

Miroirs actifs pour la sélection de cible en astronomie

Un des domaines privilégiés de l'Optique Active est l'opération *in situ* lors des observations, permettant de stabiliser une pupille ou une image et d'en améliorer la qualité. Si les systèmes actifs actuels permettent de maintenir une forme fixe dans les télescopes tels que le NTT ou le VLT, il existe des composants actifs dont la surface varie avec une grande dynamique. Les composants actifs présentés dans ce chapitre ont été développés dans le cadre de la phase A de l'instrument EAGLE, proposé comme spectrographe grand champ multi objet pour l'E-ELT (Sec.1).

Après avoir abordé les perspectives scientifiques et présenté les fonctions de l'instrument (Sec.2), nous étudions et présentons les possibilités de réalisation un *Beam Steering Mirror* à toricité variable par déformation mécanique, potentiellement à focale variable et/ou à toricité variable et orientable. Ce type de miroirs actifs permettrait de remplacer une combinaison de plusieurs miroirs en remplissant plusieurs fonctions simultanément (Sec.3).

Les études mécaniques sont menées à partir des équations analytiques puis validées par FEA (Sec.4). On obtient des déformations astigmatiques et paraboliques de plusieurs dizaines de microns pour une qualité optique de $\lambda/10$. Un prototype de BSM à quatre forces est en cours de polissage, tandis que son système de déformation est en cours d'intégration et de test. En fin de chapitre, un concept de *Smart Beam Steering Mirror* utilisant un nombre minimal d'actionneurs est développé et validé sur un prototype (Sec.5).

4.1 Perspectives cosmologiques à l'ère des ELTs

Les enjeux cosmologiques des futurs ELTs, l'Univers à haut redshift et l'assemblage de la masse des galaxies, sont fondamentaux pour comprendre les origines de l'univers et les processus qui ont donné naissance aux étoiles et planètes. Certaines théories présumant que la formation des premiers objets qui ont peuplé l'univers à la sortie des Âges Sombres, environ 300 millions d'années après le Big Bang, aurait permis sa ré-ionisation, le rendant transparent. La nature et l'évolution des objets primordiaux restent encore des domaines contenant peu de données observationnelles, du fait des difficultés posées par les limites technologiques actuelles.

Les récentes observations du fond diffus cosmologique permettent de situer l'époque de ré-ionisation entre $z = 7$ et $z = 13$ [Page *et al* 2006], correspondant au premier milliard d'années de l'univers. Cependant beaucoup de questions restent ouvertes. Comment s'est déroulé ce processus, quels sont les objets qui y ont contribué? Certains scénarios prédisent que les premières étoiles étaient très massives et très chaudes

du fait de la faible teneur en éléments lourds dans l'univers. Le fort rayonnement UV de ces premiers objets aurait entamé la ré-ionisation du milieu intergalactique. Dépasser la barrière de $z = 7$ pour observer et caractériser les galaxies primordiales demande d'une part une grande surface collectrice du fait de leur faible magnitude, d'autre part une grande résolution spatiale du fait de leur éloignement. Enfin, une grande résolution spectrale est nécessaire pour la caractérisation des objets.

Si le télescope spatial JWST permettra d'imager des galaxies jusqu'à $z = 20$, ses performances spectroscopiques n'iront pas au delà de $z = 10$ et devront être secondées par l'instrumentation au sol. Les observations au sol à haut redshift nécessitent des résolutions angulaires de quelques 50-100 milli-arcsecondes, avec un échantillonnage spatial de 10x10 pixels sur l'image. De plus il faut atteindre une résolution spectrale de 4000 à 8000 afin de pouvoir supprimer les raies OH de l'atmosphère. Plusieurs études d'instruments spectroscopiques sont en cours sur les trois projets ELTs actuels : NIRMOS¹ au GMT, IRMOS² sur le TMT et maintenant EAGLE³ pour l'E-ELT [Moretto *et al* 2007], qui découle des études menées dans le cadre de OWL⁴ avec MOMFIS⁵ [Cuby *et al* 2005] et pour l'ELT Design Study avec WFSPEC⁶ [Moretto *et al* 2006].

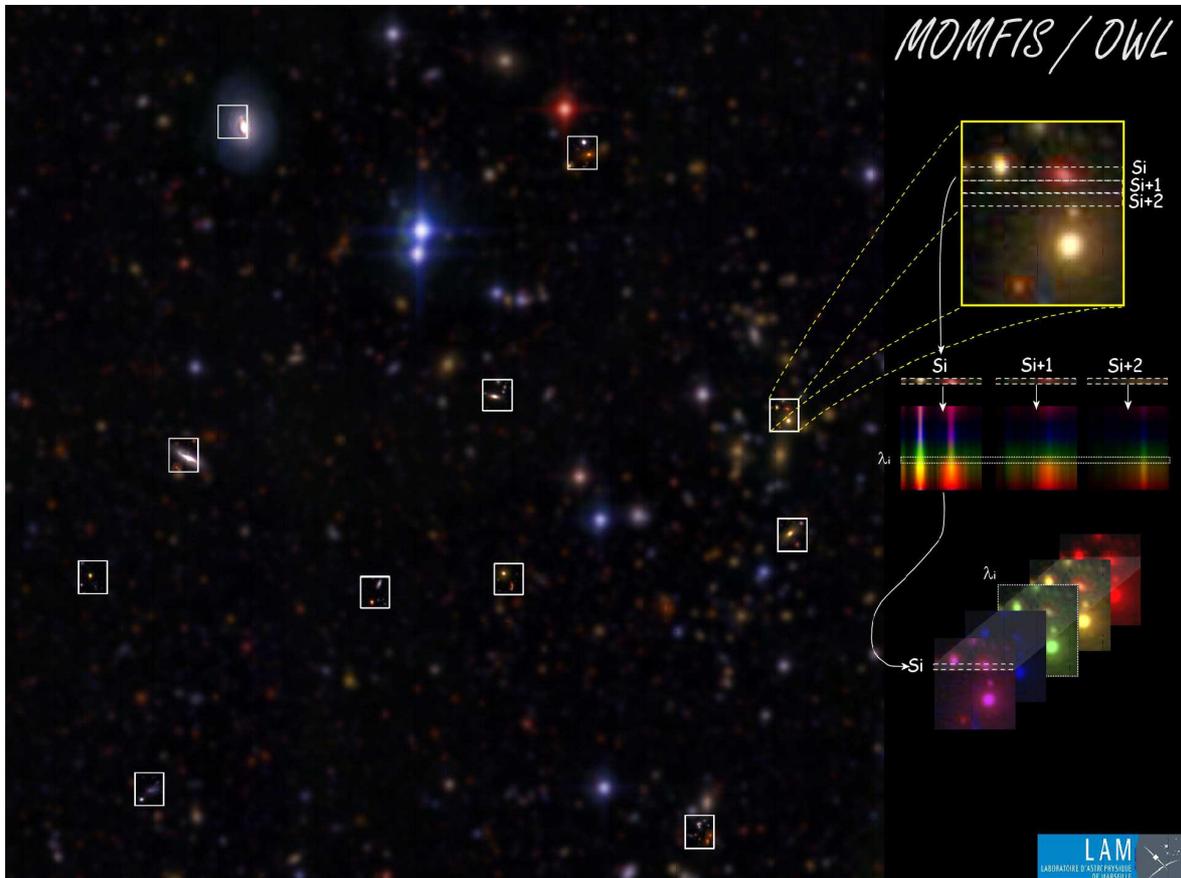


FIG. 4.1 – Principe de fonctionnement d'un spectrographe Multi objets.

¹NIRMOS : Near Infra Red Multi Object Spectrograph

²IRMOS : Infra Red Multi Object Spectrograph

³EAGLE : ELT Adaptive optics for GaLaxy Evolution

⁴OWL telescope : Over Whelmingly Large telescope, ex-E-ELT

⁵MOMFIS : Multi Object Multi Field Imaging Spectrograph

⁶WFSPEC : Wide Field SPECTrographs

4.2 Le Beam Steering Mirror dans EAGLE

Un instrument tel qu'un spectrographe grand champ pour l'analyse multi objet est constitué de divers sous-systèmes correspondants à des fonctions précises. Pour chaque sous-système, plusieurs technologies peuvent être envisagées pour remplir les objectifs fixés par la science. L'utilisation de miroirs actifs est non seulement une solution élégante mais elle présente en outre de nombreux avantages à la fois technologiques et scientifiques en remplissant plusieurs fonctions en une seule surface. Les spécifications sur le miroir actifs sont étroitement reliées aux autres sous-systèmes avec lesquels il interagit directement ou indirectement.

4.2.1 Principe de Multi-IFU

L'instrument EAGLE est basé sur le principe de Multi-IFU⁷ qui peut être divisé en trois sous-systèmes principaux : un Système de Sélection de Cible (TAS⁸), un module d'Optique Adaptative, et un module Spectrographe à Intégrale de Champ (IFU). Plusieurs canaux identiques et indépendants sont disposés autour du plan focal de l'ELT, permettant d'étudier simultanément le spectre d'objets sélectionnés dans un champ élargi (> 5 arcminutes). Ce principe est illustré sur la figure 4.1. A ce stade de la réflexion sont principalement ressorties, pour chaque sous système, les fonctions à remplir et les points critiques à surmonter. Plusieurs propositions et prototypes sont en cours.

Target Acquisition System La porte d'entrée du TAS est un miroir de sélection (POM⁹) de faible dimension qui doit être placé à la position des objets scientifiques sur le plan focal du télescope afin de rediriger le faisceau vers le train optique. Différentes technologies sont proposées pour les POM, suivant qu'ils soient fixes ou mobiles dans le plan focal, et orientables ou non. Le système de sélection de cible a fait l'objet de plusieurs développements basés sur différents concepts : le *fixed path compensation* ou concept à bras (solution choisie sur VLT KMOS [Sharples *et al* 2002, Ramsay Howat *et al* 2002]), et le *variable path compensation* basé sur les miroirs de direction (BSM¹⁰) (proposé sur TMT T1P1 [Ellis R. *et al* 2005]).

Adaptive Optics L'implémentation de l'AO dans l'instrument dépendra des capacités de correction grand champ que peuvent atteindre les différents principes d'AO. La MOAO permettrait une très bonne correction localisée sur des objets sélectionnés dans un très grand champ, impliquant un fonctionnement en boucle ouverte. La reconstruction tomographique est un point clé dans la faisabilité de ce concept et a fait l'objet de récentes études [Neichel *et al* 2007]. D'autres concepts sont apparus depuis le succès de la MCAO, basés sur la correction de boucle fermée de plusieurs sous-champs divisant le champ total. On parle de multi-MCAO.

Integral Field Unit Plusieurs possibilités sont encore à l'étude autour du spectrographe à intégrale de champ, basé sur la technologie de découpage de champ ou *slicers* [Prieto *et al* 2000]. On citera notamment la possibilité d'utiliser des optiques très asphériques générées à partir de Miroirs Déformables MultiModes (MMDM) [Lemaître & Duban 2001] permettant de réduire le nombre de surfaces optiques. Cette solution pourrait améliorer l'efficacité des IFU d'environ 20% ainsi que leur compacité [Cuby *et al* 2006].

4.2.2 Le BSM comme composant clé

Une solution élégante proposée pour le TAS utilise des BSM actifs permettant de corriger les variations toriques d'un train optique variable : la figure 4.2 présente le principe d'un canal, et l'intégration dans un instrument complet. Un système de positionnement place des POM au niveau des objets scientifiques d'intérêt sur un plan focal d'environ 1m de diamètre, correspondant au champ de 5 arcmin de l'E-ELT.

⁷IFU : Integral Field Unit

⁸TAS : Target Acquisition System

⁹POM : Pick Off Mirror

¹⁰BSM : Beam Steering Mirror

Chaque POM renvoie le faisceau de l'objet sur un BSM actif. Le BSM se déforme selon une surface torique, afin de corriger des aberrations hors axe et ré-image la pupille sur un miroir déformable qui corrige de la perturbation atmosphérique locale. L'image sélectionnée et corrigée est ensuite renvoyée à l'entrée de l'IFU.

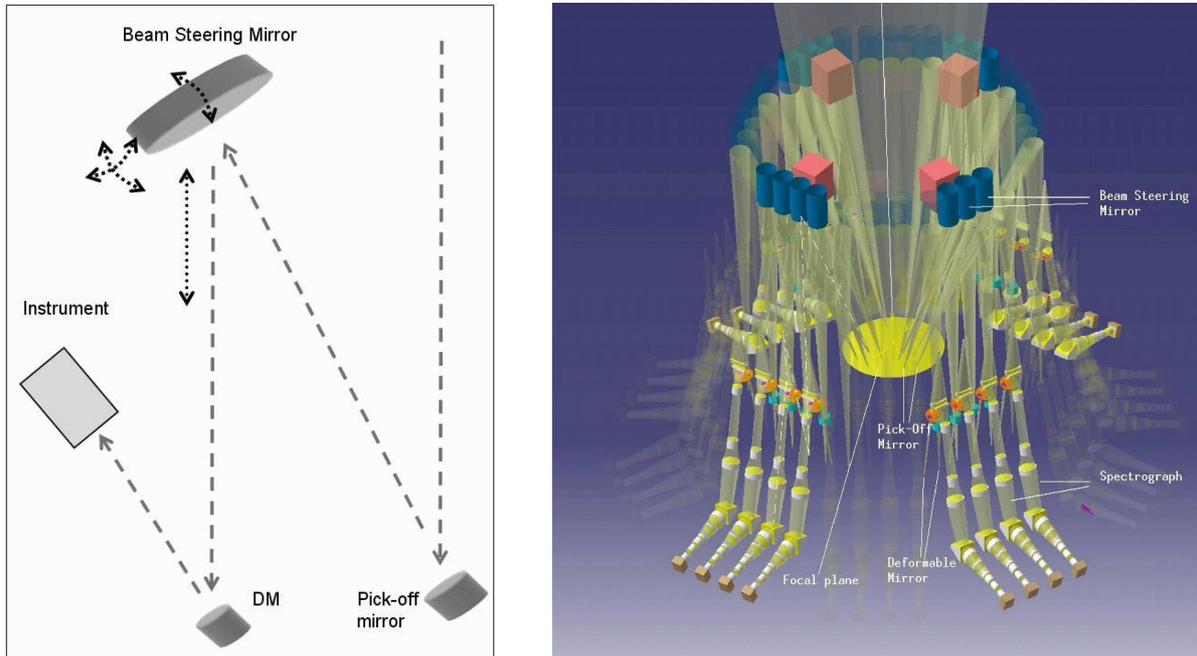


FIG. 4.2 – *Gauche* : principe du cheminement optique dans un des canaux. *Droite* : design complet d'un instrument comportant 30 canaux identiques disposés autour du plan focal.

Dans le concept de sélection de cible tel qu'il est présenté, le BSM actif est un composant clé car il permet à l'aide d'une seule surface optique de remplir plusieurs fonctions :

1. re-diriger le faisceau incident provenant du POM sur le miroir déformable,
2. compenser les aberrations optiques dues au caractère variable du chemin optique *hors axe* en fonction du positionnement du POM,
3. corriger la variation de chemin optique due au positionnement du POM sur le plan focal si nécessaire.

La première fonction est remplie par une platine Tip/Tilt, qui permet d'orienter le miroir (actif ou non) selon un angle de ± 7.5 degrés. La deuxième fonction est remplie par l'utilisation d'un miroir déformable actif, dont la déformation astigmatique permet de compenser les défauts d'une réflexion hors axe sur une sphère. La troisième fonction peut être remplie par ce même miroir déformable, en générant une déformation paraboloidale sur la surface, ce qui permet de recaler le foyer du système.

Corriger le caractère hors axe variable à l'aide d'une seule surface optique variable présente de nombreux avantages à la fois optiques et technologiques tels que le gain en flux, la minimisation des erreurs de front d'onde, la réduction du temps d'intégration, la facilité de calibration et de maintenance. On notera également que l'on a ainsi un système fixe, dépourvu de toute translation, ce qui présente un fort avantage du point de vue mécanique, et donc augmente la précision et la stabilité du système.

4.2.3 Spécifications du BSM

Dans la suite du chapitre, nous étudierons différentes configurations de miroirs actifs déformables permettant de remplir soit la deuxième fonction, soit les deuxième et troisième fonctions simultanément. Plusieurs configurations seront possibles pour le deuxième choix.

Des spécifications de départ sur l'amplitude des déformations et la qualité optique (*cf* table 4.1) ont permis de poser les concepts préliminaires du BSM déformable. Ces spécifications sont étroitement liées aux autres sous-systèmes avec lesquels le miroir actif interagit.

Amplitude des déformations Les déformations à générer dépendent de plusieurs facteurs comme la gamme de positionnement du POM, la taille du BSM, et les angles induits vis à vis de la position du BSM. Les premières estimations posent des spécifications larges sur l'amplitude des déformations : on souhaite générer entre $30\mu\text{m}$ maximum et $150\mu\text{m}$ maximum de déformation pty en astigmatisme à la surface d'un miroir de diamètre 100mm ou 200mm. Dans le cas de la compensation de chemin optique, on souhaite pouvoir générer entre 5 et $75\mu\text{m}$ maximum de Focus sur cette même surface.

Qualité optique La qualité optique de la surface des miroirs actifs est directement liée aux spécifications sur la qualité du front d'onde qui doit être délivré à l'entrée du module d'IFU, ainsi qu'aux aberrations que le miroir adaptatif du module d'AO peut corriger. La qualité optique doit être au minimum de $\lambda/4$ RMS en basses fréquences (goal $\lambda/10$ RMS), et de $\lambda/10$ RMS en hautes fréquences. Nous verrons par la suite que c'est principalement par rapport à ce critère que seront définis les domaines de déformation possibles sur les miroirs actifs proposés et donc leurs domaines de fonctionnement.

TAB. 4.1 – Spécifications du BSM en amplitude et en qualité optique

	Mode <i>Astm 3</i>	Mode Focus
Amplitude	$\pm 30\mu\text{m}$ (goal $\pm 150\mu\text{m}$)	$5\mu\text{m}$ (goal $\pm 75\mu\text{m}$)
Qualité optique	$\lambda/4$ (goal $\lambda/10$)	$\lambda/4$ (goal $\lambda/10$)

Développement du travail

La compensation de puissance et d'astigmatisme par des miroirs actifs a été développée à partir de la théorie des plaques minces, qui est détaillée dans la section suivante. La suite du chapitre présente les différentes possibilités de miroirs actifs remplissant soit l'une soit l'autre, soit les deux fonctions. Les analyses par éléments finis sont utilisées pour optimiser et valider les concepts proposés, et notamment pour définir les domaines de validité des modèles. Ces domaines sont définis à partir de la qualité optique des déformations obtenue numériquement.

4.3 Compensation de puissance et d'astigmatisme - théorie des plaques minces

4.3.1 Compensation de puissance

La compensation de puissance par déformation d'une plaque a été étudiée par G.Lemaître [Lemaître 1976]. Trois configurations de charge différentes permettent d'obtenir une déformation parabolique, et chaque configuration nécessite une distribution d'épaisseur particulière (cf figure 4.3).

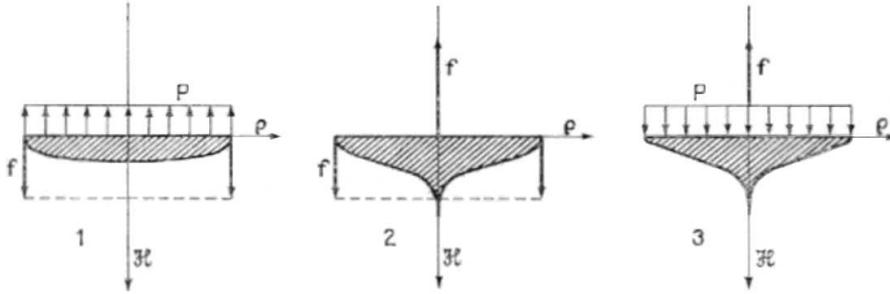


FIG. 4.3 – Profils d'épaisseur H en fonction du rayon ρ selon les trois configurations de charges extérieures.

4.3.1.1 Profil cycloïde

Si la charge appliquée est une charge uniformément répartie sur toute la surface d'une plaque circulaire en appui le long du bord, alors la distribution d'épaisseur associée est un profil de type *cycloïde*, défini par l'équation suivante :

$$H(\rho) = H_0(1 - \rho^2)^{\frac{1}{3}} \quad (4.1)$$

4.3.1.2 Profil Tulipe

Si la charge est une force centrale, appliquée au centre d'une plaque circulaire en appui le long du bord, la distribution d'épaisseur est un profil de type *tulipe*, dont l'expression mathématique est :

$$H(\rho) = H_0(-\ln\rho^2)^{\frac{1}{3}} \quad (4.2)$$

4.3.1.3 Profil mixte

Pour le cas des charges combinées, le profil résultant est défini par :

$$H(\rho) = H_0(\rho^2 - \ln\rho^2 - 1)^{\frac{1}{3}} \quad (4.3)$$

4.3.2 Compensation d'astigmatisme

Obtenir un miroir à toricité variable nécessite une configuration de charges particulière appliquée sur un miroir spécifique. Deux configurations géométriques permettent d'atteindre cet objectif, soit suivant le modèle étudié dans le chapitre précédent, soit suivant un modèle de plaque mince dont l'épaisseur varie avec le rayon. Ce deuxième cas de figure a été utilisé pour la réalisation des réseaux toriques pour la mission SOHO, obtenus par réplique d'un miroir torique déformable [Huber *et al* 1981].

Dans l'application souhaitée, on doit pouvoir superposer les modes Focus et *Astm3*, ce qui nous oriente vers la deuxième solution comportant une distribution d'épaisseur. Ce choix est de plus motivé par la possibilité d'utiliser un miroir métallique qui permettra d'atteindre les amplitudes de déformation souhaitées.

La condition d'appui simple et d'épaisseur nulle au bord ne sera possible qu'avec une pièce métallique pour ne pas risquer la rupture.

La variation d'épaisseur radiale permet lors de la déformation d'annuler la composante quadratique pour ne conserver que la composante bas ordre. Il est cependant nécessaire, au vu de l'amplitude des déformations, de considérer une distribution d'épaisseur angulaire qui permettra d'annuler les ordres supérieurs tels l'Hexafoil, comme il a été démontré pour les miroirs toriques en Zerodur. On étudie alors une pièce comportant deux distributions d'épaisseur, l'une variant radialement, l'autre angulairement.

4.3.2.1 Variation d'épaisseur radiale

Les équations d'élasticité donnent, comme solution au problème de la déformation en astigmatisme, un modèle de plaque circulaire soumise à une charge modulée répartie le long du bord du miroir, et dont le profil d'épaisseur est de type cycloïde :

$$H(\rho) = H_0(1 - \rho^2)^{\frac{1}{3}} \quad (4.4)$$

On pourra obtenir de l'astigmatisme avec une telle plaque soumise uniquement à deux paires de forces égales et opposées appliquées au bord du miroir. On notera que la formule donne une épaisseur nulle au bord du miroir. Ce profil est représenté sur la figure 4.4 de gauche. L'application des forces doit se faire sur un anneau externe rigide, relié au miroir par l'intermédiaire d'une fine collerette, dont le rôle sera de transmettre les forces appliquées tout en absorbant les moments d'encastrement. Ce type de collerette a déjà été utilisé avec succès pour les miroirs à focale variable (VCM) du VLT, alors que les déformations engendrées (et donc les contraintes locales) étaient bien supérieures [Ferrari 1998].

4.3.2.2 Variation d'épaisseur angulaire

La distribution d'épaisseur angulaire se situe au niveau de l'application des forces, sur la couronne externe rigide. Moduler angulairement l'épaisseur de cette couronne permet de moduler la transmission des contraintes et de se ramener au cas d'une distribution de charge variable répartie le long du bord. Les équations d'élasticité donnent comme au chapitre précédent la distribution suivante :

$$H(\theta) = H_0 \left[-\frac{(2\theta/\pi - 0.5)}{\cos(2\theta)} \right]^{\frac{1}{3}}, \quad \theta \in [0, \frac{\pi}{4}] \quad (4.5)$$

θ étant la coordonnée angulaire sur le miroir, et H_0 une constante dépendant des paramètres matériaux E et ν , de la flexion maximale et de la force maximale. Ce profil d'épaisseur est représenté sur la figure 4.4 de droite.

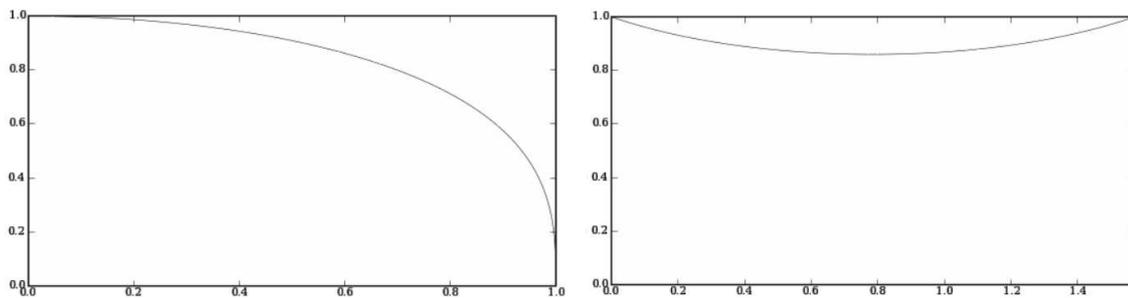


FIG. 4.4 – *Gauche* : profil d'épaisseur radial normalisé en fonction du rayon normalisé. *Droite* : profil d'épaisseur angulaire normalisé en fonction de l'angle en radians.

4.3.3 Combinaisons actives des deux modes de déformation

La propriété d'orthogonalité des polynômes de Zernike permet d'envisager les combinaisons linéaires des modes de déformation mécaniques correspondants à ces polynômes. Les profils donnés par les équations (4.1) et (4.4) étant identiques, on imaginera facilement la possibilité de générer les deux modes de déformation à l'aide de deux paires de forces et d'une pression uniformément répartie sur la surface arrière du miroir. Cependant, la mise en œuvre d'un tel système est assez complexe.

Il existe une solution n'utilisant que des forces ponctuelles, permettant de combiner les modes de déformation. Il est alors nécessaire d'effectuer un balancement adéquat des profils cycloïde et tulipe. Le modèle se compose d'une fixation centrale et quatre actionneurs sur l'anneau. Le système peut soit générer de l'astigmatisme si les actionneurs travaillent en opposition deux à deux, soit générer de la puissance si les actionneurs travaillent dans le même sens. La combinaison des profils doit être ajustée afin de pouvoir générer chacun des deux modes en conservant une qualité optique acceptable en relation avec les spécifications du système.

Considérant le profil d'épaisseur en tulipe défini par l'équation (4.2), le développement limité de $\ln x$ au voisinage de $x = 1$ permet de réécrire ce profil sous la forme :

$$H = [-\ln \rho^2]^{\frac{1}{3}} = \left[1 - \rho^2 + \frac{1}{2}(1 - \rho^2)^2 + \frac{1}{3}(1 - \rho^2)^3 + \dots \right]^{\frac{1}{3}} \quad (4.6)$$

On remarque que le rapport des profils (4.2) et (4.4) tend vers 1 quand ρ tend vers 1 :

$$\lim_{\rho \rightarrow 1} \left[\frac{-\ln \rho^2}{1 - \rho^2} \right]^{\frac{1}{3}} \rightarrow 1$$

Ce qui signifie que les deux profils tendent à être identiques au bord ($\rho \rightarrow 1$). Ce résultat n'est pas valable pour le profil défini par l'équation (4.3) dans le cas d'une charge q en réaction avec une force centrale.

La figure 4.5 présente une combinaison qui minimise l'écart de matière entre les deux profils d'épaisseur. Dans ce cas, on pourra s'attendre à des comportements similaires pour les deux modes de déformation. En fonction de la taille du miroir et de l'encombrement, les simulations par FEA permettraient de définir un domaine de travail pour une miroir utilisant ce profil. La qualité optique sera limitée dans un mode par de l'*Astm* 5, dans l'autre mode par de l'aberration sphérique.

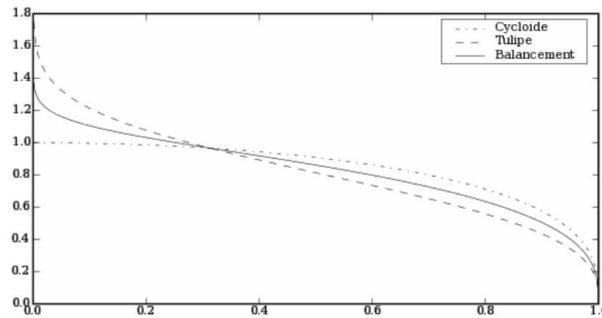


FIG. 4.5 – Combinaison minimisant l'écart de matière entre les profils d'épaisseur cycloïde et tulipe.

4.4 Application au BSM de EAGLE

Les analyses menées précédemment conduisent à la définition géométrique d'un miroir à toricité et courbure variable, ou BSM à 4 forces. L'implémentation mécanique du support et des actionneurs nécessite l'emploi de liaisons rotules. Les simulations numériques permettent de caractériser les résultats attendus en termes de qualité optique. Le miroir a été réalisé et douci, et le prototype de ce système est en cours de caractérisation. L'utilisation de 8 forces (BSM 8) disposées à 45 degrés sous la couronne permet en outre d'orienter la figure d'astigmatisme autour de l'axe optique.

4.4.1 Modèle cycloïde modifié - BSM à 4 forces

Le modèle choisi est présenté sur la figure 4.6. Il est constitué d'un anneau rigide de support, relié au miroir par l'intermédiaire d'une collerette de $400\mu\text{m}$ d'épaisseur. Dans un premier temps nous souhaitons générer de grandes déformations astigmatiques et une faible correction en puissance. Pour cela, le profil radial est de type cycloïde uniquement (équation (4.4)), auquel on a rajouté un plot central permettant une fixation rigide. Le profil angulaire de la couronne externe est défini par l'équation (4.5). Le diamètre du miroir est de 200mm, l'épaisseur du ménisque est de 7mm dans la zone centrale, l'épaisseur maximale de la couronne est de 9.5mm. Le ménisque a un rayon de courbure de départ de 1800mm.

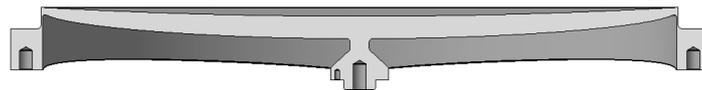


FIG. 4.6 – Profil en cycloïde modifié au centre et supporté sur une couronne rigide modulée angulairement. On distingue les deux profils d'épaisseur ainsi que la fine collerette permettant de lier les deux parties de la pièce.

4.4.1.1 Implémentation mécanique

La figure 4.7 représente l'implémentation mécanique du miroir, de son support, et des actionneurs permettant sa déformation.

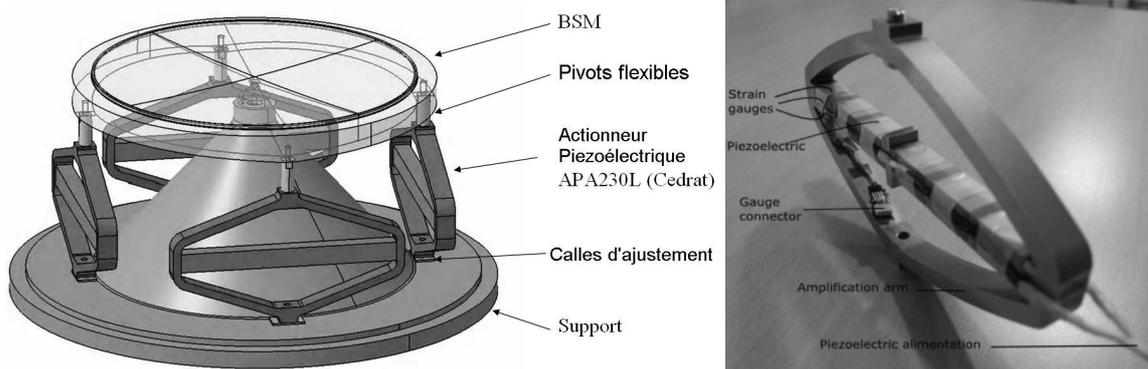


FIG. 4.7 – *Gauche* : Implémentation mécanique du BSM, de ses actionneurs et de son support. La liaison entre les actionneurs et le miroir est effectuée par l'intermédiaire de pivots flexibles, absorbant les moments de flexion. *Droite* : Photo d'un actionneur piézo-électrique monté dans son système démultiplicateur (CEDRAT).

Actionneurs Le choix de départ s'est porté sur des actionneurs piézo-électriques à amplification. Ce type de système permet une course de plus de $180\mu\text{m}$ et délivre une force de plus de 500N . La figure 4.7 de droite présente le design de ces actionneurs, dont la forme a été optimisée pour obtenir une course maximale en fonction de la force appliquée. Les spécifications relatives à ces actionneurs auront des répercussions sur le design du miroir final.

Pivots flexibles Du fait de l'amplitude de la déformation, il est nécessaire d'utiliser des pivots flexibles aux deux extrémités des actionneurs pour encaisser les efforts transverses et éviter la génération de moments de flexion trop importants sur la couronne, qui ne pourraient pas être absorbés par la collerette.

Support Le support mécanique a été conçu pour maintenir le miroir au niveau du plot central. Il doit être assez rigide pour se déformer au minimum, afin de conserver la dynamique des actionneurs et les performances du système global.

4.4.1.2 Simulations numériques

Le modèle de BSM 4 est simulé à l'aide de 36.960 éléments hexahédraux quadratiques, correspondant à 179.893 nœuds. Les constantes matériau sont celles de l'INOX420 : $E = 215\text{GPa}$ et $\nu = 0.305$. L'analyse de la qualité optique montre que ce miroir fonctionne très bien en astigmatisme sur une large gamme de déformation ($150\mu\text{m PtV}$). Le mode Focus fonctionne sur une gamme réduite ($5\mu\text{m PtV}$).

Pour une déformation de $150\mu\text{m PtV}$ en astigmatisme, on obtient une qualité de surface de $\lambda/10$ au total, le résidu dominant étant de l'*Astm* 5. Cette même qualité de surface ($\lambda/10$) est obtenue en Focus pour une déformation de $5\mu\text{m PtV}$. Au delà, le terme d'aberration sphérique et le terme en $\cos(4\theta)$ deviennent trop importants pour que la surface conserve une qualité acceptable. Le premier terme est du au profil d'épaisseur qui n'est pas adapté exactement au mode Focus, et le deuxième terme à l'application d'uniquement 4 forces au lieu d'une répartition sur toute la couronne. Celui-ci sera annulé par l'utilisation du BSM 8.

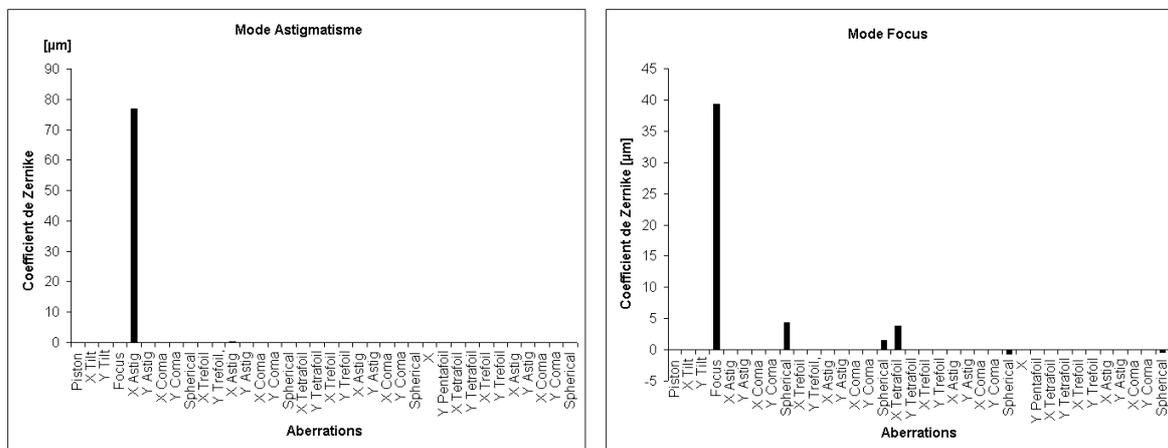


FIG. 4.8 – Histogramme des coefficients de Zernike générés sur la surface optique. *Gauche* : Mode Astigmatisme, PtV de $150\mu\text{m}$. Une fois l'*Astm* 3 soustrait, il reste 59nm RMS d'*Astm* 5 ($\sim \lambda/10$). *Astm* 3 et *Astm* 5 soustrait. Il reste 6.4nm RMS de résidu ($\sim \lambda/100$). *Droite* : Mode Focus, PtV $85\mu\text{m}$. La qualité de surface est dégradée par les termes d'aberration sphérique et de Tetrafoil. .

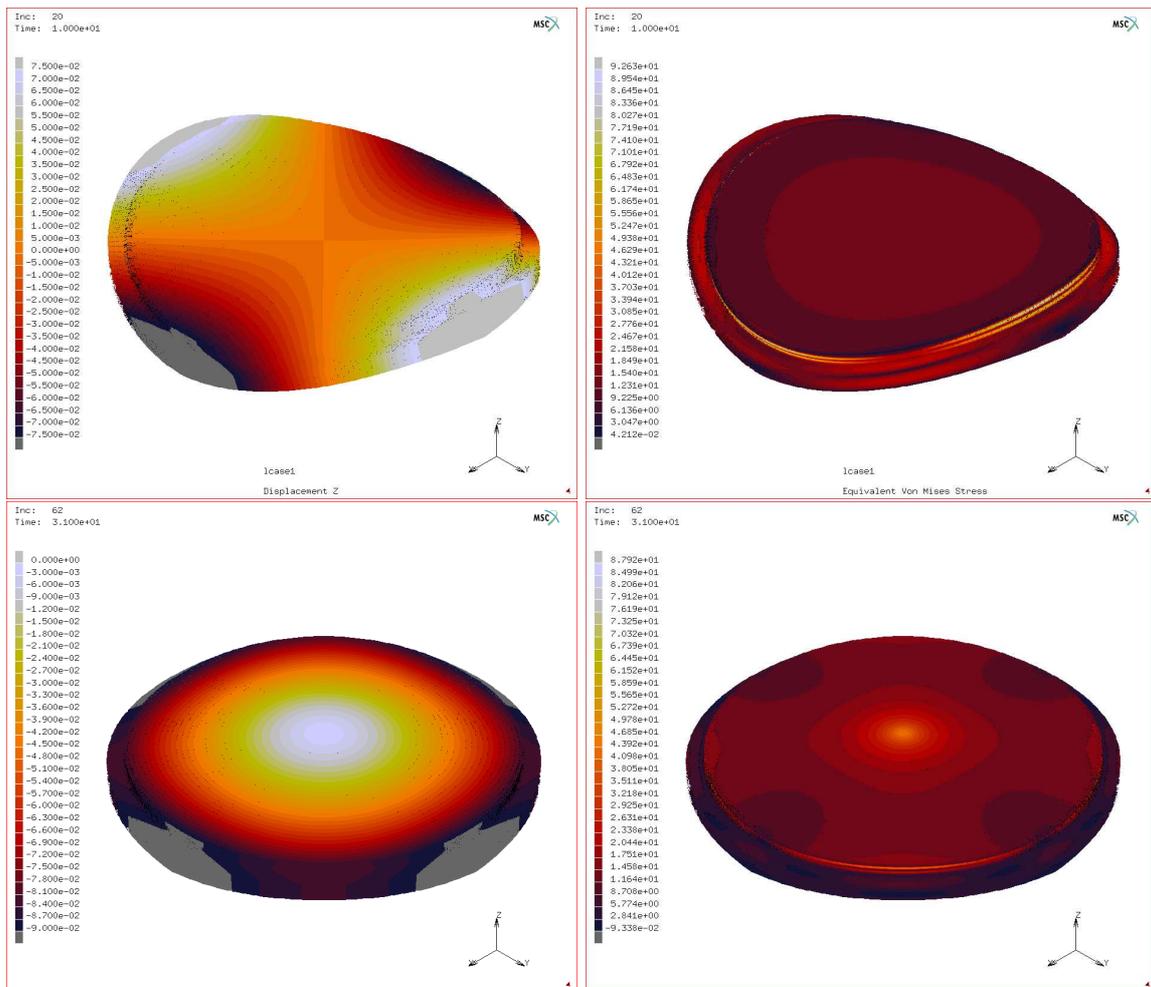


FIG. 4.9 – *Haut Gauche* : Déformation astigmatique du BSM, ptV $150\mu\text{m}$ sur la surface optique. *Haut Droite* : Répartition des contraintes de Von Mises. La contrainte maximale est de 92 MPa, largement en dessous de la limite élastique de l'acier Inox. *Bas Gauche* : Déformation en puissance du BSM, ptV $90\mu\text{m}$. *Bas Droite* : La contrainte maximale est inférieure à 90MPa.

4.4.1.3 Prototype - BSM 4

Un prototype de BSM actif à quatre forces a été réalisé au tour à commande numérique et sa surface a été doucie. La photo 4.10 montre la face doucie du miroir pendant l'opération de surfacage. La qualité de surface obtenue au douci permet de pouvoir caractériser les déformations devant un interféromètre. Par ailleurs, la caractérisation du système de déformation est en cours à l'aide d'un *Dummy* BSM 4. La photo 4.11 montre le *Dummy* BSM 4 monté sur le support de déformation et muni des 4 actionneurs piézo-électriques. Ce montage permet d'évaluer les performances purement mécaniques du montage avant l'utilisation du miroir final. Cette opération permet de notamment de découpler les effets parasites dus au montage de ceux du miroir, afin de pouvoir optimiser l'ensemble du système étape par étape.

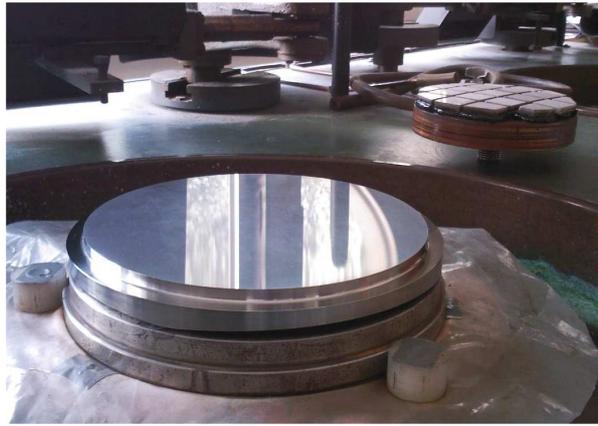


FIG. 4.10 – Vue de la face doucie du prototype de BSM réalisé.

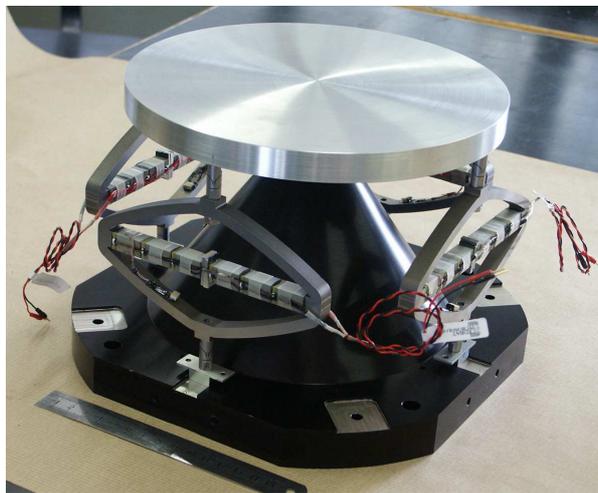


FIG. 4.11 – *Dummy* BSM 4 monté sur son support, muni des quatre actionneurs piézo-électriques. L'utilisation de ce montage permet d'optimiser les performances mécaniques du support avant l'utilisation sur le miroir final.

4.4.2 BSM à 8 forces

Pour des raisons de concept optique dans EAGLE liées à l'encombrement et la rotation de la figure d'astigmatisme, un BSM à 8 forces (BSM 8) a été simulé, avec une ouverture réduite à 100mm. Quelques modifications sur la couronne rigide ont permis d'intégrer 8 points d'application des forces. Ceci présente plusieurs avantages : on peut générer deux modes astigmatiques orthogonaux et les combiner afin de faire pivoter la figure d'astigmatisme autour de l'axe optique, et on peut générer un mode Focus de meilleure qualité, car l'utilisation de 8 forces permet d'éliminer la composante angulaire en $\cos(4\theta)$. Il reste un résidu en $\cos(8\theta)$ dont l'amplitude est bien inférieure.

La figure 4.12 illustre le profil de couronne modifié afin d'obtenir 8 plots d'attache. Cette modification est justifiée par la remarque suivante : Pour un mode de déformation en $r^2 \cos 2\theta$, la composante angulaire de la déformation est quasiment linéaire pour $\theta \in [\pi/8, 3\pi/8]$. Modifier la distribution d'épaisseur du miroir dans cette zone n'influe quasiment pas sur la composante angulaire de la déformation. La distribution d'épaisseur sur $[-\pi/8, \pi/8]$ est reportée sur $[\pi/8, 3\pi/8]$ et ainsi de suite.

Les effets de cette modification sont caractérisés par simulation FEA (37.078 hexahédres quadratiques, 180.261 nœuds). On obtient une qualité optique légèrement inférieure avec $\lambda/7$ RMS pour une amplitude de déformation de $150\mu\text{m}$ pTV en mode astigmatisme. Au delà des termes d'*Astm* 5, la qualité optique est de $\lambda/20$ RMS. Pour des déformations de l'ordre de $100\mu\text{m}$, le design de ce miroir est parfaitement adapté. En mode Focus, si le terme de *Tetrafoil* est bien annulé, l'aberration sphérique résiduelle est encore trop importante. On obtient une qualité de $\lambda/4$ RMS pour $7\mu\text{m}$ pTV de déformation. A ce niveau, seule une modification du profil d'épaisseur permettra d'équilibrer les qualités optiques sur les deux modes.

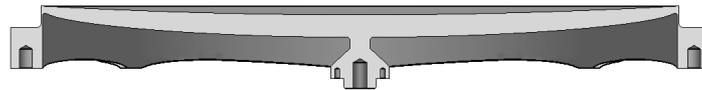


FIG. 4.12 – Modification de la variation d'épaisseur de la couronne d'appui, permettant d'appliquer 8 forces tous les 45 degrés.

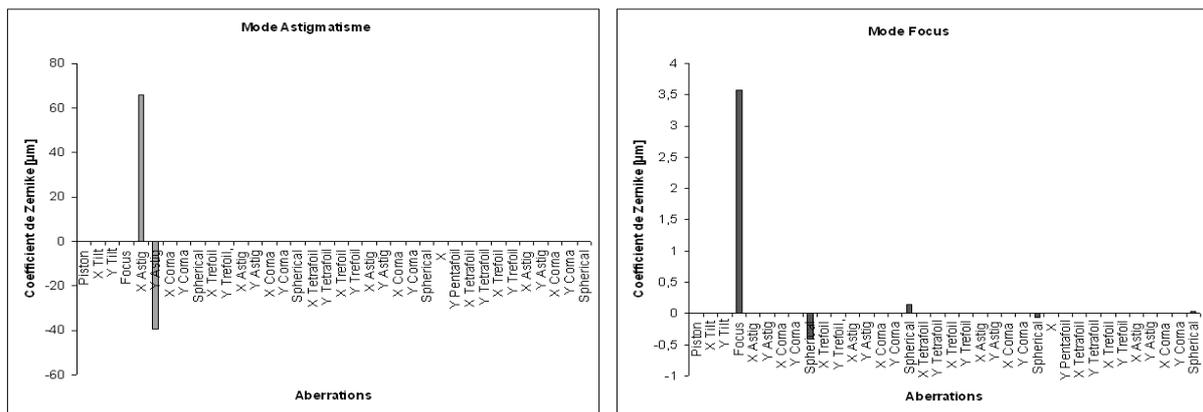


FIG. 4.13 – Histogramme des coefficients de Zernike générés sur la surface optique. *Gauche* : Combinaison aléatoire des 2 modes Astigmatisme, pTV de $150\mu\text{m}$. Qualité optique *Astm* 3 soustrait = $\lambda/7$. Qualité optique *Astm* 3 et *Astm* 5 soustraits = $\lambda/20$. *Droite* : Mode Focus, pTV de $7\mu\text{m}$, qualité $\lambda/4$. On constate l'annulation du terme de Tetrafoil grâce aux huit forces.

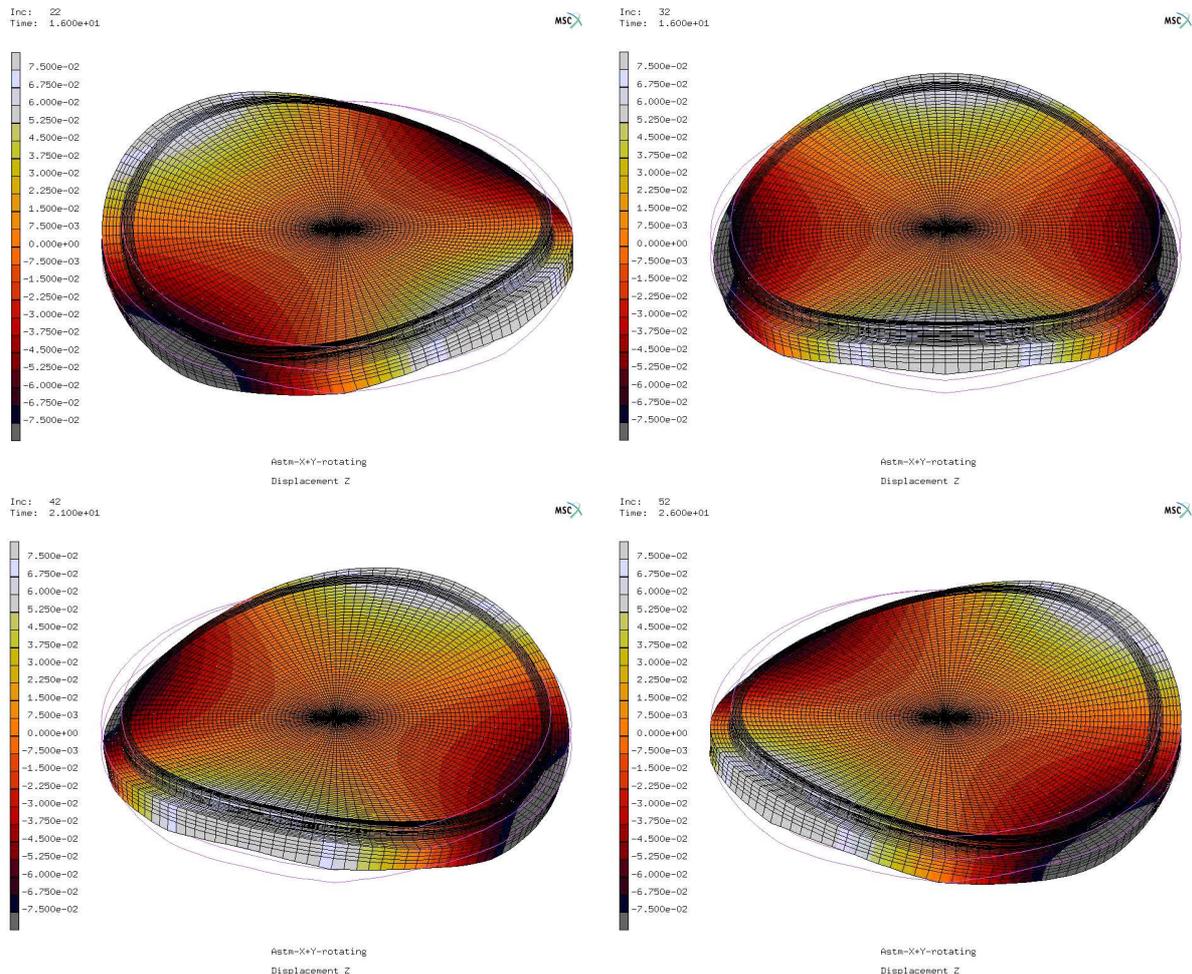


FIG. 4.14 – Rotation de la figure d'astigmatisme générée sur la surface du BSM 8. La combinaison linéaire des deux modes orthogonaux permet de conserver l'amplitude de la déformation lors de la rotation autour de l'axe optique.

Conclusions sur les BSM

Le BSM à 4 forces a été réalisé, douci et est en cours de caractérisation. Les simulations numériques montrent que la déformation obtenue devrait être précise à $\lambda/10$ pour $150\mu\text{m}$ d'astigmatisme et pour $5\mu\text{m}$ de Focus. Le design du BSM 8, ayant quasiment les mêmes amplitudes de déformation mais cette fois sur un diamètre 2 fois plus petit, a été finalisé. L'utilisation de 8 forces permettra d'équilibrer les qualités optiques sur les deux modes, notamment en améliorant la qualité du mode Focus. La qualité du mode astigmatisme est légèrement inférieure mais encore largement acceptable pour des déformations de l'ordre de la centaine de μm .

4.5 Smart Beam Steering Mirror

Il est possible à partir de ce type de miroir en cycloïde de générer un Astigmatisme à l'aide d'un système mécanique simple réunissant les forces nécessaires à la déformation en un seul point situé sous le miroir, sur l'axe optique. C'est le concept de *Smart Beam Steering Mirror*. Ce principe est généralisé sur les miroirs monomodes.

4.5.1 Principe de l'actionneur unique

Le système proposé est constitué de deux barres croisées sous le miroir, fixées au niveau des points d'application des forces (*cf* figure 4.15). Lorsque l'on écarte les barres au niveau de la zone de croisement, on génère automatiquement deux paires de forces égales et opposées. Les avantages de ce système sont clairs :

- Réduction de la complexité de l'intégration mécanique,
- Simplification du système de contrôle/commande,
- Allègement du système global,
- Minimisation du temps de calibration dans l'instrument,
- Amélioration de la tenue thermique,
- Pas de Tip/Tilt ou Coma résiduels dus à un différentiel de forces,
- Meilleure fiabilité du système,
- Diminution du coût par système actif

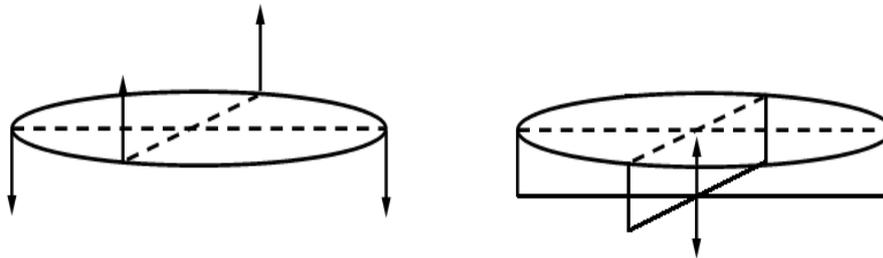


FIG. 4.15 – Principe de l'actionneur unique.

On imaginera combiner deux de ces systèmes de déformation, orientés à 45 degrés, afin de générer deux figures d'astigmatisme orthogonales sur la surface optique. On obtient ainsi toutes les combinaisons linéaires de ces deux modes. Le principe de superposition nous permet d'orienter la figure d'aberration à volonté autour de l'axe optique, en utilisant uniquement deux actionneurs, comme illustré sur la figure 4.16. Le substrat utilisé correspond au miroir à 8 forces, sur lequel viennent se fixer les deux systèmes de déformation. Suivant la disposition et le type d'actionneurs choisis, on pourra intégrer un troisième actionneur afin de générer le mode Focus.

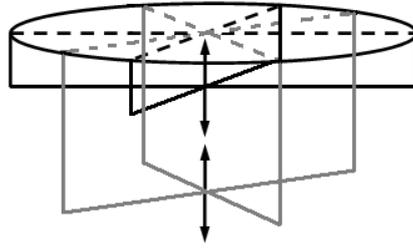


FIG. 4.16 – En rajoutant le même système pivoté d'un angle de 45 degrés, on peut générer toutes les combinaisons linéaires des deux figures d'astigmatisme orthogonales.

4.5.2 Points identifiés

Si les avantages de ce système sont importants, il est nécessaire d'étudier les sources d'erreur qui pourraient nuire à ses performances. Trois principaux points pouvant introduire des déformations parasites ont été identifiés, sur lesquels il faudra fournir un effort particulier afin de minimiser leur influence.

Flexion des barres Le premier effet est du à la flexion propre des barres de transmission. Cette flexion agit sur la longueur relative des barres par rapport au miroir sur lequel elles sont fixées. Il en résulte quatre efforts latéraux identiques au niveau des fixations, dont l'effet principal est la génération d'un terme de Tetrafoil ($\cos(4\theta)$). Deux possibilités permettraient de le minimiser voire de s'en affranchir : réaliser la transmission des efforts par l'intermédiaire de plusieurs rotules afin d'absorber la réduction en longueur des barres, et augmenter leur rigidité pour minimiser leur flexion.

Poids des barres Le deuxième effet est du au poids propre du système de déformation. Le BSM est maintenu en son centre, et il est placé face optique vers le sol dans sa configuration de travail. Si tout le poids du système mécanique est supporté par le miroir seul, tout se passe comme si on appliquait quatre forces égales au niveau des quatre points de transmission. Il en résulte une déformation en Focus + Tetrafoil pour un BSM à quatre forces, ou Focus + Octafoil pour un BSM à 8 forces. Si la déformation en Focus peut être réglée par un simple déplacement du système, il est important de minimiser les autres termes. Là encore deux possibilités permettraient de rendre le système quasi-insensible à la gravité : minimiser le poids du système de déformation en utilisant des barres allégées, ou maintenir le système afin de compenser son poids propre.

Symétrie du système Enfin le troisième point est relatif à la symétrie globale du système, particulièrement dans le cas du double actionneur. Dans cette configuration où les systèmes de déformation s'empilent derrière le miroir, il faut veiller à ne pas transmettre de moments de flexion, qui seraient différemment transmis selon le système, afin d'éviter les déformations parasites. Cette fonction est partiellement remplie par l'intermédiaire de la collerette située entre le miroir et la couronne. A ceci s'ajoute le rôle des rotules au niveau des points de fixation.

Ces considérations ont permis de réaliser un prototype préliminaire afin de valider le concept d'actionneur unique.

4.5.3 Premier prototype de BSM à 1 force

Un premier prototype de ce système a été testé (*cf* figure 4.17), utilisant le miroir à profil cycloïde utilisé pour la fabrication des réseaux de SOHO. La surface optique du miroir est reliée par une fine collerette jouant le rôle d'appui simple au bord. Les barres utilisées pour le système de déformation sont de section carrée et creuses afin de minimiser le poids, tout en conservant la rigidité. Elles sont encastées au niveau des points de fixation. Les résultats obtenus à l'aide d'un tel système sont très prometteurs : pour une déformation de 10λ soit $6.328\mu\text{m}$, la précision atteinte pour la déformation pure est de $\lambda/160$ RMS (*cf* figure 4.18). On retrouve ici les mêmes valeurs relatives précision/déformation, avec des précisions $\lambda/10$ pour des déformations de l'ordre de la centaine de μm .

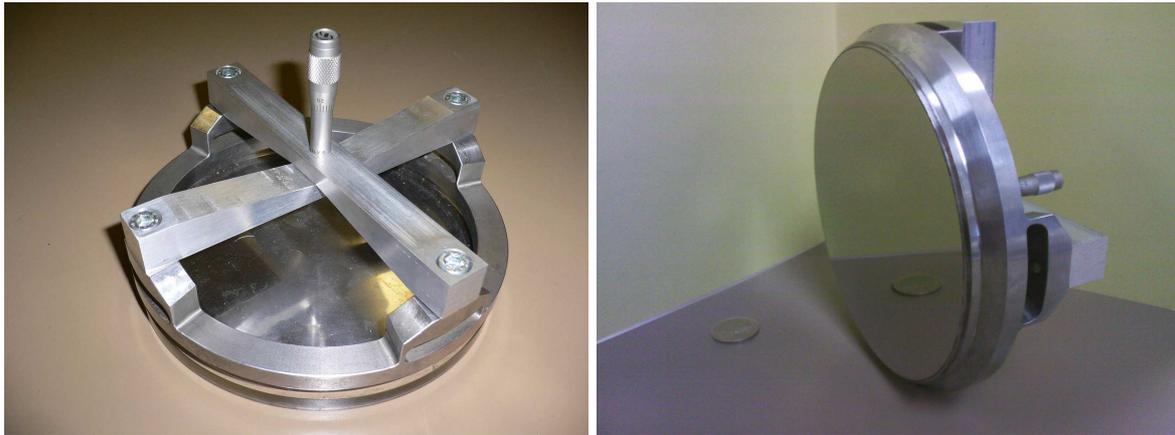


FIG. 4.17 – Vue du prototype simplifié du système de déformation permettant la génération automatique d'un astigmatisme sur la surface optique du miroir. Les deux barres croisées sous le miroir sont reliées à celui-ci par l'intermédiaire de ponts périphériques permettant de s'affranchir de la composante en $\cos(6\theta)$ de la déformation.

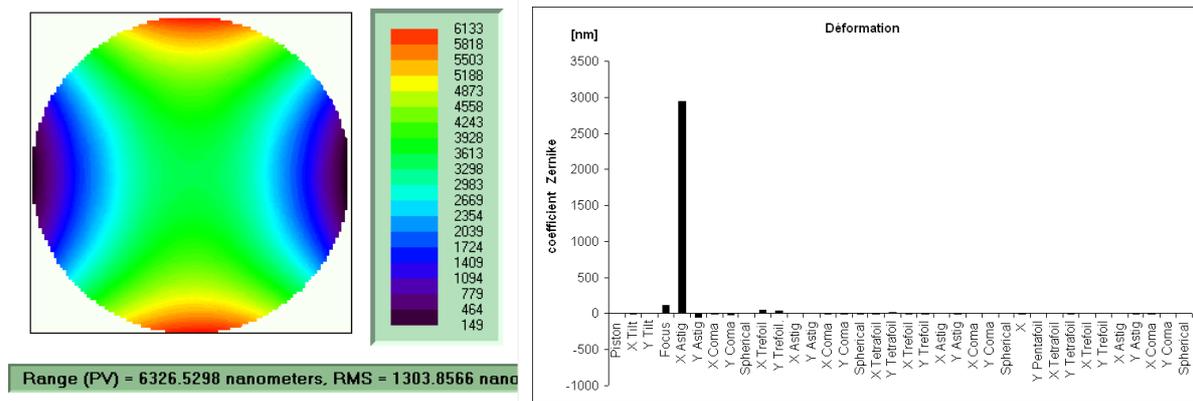


FIG. 4.18 – *Gauche* Carte de phase de la surface optique du miroir déformé. *Droite* Valeurs des coefficients de Zernike composant la déformation de la surface optique du miroir. La déformation est précise à 4nm RMS ($\lambda/160$) pour une amplitude de $6.326\mu\text{m}$ (10λ).

4.5.4 Corollaire - Miroirs Monomodes à 1 actionneur

Il est possible de généraliser le concept de *Smart* BSM à tous les modes de déformation définis par une flexion radiale et une modulation angulaire que l'on décrit comme $w_{n,m}(r, \theta) = r^n \cos m\theta$, $m > 0$.

Premièrement, la géométrie du miroir doit être calculée en fonction de l'ordre radial à générer, c'est à dire le terme r^n . On pourra considérer soit une forme vase comme vu au chapitre 3 soit un ménisque d'épaisseur variable relié à une couronne rigide. Les paramètres disponibles sont soit la distribution d'épaisseur, soit le rapport d'épaisseurs t_2/t_1 , le rapport des rayons b/a et la position des forces c .

Deuxièmement, la modulation angulaire dépend du nombre de forces appliquées aux niveau de la couronne rigide. Les équations détaillées donnant le nombre et la position des forces sont données en référence [Lemaître 2005].

Pour chaque mode, on peut définir un système de déformation basé sur le principe précédent, à l'aide de deux pièces mécaniques identiques. Prenons l'exemple du mode *Trefoil* défini par $r^3 \cos 3\theta$. La première pièce est une étoile à 3 branches, formant entre elles un angle de $2\pi/3$. Les extrémités des branches sont reliées à l'anneau rigide du miroir. Le centre de l'étoile correspond à l'axe optique du miroir, qui sera la position de l'actionneur. On dispose un système identique pivoté de $\pi/3$ autour de cet axe. L'actionneur placé entre les 2 pièces peut générer automatiquement 2 triplets de forces égales et opposées, permettant de moduler la déformation angulairement en $\cos 3\theta$.

La généralisation au cas $\cos m\theta$ est immédiate : la première pièce est une étoile à m branches, formant entre elles un angle de $2\pi/m$. Les extrémités des branches sont reliées à l'anneau rigide du miroir. Le centre de l'étoile correspond à l'axe optique du miroir, qui sera la position de l'actionneur. On dispose une pièce identique pivotée de π/m autour de cet axe. L'actionneur placé entre les 2 pièces peut générer automatiquement 2 m -uplets de forces égales et opposées, permettant de moduler la déformation angulairement en $\cos m\theta$.

La relation *1 actionneur = 1 mode* réduirait considérablement la commande et le contrôle des modes de déformation variables. Ce concept doit encore être optimisé afin de réduire les implémentations et encombrements des systèmes placés sous le miroir. Mais ce type de minimisation pourrait être la première étape vers l'Optique Active Spatiale dont un des enjeux majeur est la minimisation du nombre d'actionneurs embarqués, pour corriger un nombre réduit de modes bien identifiés [Hugot 2007, Hugot 2007] sur des miroirs allégés [Kendrew 2005].

Conclusions sur les *Smart* BSM

Le principe de *Smart* BSM basé sur une minimisation du système d'actionneurs a été prouvé. Cette démonstration est la première étape vers le concept *1 actionneur = 1 mode*, qui permettrait la superposition de modes choisis à partir de systèmes de déformations combinés. Ce type de miroirs peut avoir de multiples applications, à condition de continuer à optimiser les systèmes de déformation pour éviter d'avoir un "empilement" à l'arrière du miroir, en minimisant l'encombrement et le poids, afin d'améliorer les performances.

Conclusions sur les BSM actifs

Nous avons présenté dans ce chapitre le concept de miroir à astigmatisme variable ou variable et orientable, de grande dynamique ($>100\mu\text{m}$), basé sur les déformation d'un substrat métallique possédant deux distribution d'épaisseurs, l'une radiale sur le ménisque optique, et l'autre angulaire sur l'anneau rigide externe. Suivant la configuration d'utilisation, ce miroir permet aussi de compenser des défauts de défocalisation.

Après une définition analytique et une validation des profils d'épaisseur par FEA, c'est l'implémentation du miroir dans un système de déformation optimisé qui a été validée numériquement afin de dimensionner le système. La qualité optique attendue est de $\lambda/10$ RMS pour une déformation de $150\mu\text{m}$ PTV d'*Astm 3* et de $5\mu\text{m}$ PTV de focus. Un prototype de ce système de BSM à 4 forces est en cours de qualification.

L'amélioration du système de déformation a permis de mettre au point le concept de *Smart Beam Steering Mirror*, permettant de générer une figure astigmatique à l'aide d'un actionneur unique, ou bien d'orienter cette figure à l'aide de 2 actionneurs. Un premier prototype a permis de valider le concept, en produisant une déformation de $6\mu\text{m}$ avec une précision de 4nm RMS. Un nouveau prototype de Smart BSM à deux forces est en cours de réalisation. Ce type de composant minimisant le nombre d'actionneur est une première étape vers l'Optique Active spatiale dont l'un des challenge majeur sera de minimiser au maximum la complexité et les poids des systèmes correctifs embarqués.

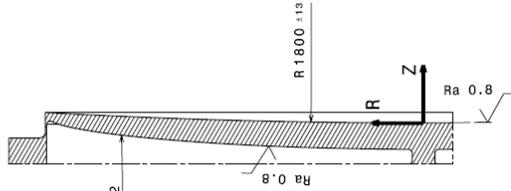


Tests du BSM actif

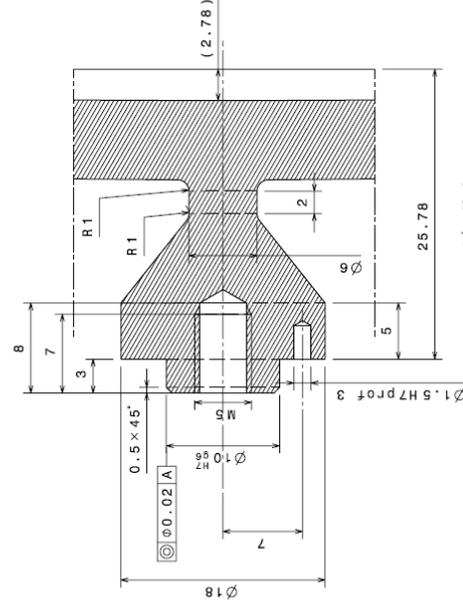
(Page suivante : plan de fabrication du BSM 4)

Table 1			
R	Z profil interne	Z sphère	Epaisseur
0	-	0	-
4,00	-7,05	0,00	-7,05
6,27	-7,03	0,01	-7,04
10,53	-6,99	0,03	-7,02
14,81	-6,94	0,06	-7,00
19,09	-6,86	0,10	-6,96
23,38	-6,77	0,15	-6,92
27,67	-6,66	0,21	-6,87
31,96	-6,52	0,28	-6,80
36,25	-6,37	0,37	-6,74
40,54	-6,19	0,46	-6,65
44,82	-5,99	0,56	-6,55
49,11	-5,76	0,67	-6,43
53,40	-5,52	0,79	-6,31
57,69	-5,25	0,92	-6,17
61,97	-4,94	1,07	-6,01
66,26	-4,60	1,22	-5,82
70,54	-4,23	1,38	-5,61
74,82	-3,82	1,56	-5,38
79,10	-3,36	1,74	-5,10
83,37	-2,83	1,93	-4,76
87,64	-2,22	2,13	-4,35
91,89	-1,47	2,35	-3,82
96,08	-0,46	2,57	-3,03
98,32	0,38	2,69	-2,31
100,0		2,78	

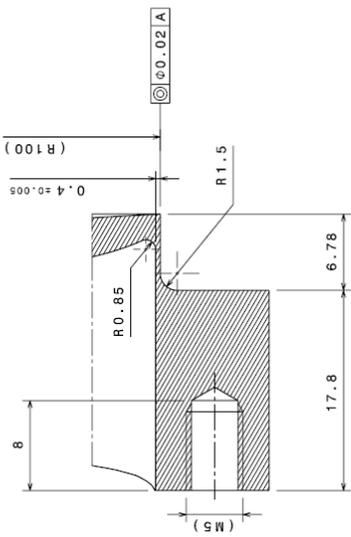
Coordonnées
profil : table 1
tolérance sur épaisseur
en chaque point : +/-0.02



Détail G
Echelle : 1:1



Détail C
Echelle : 3:1

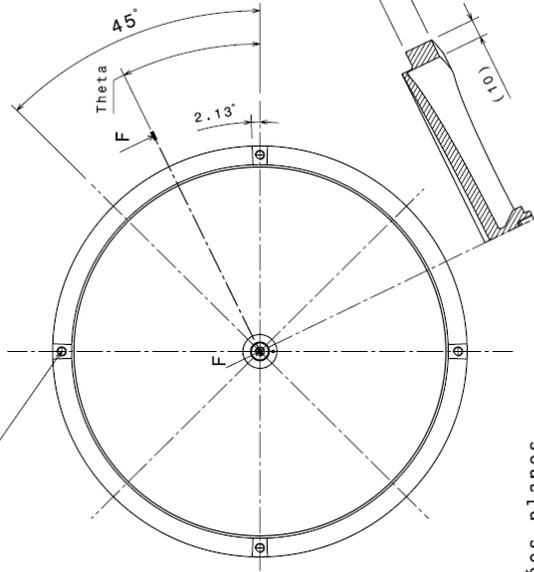


Détail B
Echelle : 3:1

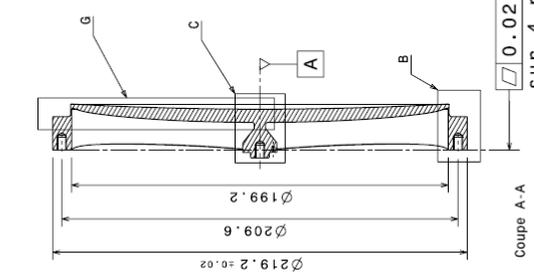
Theta (°)	e (mm)
0	17,80
2,13	17,80
3,58	17,55
5,38	17,26
7,17	16,98
8,97	16,73
10,48	16,50
12,56	16,28
14,36	16,08
16,15	15,89
17,95	15,71
19,75	15,55
21,55	15,41
23,35	15,28
25,15	15,15
26,95	15,04
28,75	14,94
30,55	14,86
32,35	14,78
34,15	14,71
35,95	14,66
37,75	14,61
39,55	14,58
41,35	14,55
43,14	14,54
45,00	14,54

Table 2

4 MS prof 7 à 90° sur dia 209.6
Sur avant trou
Ø 0.02 B-C



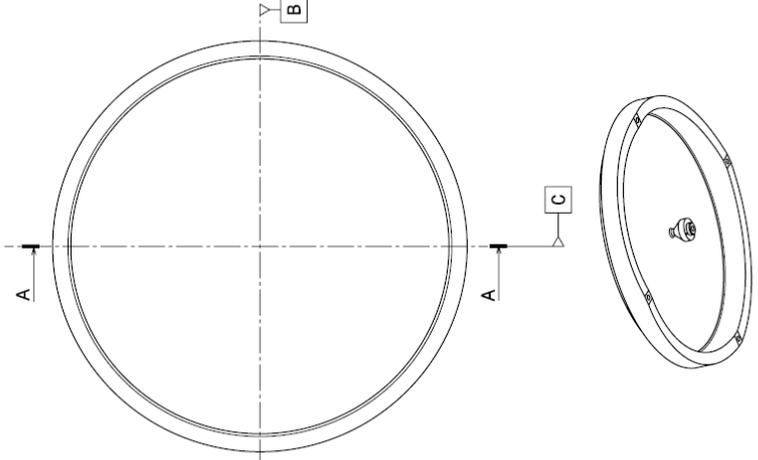
e=f(Theta) : table 2
Tolérance sur épaisseur (e)
en chaque point : +/- 0.02



Coupe A-A

sur 4 portées planes

Coupe F-F à l'angle Theta



A	20/10/06	P. Voia	L. Castrol	-	E. Prieto	Pour exécution
2	16/10/06	P. Voia	.....	.....	E. Prieto	PROFIL interne modifié
1	.....	P. Voia	.....	.....	.....	ORIGINAL ISSUE
1	.....	Drawn	Verified	PA	Authorized	Modifications
Ind Date Drawn Verified PA Authorized Material: ALSI 420 Scale: 1:2 Mass: 2.1 kg Format: A2 Treatment:						

Beam Steering Mirror



Laboratoire d'Astrophysique de Marseille
Traverse du Siphon BP8 - 13376 MARSEILLE CEDEX 12
Tél. +33 4 91 05 59 00 - Fax. +33 4 91 05 69 69 - www.omp.fr

Ce plan est notre propriété. Il ne peut être copié, reproduit ou transmis à des tiers sans autorisation écrite.

BSM - 0001 - DD - A