développement de Taylor tel que $e(f + z) \approx e(f) + z\frac{\partial e}{\partial f}$.

Étant donné que $\frac{\partial e(f)}{\partial f} = -\frac{D^2}{8f^2}$:

$$A = e(f) - e(f + z) = z\frac{D^2}{8f^2} \quad (11)$$

On peut introduire ici le nombre d'ouverture $N = f/D$. Dans notre cas, avec un diaphragme de 7.1 mm pour une lentille de focale 200 mm, il vaut $N \approx 28$.

D'après le critère mentionné plus haut, il a été prescrit que $A \leq \frac{\lambda}{4}$. Il en résulte alors:

$$z \leq 8N^2 \frac{\lambda}{4} = 2N^2 \lambda \quad (12)$$

Ce critère donne $[z \leq 1\text{mm}]$ à $\lambda = 600 \text{ nm}$.

3.1.2 Critère sur la défocalisation du faisceau

Une autre condition pour limiter la distance entre les prismes, est que la défocalisation ne doit pas excéder la largeur de la tache de diffraction formée au point focal. La situation est schématisée sur la figure 7. Cela équivaut à une largeur de faisceau défocalisé de $L = \frac{\lambda f}{D}$.

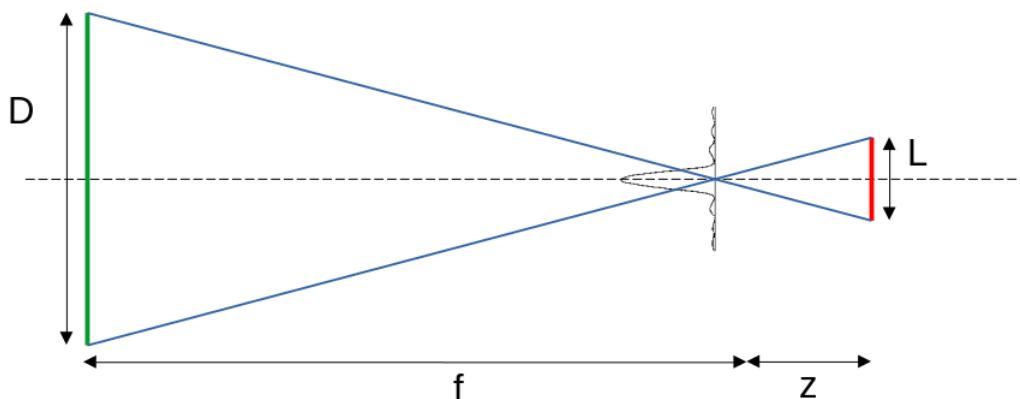


Figure 7: Espace entre les prismes: critère de defocus

Un théorème de Thalès plus tard, il apparaît que $z/L = f/D$ soit:

$$z = f \frac{\lambda f}{D^2} = \lambda N^2 \quad (13)$$

On obtient alors $z \approx 0.5\text{mm}$ à λ qui vaut 600nm .

3.1.3 Bilan

Les formules 13 et 12 sont les mêmes à un facteur 2 près. Ces deux critères apparemment différents sont en réalité équivalents, car ils comparent chacun une grandeur donnée à la longueur d'onde.

Dans un système destiné à un instrument, on pourrait s'inspirer des spécifications générales de l'instrument pour affiner notre critère et décider si nous devons opter pour $\lambda/4$ ou plutôt imposer $\lambda/20$. Mais dans le cas de notre TP, où la limite de diffraction n'est pas un critère strict (puisque une source étendue sera utilisée) et où l'aspect pratique et qualitatif prime, nous avons décidé en accord avec notre encadrant qu'un socle avec un espacement de 0.5 mm serait réalisé, validant les deux critères ci-dessus. Cela correspond à la fois à un critère assez strict, et à une tolérance assez large pour la réalisation mécanique.

Les autres spécifications techniques de la monture sont détaillées dans la section suivante 3.2.

3.2 Premier prototype

La nécessité de croiser les prismes pour former une pyramide apparente constitue déjà une première difficulté. Les prismes ne se feront pas face de manière symétrique. L'un aura son toit vertical et l'autre horizontal. Cela complexifie notamment l'ouverture pour leur insertion dans le socle. L'idée étant d'épouser également la forme du support du diaphragme (figure 8), un design sous la forme d'un cube/pavé creusé a été choisi. Dû à l'orthogonalité entre les arrêtes des toits respectifs, chaque prisme est inséré depuis une face différente: l'un depuis celle du haut, l'autre depuis celle de droite comme on le voit sur les figures 10 et 9. Enfin un perçage carré à travers toute la pièce a été réalisé pour le passage de la lumière. La monture a été réalisé en 3D sur le logiciel gratuit FreeCad.

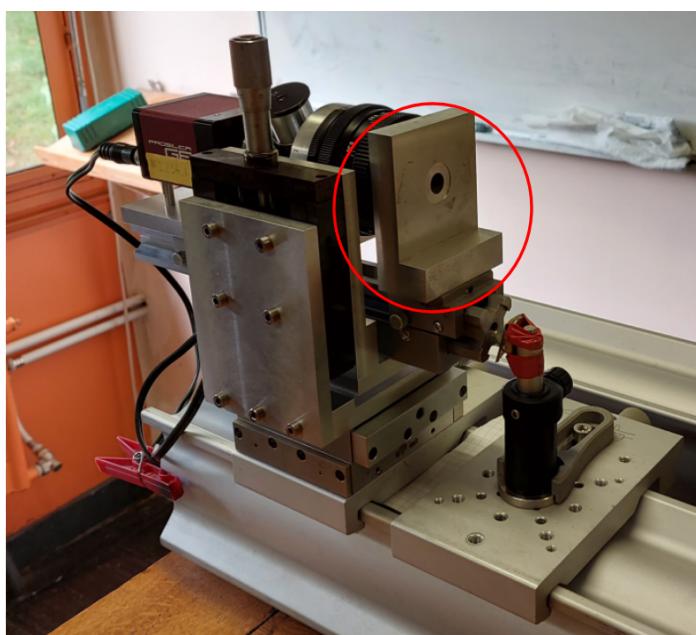


Figure 8: diaphragme avec sa monture (entourés en rouge) sur le banc du montage

Les dimensions du perçage pour les prismes prennent en compte aussi bien leurs dimensions décrites dans le cahier des charges (partie 2.2.3) que leur espacement (partie 3.1). La perforation carrée est dimensionnée en largeur et longueur selon le diamètre du diaphragme et sa localisation sur la face en fonction de la hauteur de celui-ci. Un ajout de matière vers le bas a été réalisé pour respecter l'alignement entre les prismes et le diaphragme lorsque leur montures respectives seront jointes.

Les dimensions précises du socles sont visibles dans le dessin technique fournit en annexe sur la figure 17. Celui-ci a été réalisé grâce à l'éditeur de dessin de FreeCad.

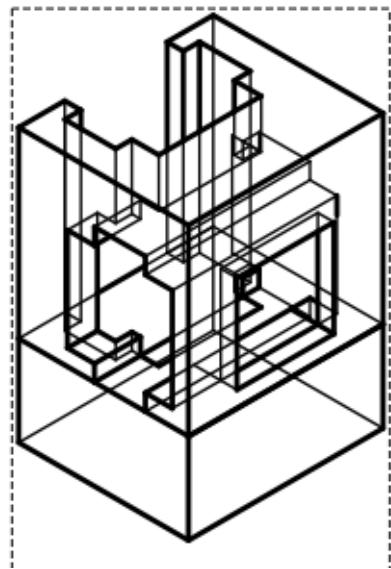


Figure 9: Vue isométrique filaire

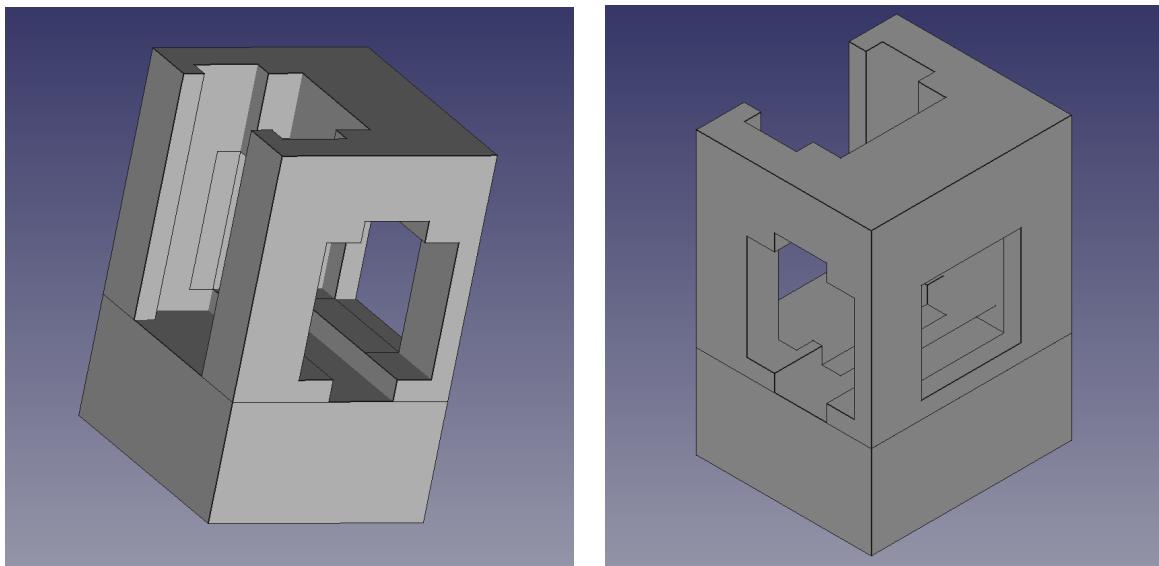


Figure 10: Vues 3D de la pièce réalisée: deux perçages dans les faces hautes et de droite ont été réalisé pour les prismes et un perçage carré sur la face arrière pour le passage de la lumière.

4 Simulation de la situation et de résultats

A ce stade du projet, un premier design a été proposé avec les solutions techniques apportées. Cela concerne le positionnement des différentes lentilles, des diaphragmes, de la caméra mais aussi des prismes et du détecteur. Ne pouvant vérifier le montage de façon expérimentale à cause du délais de livraison, l'initiative a été prise de réaliser une simulation numérique dans le but de:

- Valider le design proposé
- Fournir un outil pédagogique pour le TP

Actuellement le langage de programmation majoritairement enseigné et utilisé dans les études supérieures et le monde professionnel est Python. Nos compétences ainsi que celles des futurs utilisateurs justifie le choix de ce langage pour effectuer cette simulation.

4.1 Outils pédagogique

Le point de départ, comme pour le design est l'élément qui limite le champ d'ouverture, c'est à dire le détecteur. Après avoir introduit les différents paramètres de notre montage, les quatre pupilles peuvent être tracées sur l'écran. La position de leur centre et leur diamètre dépendent de la focale f_2 et de l'angle au sommet des prismes. Ainsi en faisant varier soit l'un ou l'autre de ces paramètres on peut vérifier la validité du design. De plus, cela apporte un outils pédagogique utile à compréhension de cet analyseur (fig.11 et fig.12). Dans ce premier travail, la décision d'imager seulement un bruit Gaussien a permis de se concentrer sur la mise en évidence de l'influence des paramètres.

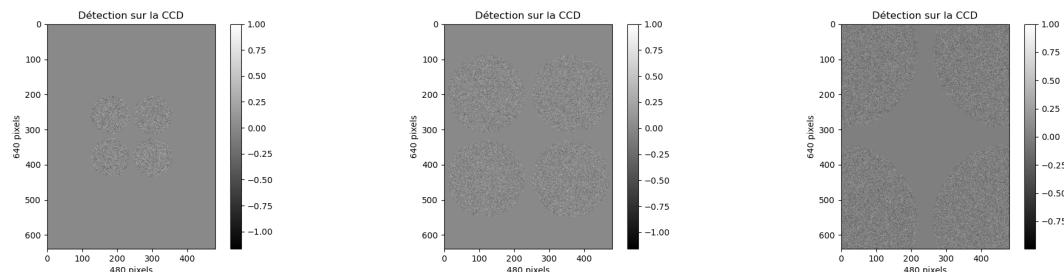


Figure 11: Détection en fonction de la distance d entre le détecteur et la lentille de focal $f = 50\text{mm}$. (A) En haut à gauche, lorsque $d < f$ la surface du détecteur n'est pas pleinement occupée, limitant la visualisation des résultats ainsi que leur résolution. (B) En haut à droite, $d = f$, de sorte que l'image couvre la plus grande partie du détecteur sans perdre d'information. (C) En bas, $d > f$ tels que le diamètres des pupilles sont plus élevés que précédemment, et les centres ont été translatés hors du détecteur suivant ses diagonales conduisant à une perte d'information.

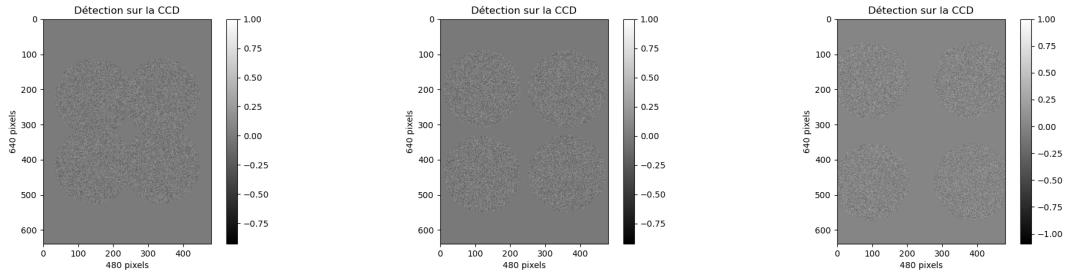


Figure 12: Détection en fonction de l’angle Φ des prismes en toits. (A) En haut à gauche lorsque $\Phi < 5^\circ$ les pupilles ne sont pas assez déviées ce qui crée leur recouvrement. (B) En haut à droite, on a $\Phi = 5^\circ$, de sorte que l’image couvre la plus grande partie du détecteur sans recouvrement ni débordement du champ hors du détecteur. (C) En bas, On a $\Phi > 5$ tels que la déviation soit trop importante conduisant à une perte d’informations par débordement.

4.2 Simulation de résultats

L’ambition de ce second code est de représenter les quatre pupilles issues de la déviation par la pyramide des faisceaux d’un front d’onde perturbé. On supposera alors le système optique dans les conditions optimales susmentionné. Pour réaliser cette simulation, on se donne un objet, avec un flux connu et arbitraire. Une représentation de ce dernier est proposé sur la fig.13-gauche. On peut donc calculer le flux cumulé de cet objet suivant les deux dimensions (voir fig.13-droite)

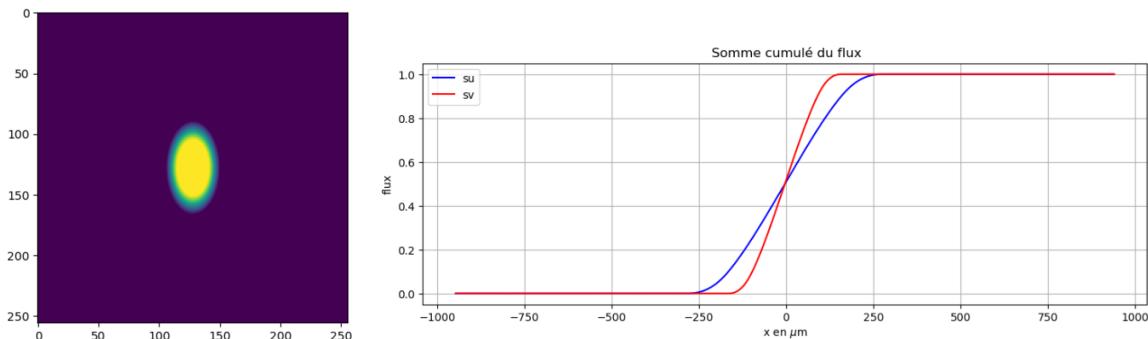


Figure 13: Gauche: la simulation de l’objet. Droite: les courbes rouge et bleu représentent respectivement la somme cumulée normalisée du flux de l’objet suivant l’axe x et y. Indépendamment de l’axe considéré, le flux incident total $\phi_i = 1$.

La rencontre du front d’onde émis par cet objet avec le front d’onde atmosphérique va entraîner sa déformation. N’ayant aucune hypothèse sur la nature de la déformations introduite, il a été décidé de modéliser le front d’onde avec, en chaque point du champs, un terme de phase pseudo-aléatoire. Le résultat de notre modélisation est présenté en fig.14

Dès lors, le calcul de la dérivée dans les deux dimensions du front d’onde incident donne l’angle avec lequel chaque faisceau frappe le plan orthogonal à l’axe optique au sommet de la pyramide. Comme la distance entre la lentille d’entrée et ce plan est fixé, on établit la position d’impact de chaque faisceau dans ce même plan. En fonction des coordonnées d’impact (u, v) , la pyramide dévierà le faisceau dans un des quatre quadrants du détecteur (A, B, C, D) .

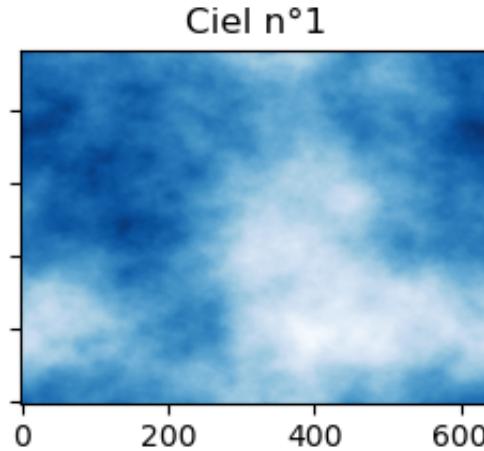


Figure 14: Modélisation du front d'onde incident. Les zones sombres (clairs), peuvent être associées à un retard (avance) de phase.

En considérant la conservation de l'énergie entre l'entrée et la sortie du système optique, l'énergie transportée par le front d'onde déformé (fig.14) doit être entièrement retrouvée sur le détecteur. Ainsi par une opération d'interpolation, on associe à chaque position (u_i, v_i) une quantité de flux lumineux qui se retrouve dans l'un des quadrants. Autrement dit la somme du flux de chaque quadrant : $\phi_A + \phi_B + \phi_C + \phi_D$ doit être égale au flux incident $\phi_i = 1$. Finalement en prenant en compte le diaphragme d'entrée de notre système on aboutit à la formation de quatre pupilles sur le détecteur (fig.15).

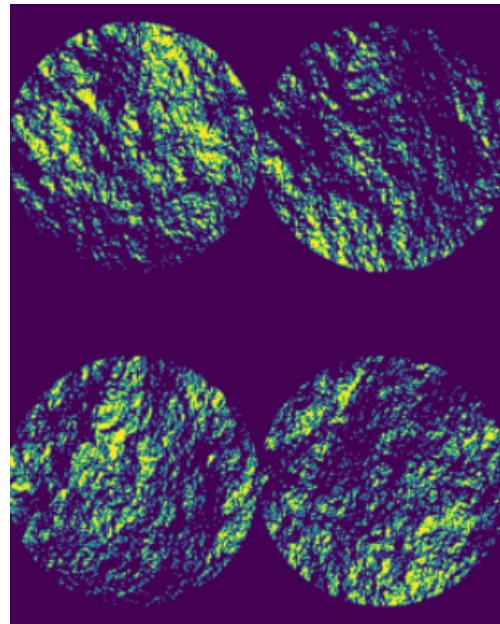


Figure 15: Illustration des pupilles créées observées sur le détecteur

En remarque, on peut ajouter que les résultats de l'expérience du couteau de Foucault peuvent être retrouvés en additionnant le flux des pupilles deux à deux. Par exemple la somme des deux pupilles de la partie supérieure du CCD sur la fig.15 est l'exact opposé de la somme des deux pupilles inférieures en terme de flux reçu par pixel.

5 Conclusion

L'analyseur pyramidale est maintenant utilisé dans la plupart des systèmes d'optique adaptative. Le Master OSAE a donc décidé de remplacer l'analyseur Shack-Hartmann utilisé pour les travaux pratiques par ce système plus récent.

Ce projet a abouti à un concept d'analyseur pyramidale basé sur deux prismes en toit; une solution bien moins coûteuse qu'une pyramide classique. Pour l'intégrer au montage, une monture mécanique a été réalisée en 3D. Cependant, les délais de fabrication et de livraison des prismes n'ont pas encore permis de tester l'analyseur sur le banc de travaux pratique. Une simulation numérique basé sur les dimensions de l'analyseur et des autres éléments du montage permettent cependant de visualiser les résultats attendus quand à la caractérisation d'un front d'onde déformé par la turbulence.

Ce projet a constitué une très belle expérience. Voulant travailler dans l'instrumentation optique, aborder le sujet de l'analyseur de front d'onde et de son usage en optique adaptative a été très stimulant. Outre les compétences optiques, l'apprentissage de la théorie de l'analyseur et sa mise en pratique sur le montage ont été essentiel pour réaliser la simulation numérique. Nous avons également du allier optique et mécanique pour répondre au problème d'espacement des prismes lors de la conception de la monture de l'analyseur. Enfin la rédaction d'un cahier des charges et la nécessité d'échanger avec les fournisseurs d'optiques ont constitué une bonne opportunité d'appréhender ce qui sera plus tard quotidien dans notre travail d'ingénieur.

Remerciements

Nous voudrions remercier chaleureusement Eric Gendron qui nous a guidé et accompagné durant tout ce projet. Ses explications et sa disponibilité ont été d'une grande aide durant tout le déroulé de ce travail. Nous remercions également le Master OSAE qui nous a permis de travailler sur ce concept d'analyseur pyramidale qui nous était inconnu. Les compétences acquises durant tout le déroulement du projet ne seront pas de trop durant notre vie professionnelle.

6 Annexe

6.1 Devis des fournisseurs

Quote 1052

Observatoire de Paris
Tom Pekarski
Tom.Pekarski@obspm.fr

BILLING SHIPPING
PAYMENT TERMS Pre-pay

PRODUCT
ROOF PRISM
Fused Silica Roof Prism 25mm x 10mm ; Total roof angle 5 degrees
- Faces E, F & G polished ; Faces A, B, C & D unpolished - No Coating
QTY 2 - \$1250.00 / Piece
QTY 3 - \$995.00 / Piece
QTY 4 - \$825.00 / Piece
LEAD TIME 6-8 Weeks
NRE
Tooling Fee



QUOTED EXPIRATION
11/11/2022 12/7/2022

METHOD
PREPAY & BILL

Total \$2,995.00



OBSERVATOIRE DE PARIS

A l'attention de M. Pekarski Tom
51 Avenue de l'Observatoire
75014 PARIS
France

Tel : 01 40 51 22 21
Email : tom.pekarski@obspm.fr

Devis N° 4103																																																																					
Date	Votre Référence																																																																				
14/11/2022																																																																					
Condition de port																																																																					
Condition de Règlement																																																																					
VIREMENT À 30 JRS NET																																																																					
Madame, Monsieur,																																																																					
Nous vous remercions pour votre consultation et vous communiquons ci-après notre meilleure proposition pour la réalisation de :																																																																					
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Référence</th> <th>Pièce / Désignation</th> <th>Quantité</th> <th>PU HT</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F105689</td> <td>ROOF PRISM SILICA FUSÉE 25X25X10 MM</td> <td>2</td> <td>880,00 €</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>3</td> <td>880,00 €</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>4</td> <td>925,00 €</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Spécifications :</td></tr> <tr> <td colspan="2">Matière : JGS1</td></tr> <tr> <td colspan="2">Dimensions : 25x25x10 ± 0,1 mm</td></tr> <tr> <td colspan="2">Planéité Faces E-F-G : RMS < 200nm</td></tr> <tr> <td colspan="2">Qualité de surfaces :</td></tr> <tr> <td colspan="2">(A) : 10 arcmin ± 0,25</td></tr> <tr> <td colspan="2">- Faces A-B-C-D : Non polies (Frosted glass)</td></tr> <tr> <td colspan="2">Parallélisme des faces : < 10 arcmin</td></tr> <tr> <td colspan="2">Déviation du faisceau : < 10 arcmin</td></tr> <tr> <td colspan="2">Tolérance angulaire : 5° ± 2 arcmin</td></tr> <tr> <td colspan="2">Précision de position : < 10 arcmin</td></tr> <tr> <td colspan="2">Pépendicularité : < 10 arcmin</td></tr> <tr> <td colspan="2">Zone utile : > 90%</td></tr> <tr> <td colspan="2">Dimensions :</td></tr> <tr> <td colspan="2">- (1) : Bords vif width < 15µm</td></tr> <tr> <td colspan="2">- Other : Protected</td></tr> <tr> <td colspan="2">Durée de vie : 10 ans</td></tr> <tr> <td colspan="2">Périodicité de contrôle : < 10 arcmin</td></tr> <tr> <td colspan="2">Zone utile : > 90%</td></tr> <tr> <td colspan="2">Dimensions :</td></tr> <tr> <td colspan="2">- (1) : Bords vif width < 15µm</td></tr> <tr> <td colspan="2">- Other : Protected</td></tr> <tr> <td colspan="2">Délais : 8-9 Semaines</td></tr> <tr> <td colspan="2">Offre suivie par Volzenloget Enzo</td></tr> <tr> <td colspan="2">FP01-05 FRAIS DE PORT</td></tr> <tr> <td colspan="2">1 37,00 €</td></tr> </tbody> </table>		Référence	Pièce / Désignation	Quantité	PU HT	F105689	ROOF PRISM SILICA FUSÉE 25X25X10 MM	2	880,00 €			3	880,00 €			4	925,00 €	Spécifications :		Matière : JGS1		Dimensions : 25x25x10 ± 0,1 mm		Planéité Faces E-F-G : RMS < 200nm		Qualité de surfaces :		(A) : 10 arcmin ± 0,25		- Faces A-B-C-D : Non polies (Frosted glass)		Parallélisme des faces : < 10 arcmin		Déviation du faisceau : < 10 arcmin		Tolérance angulaire : 5° ± 2 arcmin		Précision de position : < 10 arcmin		Pépendicularité : < 10 arcmin		Zone utile : > 90%		Dimensions :		- (1) : Bords vif width < 15µm		- Other : Protected		Durée de vie : 10 ans		Périodicité de contrôle : < 10 arcmin		Zone utile : > 90%		Dimensions :		- (1) : Bords vif width < 15µm		- Other : Protected		Délais : 8-9 Semaines		Offre suivie par Volzenloget Enzo		FP01-05 FRAIS DE PORT		1 37,00 €	
Référence	Pièce / Désignation	Quantité	PU HT																																																																		
F105689	ROOF PRISM SILICA FUSÉE 25X25X10 MM	2	880,00 €																																																																		
		3	880,00 €																																																																		
		4	925,00 €																																																																		
Spécifications :																																																																					
Matière : JGS1																																																																					
Dimensions : 25x25x10 ± 0,1 mm																																																																					
Planéité Faces E-F-G : RMS < 200nm																																																																					
Qualité de surfaces :																																																																					
(A) : 10 arcmin ± 0,25																																																																					
- Faces A-B-C-D : Non polies (Frosted glass)																																																																					
Parallélisme des faces : < 10 arcmin																																																																					
Déviation du faisceau : < 10 arcmin																																																																					
Tolérance angulaire : 5° ± 2 arcmin																																																																					
Précision de position : < 10 arcmin																																																																					
Pépendicularité : < 10 arcmin																																																																					
Zone utile : > 90%																																																																					
Dimensions :																																																																					
- (1) : Bords vif width < 15µm																																																																					
- Other : Protected																																																																					
Durée de vie : 10 ans																																																																					
Périodicité de contrôle : < 10 arcmin																																																																					
Zone utile : > 90%																																																																					
Dimensions :																																																																					
- (1) : Bords vif width < 15µm																																																																					
- Other : Protected																																																																					
Délais : 8-9 Semaines																																																																					
Offre suivie par Volzenloget Enzo																																																																					
FP01-05 FRAIS DE PORT																																																																					
1 37,00 €																																																																					

Date limite de validité : 26/12/2022

Proposition soumise à nos Conditions Générales de Vente disponibles sur demande et sur notre site internet www.optique-fichou.com

Page 1/1

Last Modified 11/10/2022 1:21:28 PM By Dino Valencia

Powered By

Optique de Précision J.FICHOU - 11 rue Louise Bourgeois - 94260 FRESNES - FRANCE

Tel : 01 46 66 15 18 - Email : optiquefichou@optiquefichou.fr

RCS Creteil 692 045 404 - NAF 2670Z - Siret 692 045 404 00021 - N° TVA : FR28982045404



13 avenue des Meuniers
60330 Le Plessis Belleville
Tél : +33 (0)3 44 99 08 74
Courriel : contact@opa-opticad.com

Observatoire de Paris - Master OSAE
11 avenue Marcelin Berthelot
Bâtiment des Comuns (UFE)
92195 MEUDON
France

Devis n° D2211039

18/11/2022

Nous vous remercions pour votre demande de devis et vous prions de trouver ci-dessous nos meilleures conditions.

Référence
M. Pekarski

Représentant
Abdelhak
Courriel s.abdelhak@opa-opticad.com

Référence	Désignation	Qté	Pu	Remise	Pu HT	Montant HT
POL2	A l'attention de Monsieur Pekarski Prisme en toit en silice 25x25x10 +/-0,1mm angle 5° +/-2arcmin	2	735,75		735,75	1 471,50 EUR
POL2	Prisme en toit en silice 25x25x10 +/-0,1mm angle 5° +/-2arcmin	3	532,50		532,50	1 597,50 EUR
POL2	Prisme en toit en silice 25x25x10 +/-0,1mm angle 5° +/-2arcmin Date de commande suivant planning de production Congés de Noël : du 23/12 au 02/01/23 inclus.	4	422,20		422,20	1 688,80 EUR

4 757,80 EUR

TVA en sus : 20 %

Prix forfaitaire Port & Emballage en sus, 35€ HT par carton, sauf conditions particulières.
- Conditions de paiement : 30 jours nets par virement.
- Minimum de commande : 300€ HT. Valida de l'offre : 1 mois.
Nous restons à votre disposition pour tout renseignement complémentaire et dans l'attente d'une éventuelle commande, nous vous prions de croire, Madame, Monsieur, à l'expression de nos sentiments les meilleurs.

Nos conditions générales de vente et de livraison sont disponibles sur demande et font partie intégrante de cette offre.
Sarl au capital de 76225€ - R.C.S. Compiegne - SIRET 380 046 342 00040 - APE 2670Z
n° TVA intracm. : FR68 380 046 342 - TVA acquittée sur les débits - [http://www.ope-opticad.com](#)

Figure 16: Devis des fabricants pour la manufacture des prismes en toit

6.2 Monture mécanique pour l'analyseur: Dessin technique

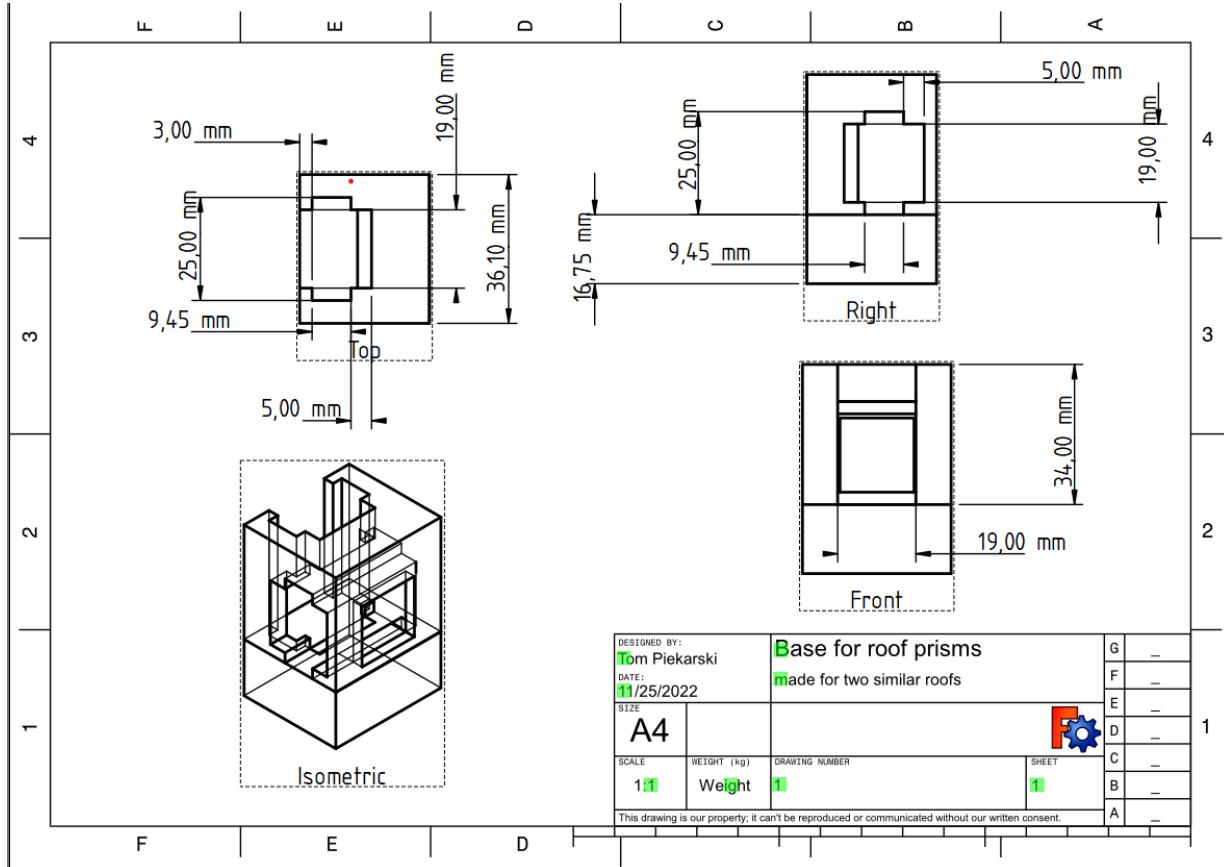


Figure 17: Dessin technique du socle des prismes