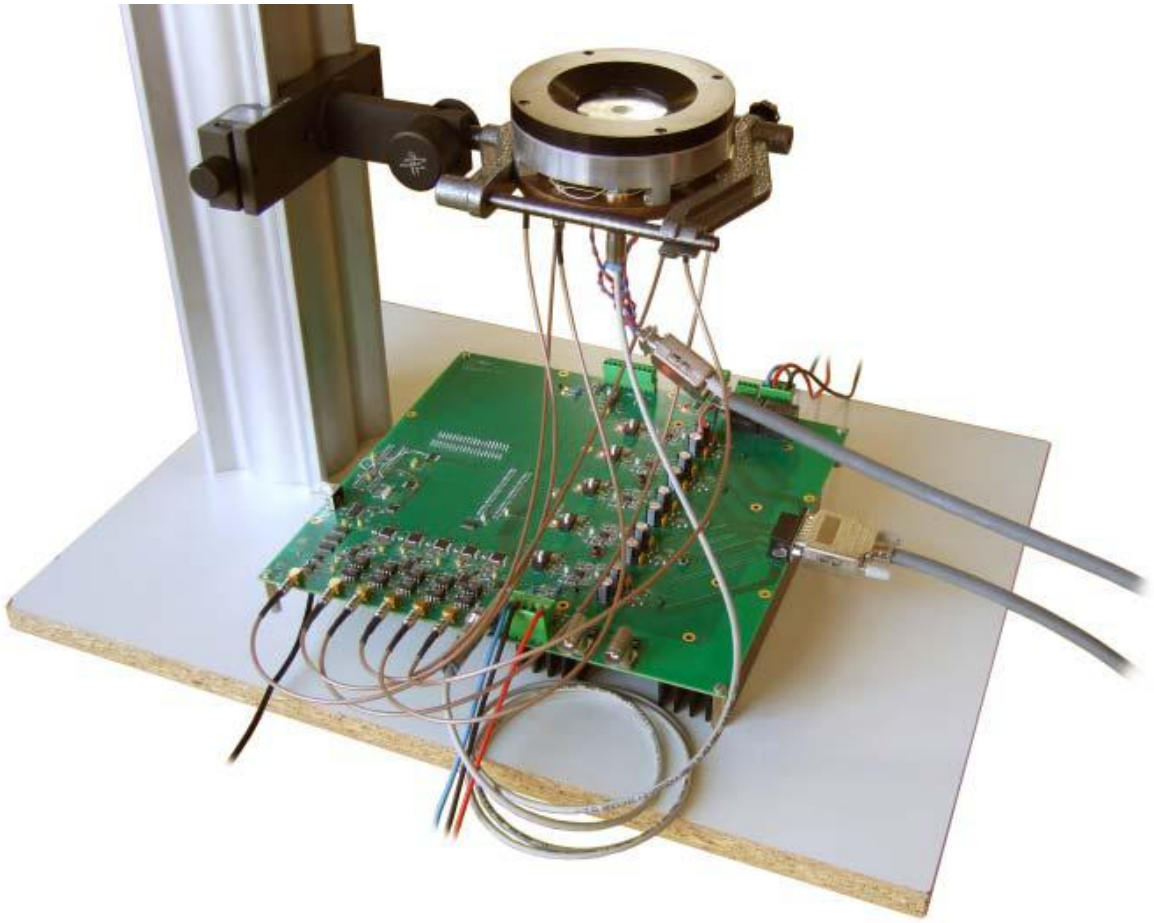
Département **TIN**
Filière **Microtechniques**
Candidat **Meyer Alain**

Modèle "end-to-end" d'un système d'optique adaptative à 5 actionneurs



Professeur responsable : Lorenzo Zago

I. Résumé

L'objectif de ce travail de diplôme est de réaliser la modélisation complète d'un miroir déformable conçu pour fonctionner dans un système d'optique adaptative. Dans un premier temps, le rapport commence par une recherche documentaire sur les systèmes d'optique adaptative et une description du miroir déformable.

Ensuite, le modèle est programmé sur une base Matlab, à l'aide des toolbox CALFEM et OpenFem qui permettent de gérer les méthodes de calcul par éléments finis. Le mécanisme est constitué d'un miroir en verre, d'un système de 5 actionneurs électromagnétiques et capteurs capacitifs, ainsi que leurs éléments de structure et d'interface. Cette étude intègre à la fois toutes les caractéristiques et performances structurelles, mécaniques et dynamiques.

Pour atteindre ce but, l'analyse comprend la discrétisation du système, une synthèse des déformations statiques du modèle, le calcul des modes propres, l'obtention d'une fonction de transfert avec les forces sur les actuateurs en entrée et en sortie les déplacements du miroir et la mise en place d'un système de contrôle. Plusieurs comparaisons des résultats sont faites à partir du solver Cosmos de SolidWorks et divers types de contrôleurs sont testés.

Finalement, le fonctionnement des modèles est simulé avec Simulink ce qui permet de caractériser leurs performances théoriques ainsi que de mettre en évidence les défauts et les qualités du système.

II. Remerciements

Ce travail de diplôme a été réalisé dans l'institut IAI de la HEIG-VD. Je tiens à remercier M. Lorenzo Zago pour avoir dirigé ce travail, pour toute l'attention qu'il a portée et pour les moyens mis à ma disposition durant ce travail. Qu'il trouve également ici l'expression de toute ma reconnaissance pour m'avoir donné l'occasion de découvrir le monde de l'optique adaptative, ainsi que le domaine de la simulation mécanique des structures.

Pour ses précieux conseils de tous ordres et sa disponibilité, un grand merci à Monsieur Raoul Herzog, son expérience et ses grandes compétences ont permis l'accomplissement des parties concernant Simulink et la régulation présente dans ce travail.

J'associe à mes remerciements l'institut IAI pour la mise en place des moyens permettant l'accomplissement de ce travail.

Enfin, je voudrais remercier mes amis et ma famille pour leur aide sympathique tant sur le plan scientifique, qu'humain et pour la bonne humeur dans laquelle ce travail a été accompli.

III. Cadre

Ce travail de diplôme se consacre à l'étude d'un miroir déformable utilisable dans un système d'optique adaptative. Le système a été créé il y a deux ans dans le cadre de l'IAI. Cependant il n'est pas vraiment fonctionnel, par conséquent cette étude a pour but de mettre en évidence les éventuelles sources de disfonctionnements ainsi que de caractériser ces performances théoriques.

IV. Cahier des charges :

Recherche documentaire sur les systèmes d'optique adaptative et en particulier des miroirs déformables actionnés par voice coils.

Récupération et mise au propre du modèle SolidWorks du prototype.

Modèle end-to-end du mécanisme:

- Modèle à éléments finis (sur base Matlab) de tout le mécanisme, sous-modèle du miroir déformable.
- Modélisation des paramètres électrodynamiques (KF des actionneurs, gains des capteurs, ...)
- Fonctions de transfert pour la boucle de régulation.
- Calcul des gains et autres paramètres de la boucle de contrôle.
- Simulation dynamique du système avec Matlab/Simulink.
- Inclusion des aspects thermiques.

Validation du modèle et analyse des performances prédites pour le mécanisme.

La partie simulant le comportement thermique du système n'a pas été réalisée par manque de temps, en accord avec le professeur responsable de ce travail.

Le cahier de charges original a été signé et approuvé par :

Michel Etique	**Chef du département Technologies industrielles**
Lorenzo Zago	**Professeur responsable**
Alain Meyer	**Candidat**

Table des matières

I. Résumé 3
II. Remerciements 3
III. Cadre 3
IV. Cahier des charges : 4
1 Introduction 7
1.1 Utilité de l'optique adaptative 8
1.2 Histoire de l'optique adaptative 8
1.3 Application de l'optique adaptative 10
2 Description générale d'un système d'OA 12
2.1 Mesure des déformations 12
2.2 Séparation du faisceau lumineux 13
2.3 L'analyseur de front d'onde 13
2.4 Turbulence atmosphérique 13
2.5 Analyse par estimation de la phase 14
2.6 L'analyse avec source de référence 15
2.7 L'analyse avec l'objet comme source de référence 15
2.8 Analyse par estimation des dérivées de la phase 15
2.9 Analyse par estimation de la courbure de la surface d'onde 15
2.10 Analyseur de Shack-Hartmann 16
3 Reconstruction du front d'onde 18
3.2 Le système de contrôle 21
3.3 Correction des déformations 22
4 Les miroirs déformables 24
4.1 Le miroir Tip-Tilt 25
4.2 Les correcteurs à cristaux liquides 26
4.3 Le miroir déformable corrigeant les ordres élevés 26
4.4 Les miroirs déformables actuels 29
5 Le miroir déformable HEADS 38
5.1 Description HEADS 38
5.2 Description fonctionnelle et liste des composants 39
6 Modélisation 50
6.1 Méthode d'approche 50

7 FEM : méthode d'éléments finis 51
8 Principe de fonctionnement des toolbox 52
8.1 Introduction ..... **Erreur ! Signet non défini.**
9 Fonctions système statique/dynamique 53
9.1 Introduction ..... **Erreur ! Signet non défini.**
9.2 Valeur propre 53
9.3 Elément 54
9.4 Méthode de calcul utilisé par le programme 55
9.5 Assemblage matrice 57
10 Modélisation 60
11 Le modèle final 62
12 Analyse statique 68
12.1 Force à appliquer 68
12.2 Effet gravité 70
13 Calcul des modes propres 74
13.1 Discussion des résultats 76
14 Fonction de transfert 80
15 Régulation 84
15.1 Réglage PID 85
15.2 Influence du retard 88
15.3 Régulation avec filtres de compensation 90
16 Simulation dynamique 94
16.1 Simulation PID 94
16.2 Système discret 105
16.3 Simulation avec filtre de compensation 113
16.4 Conclusion des simulations 117
17 Conclusion 120
18 Bibliographie 124
19 Webographie 128
20 Annexe 130
20.1 Code Matlab 130

1 Introduction

Depuis toujours les hommes ont été attirés par l'observation du ciel, l'astronomie est par conséquent une science ancienne. Depuis toujours, ils ont cherché à comprendre la nature de leur existence et la place de l'humanité dans le cosmos, rien de moins. Ce sont des questions qui préoccupent le genre humain depuis des milliers d'années.

Nous explorons notre univers de bien des manières. Que ce soit en construisant des télescopes et en étudiant les galaxies, ou par des légendes sur les étoiles et leur rôle dans nos vies, nous essayons de comprendre quelle est notre place dans l'univers.

Les premières tentatives d'enregistrement du temps ont plus que probablement été faites à partir de l'observation des phases lunaires. Puis son développement fut probablement accéléré par le problème suivant. Les premiers astronomes se rendirent compte que les trois intervalles de temps de base, le jour, le mois défini par le cycle lunaire et l'année, n'étaient pas compatibles entre eux. En particulier, l'année ne correspondait ni à un nombre entier de mois, ni à un nombre entier de jours. L'établissement de calendriers fiables nécessitait en conséquence une scrutation très attentive du ciel. C'est ainsi que l'observation des astres se développa.

Figure 1 Calendrier Maya

Les observations toujours plus fines du ciel menèrent à la découverte du mouvement des planètes, des lois de Keepler puis à la théorie de la gravitation de Newton… Depuis toujours les moyens d'observation ont évolué jusqu'à atteindre les limites de l'optique traditionnelle. C'est à ce moment que l'optique adaptative fit son apparition.

1.1 Utilité de l'optique adaptative

Les limites de l'optique traditionnelle s'expliquent en raison de l'atmosphère terrestre qui est constituée de couches d'air de différentes températures se mélangeant les unes aux autres causant de grands mouvements dans les masses d'air appelés turbulences. Pour les astronomes, ces turbulences sont néfastes car elles perturbent la trajectoire des rayons lumineux. Ce faisant, elles sont responsables du scintillement des étoiles dans le ciel et de la distorsion des images collectées par les télescopes.

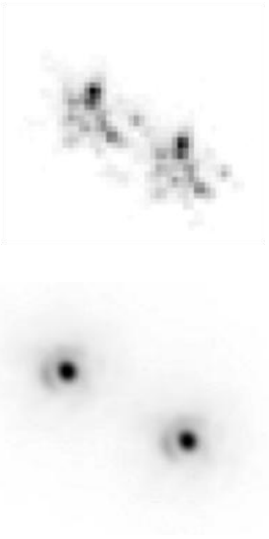


Figure 2 Observation avec et sans optique adaptative

Un moyen simple de minimiser cet inconvénient est de construire les observatoires astronomiques en altitude de façon à ce que les télescopes puissent observer la lumière des étoiles sans qu'elle n'ait a traversée la totalité de la couche atmosphérique. On peut ainsi obtenir des images qui sont jusqu'à dix fois meilleures qu'au niveau de la mer.

Des améliorations peuvent également être apportées aux observatoires eux-mêmes. On ajoute de plus en plus des trappes de ventilation sur les murs des observatoires de façon à ce que l'air dans lequel baigne le télescope soit à la même température que l'air extérieur. Des courants d'air laminaires sont aussi projetés au-dessus du miroir pour limiter les turbulences.

Un autre moyen, plus radical, est d'installer les télescopes dans l'espace, là où l'atmosphère ne peut gêner les observations. C'est pourquoi, aujourd'hui, les scientifiques lancent en orbite des satellites astronomiques comme Hubble, FUSE et MOST.

1.2 Histoire de l'optique adaptative

A partir du début du 20ème siècle, les chercheurs ont entrepris de résoudre les problèmes de distorsion d'image dus aux perturbations atmosphériques. Les premiers travaux en ce sens sont réalisés en 1902 par le physicien allemand Karl Strehl qui propose un moyen d'évaluer la qualité des images produites par les systèmes optiques.

Figure 3 Horace Babcock

En 1941, le mathématicien soviétique Andrei Nikolaevich Kolmogorov réalise plusieurs percées dans l'étude des turbulences. Ses travaux seront plus tard intégrés à des modèles atmosphériques qui auront pour but de corriger les distorsions affectant les images astronomiques.

En 1953, l'astronome américain Horace Babcock invente l'optique adaptative, un procédé qui corrige les distorsions d'image dues à l'atmosphère terrestre. La technique consiste à

prélever un échantillon de lumière et à calculer son degré de distorsion. Des miroirs déformables sont ensuite utilisés pour redresser les rayons lumineux et produire une image corrigée. Le procédé est prometteur, mais pour des raisons d'ordre technique, Babcock ne sera pas en mesure de construire son système.

En 1957, le physicien américain Robert B. Leighton de l'Institut de Technologie de la Californie parvient à réduire les distorsions d'image produites par l'atmosphère avec le télescope de 1,5 mètre de l'Observatoire du Mont Wilson, en Californie. Sa technique consiste à incliner plusieurs fois par seconde le miroir secondaire du télescope ce qui à pour conséquence de corriger le tip-tilt. Il obtient ainsi les meilleures images jamais réalisées de Jupiter et Saturne à son époque.

Toujours en 1957, le physicien soviétique Vladimir Pavlovich Linnik publie un article dans lequel il propose de diriger un laser vers le ciel et de faire le foyer dans la haute atmosphère de façon à faire réagir les molécules de sodium s'y trouvant pour générer une « étoile guide ».

Un système d'optique adaptative a besoin d'une « étoile guide » qui soit suffisamment brillante au voisinage de l'astre observé pour alimenter convenablement le senseur de front d'onde du télescope. Or, de telles étoiles ne se trouvent pas partout, d'où l'idée d'en générer une. La solution est révolutionnaire, mais par malheur elle ne sera connue de la communauté scientifique internationale qu'en 1992, au moment où l'on traduit en anglais l'article de Linnik.

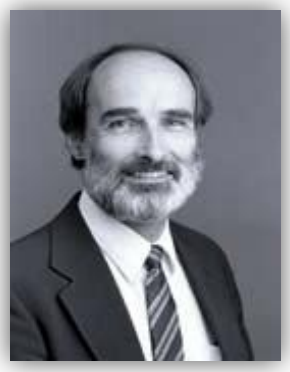


Figure 4 Thomas Cathey

En 1970, l'ingénieur américain W. Thomas Cathey et ses collaborateurs sont les premiers à faire la démonstration expérimentale d'un système d'optique adaptative fonctionnant en temps réel.

C'est à cette même période que l'US Air Force entreprend des recherches d'envergure sur le sujet dans le cadre d'études sur des systèmes de défense antimissiles balistiques. Les scientifiques cherchaient une méthode de focalisation d'un rayon laser sur une cible éloignée sans que la qualité du faisceau se dégrade dans l'atmosphère. A cette même époque l'URSS lançait de nombreux satellites militaires que l'Agence pour les Projets de Recherche Avancée de Défense cherchait à identifier. Les photographies prises par des télescopes terrestres de poursuite de satellites étaient trop déformées par l'atmosphère et donc inutilisables même après traitement numérique. Ainsi les premières recherches débutèrent sous le sceau du "secret défense". Les systèmes développés dans ce contexte de "guerre des étoiles" furent bien opérationnels mais rendus publics que vers les années 90.

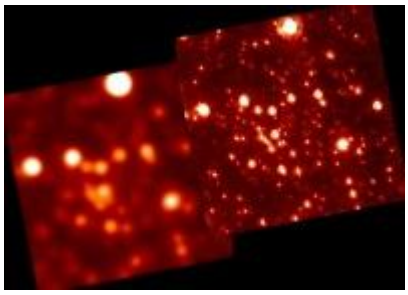


Figure 5 Le centre de la galaxie vu sans et avec optique adaptative (télescope Hawaï)

À partir de 1991, l'armée américaine commence à rendre publics ses travaux en matière d'optique adaptative, travaux jusqu'alors classés comme secrets. La communauté astronomique constate alors qu'elle réalisait déjà des systèmes plus performants et moins coûteux que les militaires.

En 2005, 18 observatoires astronomiques et 26 grands télescopes sont équipés de systèmes de correction d'image. Aujourd'hui, ces systèmes font partie de l'équipement standard des grands observatoires.

1.3 Application de l'optique adaptative

Pendant des années, l'optique adaptative a été limitée aux applications astronomiques et militaires. Une des raisons était les composants extrêmement chers, particulièrement les miroirs déformables, exigés.

Cependant l'optique adaptative se démocratise et trouve de plus en plus de nouvelles applications notamment dans le cadre de la vision qui s'est beaucoup développé ces dernières années. La situation dans l'œil, où les composants optiques brouillent les images rétiniennes, est semblable à celle des étoiles que l'on observe à l'aide d'un télescope. Les seules différences concernent le type d'aberrations et leur comportement temporel. L'utilisation de l'optique adaptative dans l'œil a laissé enregistrer des images rétiniennes de haute résolution sur des yeux de très bonne qualité optique avec des pupilles non dilatées. Ceci a fondamentalement laissé faire l'anatomie in vivo détectant différents photorécepteurs.

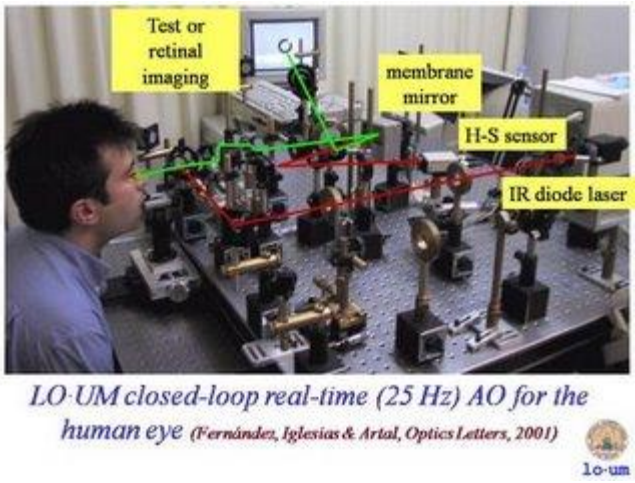


Figure 6 Image du premier système d'optique adaptative fonctionnant dans la boucle fermée pour l'œil (environ 2000)

Au-delà de l'astronomie, de la vision ou des projets militaires comme les systèmes d'observation au sol, aéroportée ou par satellite, ainsi que les systèmes de contre-mesure, notamment anti-missile, l'optique adaptative débarque dans de nombreux domaines, mais les projets sont en cours de développement. Toutefois, on peut les mentionner pour monter les différentes facettes des futures orientations :

Ao-microscopie. Une application où l'optique adaptative montre l'énorme potentiel est la microscopie. Dans n'importe quel type de microscope, l'instrument lui-même, ou d'une manière plus importante l'échantillon, présente des aberrations qui dégradent la qualité de l'image. En incorporant l'optique adaptative, on a pu mesurer et corriger les déformations induites par l'échantillon obtenant des images bien meilleures. Dans cette direction, Emilio Gualda et Juanma Bueno incorporent un système d'optique adaptative sur un microscope à multiphotons.

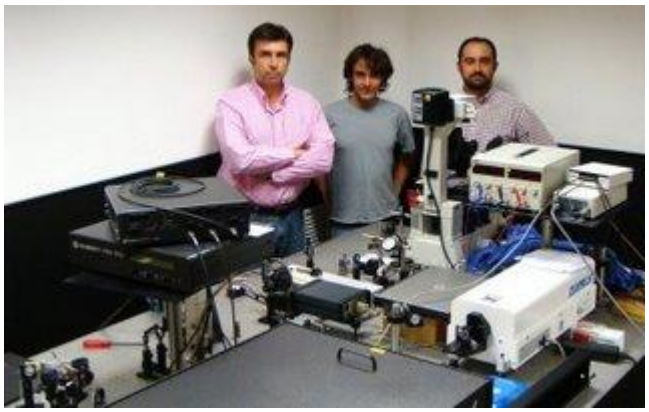


Figure 7 Juanma Bueno (droite), Emilio Gualda et Pablo Artal avec le microscope à multiphotons de LO.UM.

Ao-haute formation d'impulsion de laser d'intensité. Le même type de concept a été employé pour améliorer le foyer dans des impulsions extrêmement intenses de laser. Ceci laissera produire des taches avec l'énorme densité de puissance pour exécuter différentes expériences. Notamment dans le cadre de la recherche sur les futures centrales à fusion (projet ITER), où il s'agit d'affiner le faisceau émis par une source laser afin de lui conférer une pureté et une homogénéité telles qu'il se focalise sur un point le plus précis possible.

Télécommunications optiques de l'espace Ao-libre. Dans les communications, des signaux sont tordus, limitant la distance et l'efficacité des systèmes. En employant l'optique adaptative, les différents groupes et compagnies promettent d'améliorer cette technologie…

Ao-lithographie, systèmes d'identification d'Ao-dispositif, Ao-formation d'image dans des produits de consommation… sont de nombreux domaines où les développements se font.

Probablement autant d'autres applications sont envisageables comme vous pouvez l'imaginer. Cependant la plupart du temps, le prix des composants est en général toujours trop cher pour les applications low-cost, mais il est possible que ça change grâce aux nouvelles technologies, notamment les MOEMS. Ceci pourrait bientôt ouvrir d'autres options. Plus tard, l'optique adaptative sera vraiment omniprésente et deviendra une partie de notre routine quotidienne.

2 Description générale d'un système d'OA

Pour corriger les déformations de l'image dues à la turbulence atmosphérique, un système adaptatif est placé dans le plan focal juste avant l'oculaire ou l'instrument de mesure (caméra, spectrographe, polarimètre, coronographe) qui recueille la lumière du télescope. A la sortie du télescope, on envoie la lumière perturbée sur un miroir déformable auquel on applique des déformations inverses de celles de la surface d'onde incidente. Grâce à ce miroir elle retrouve sa planéité. Tout le problème revient donc à savoir quelles déformations il faut appliquer au miroir. Pour cela il est nécessaire d'analyser le front d'onde en temps réel. Donc une petite partie de la lumière incidente est prélevée à l'aide d'un séparateur de faisceau puis envoyée sur un dispositif d'analyse de front d'onde. Ce dernier dispositif adresse alors à un ordinateur ou un microcontrôleur la carte des déformations et celui-ci calcule la valeur des signaux électriques à envoyer au miroir pour le déformer. Le schéma ci-dessous nous permet de décrire généralement le système d'OA.

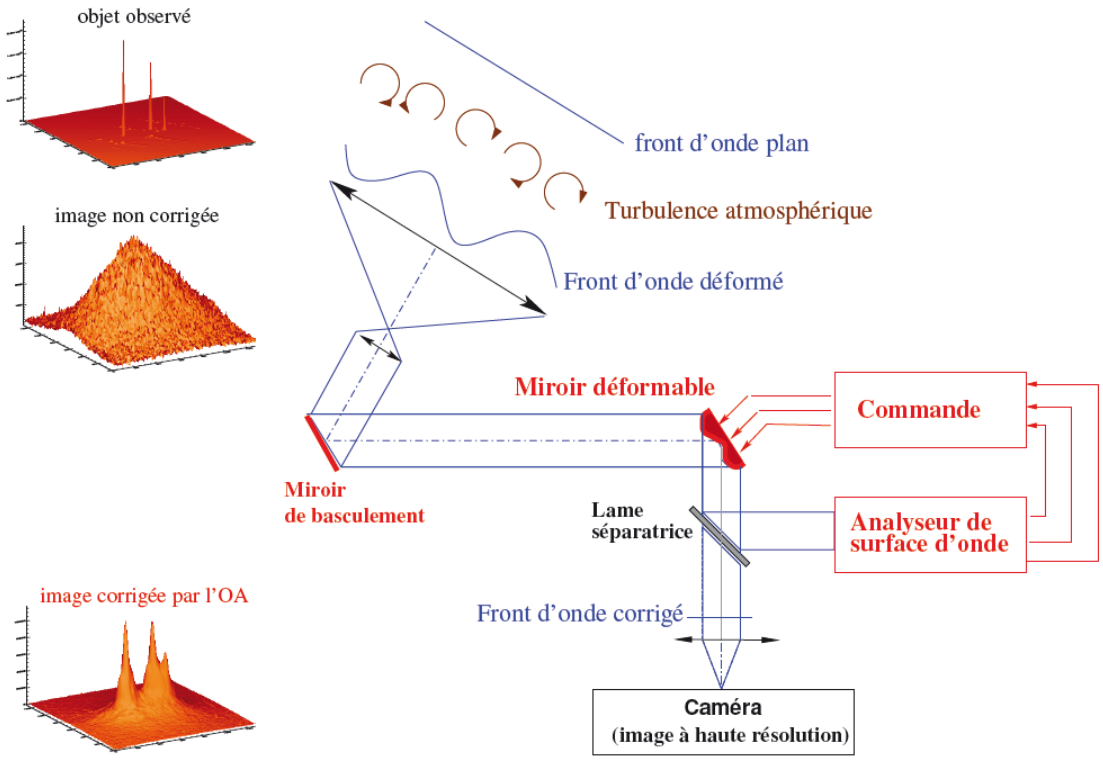


Figure 8 Le système d'OA classique boucle fermée. L'analyseur de surface d'onde est placé derrière les miroirs et donne des mesures de phase résiduelle à partir desquels on détermine les nouvelles tensions.

2.1 Mesure des déformations

Il faut d'abord isoler une partie de la lumière afin de pouvoir effectuer son analyse. Cette séparation se fait à l'aide d'un séparateur de faisceaux. Ensuite un senseur de courbure réalise l'analyse du front d'onde. Les données recueillies par ce senseur sont ensuite envoyées vers un calculateur qui détermine les corrections à appliquer sur le front d'onde.

2.2 Séparation du faisceau lumineux

Le faisceau est séparé en deux en sortie du télescope. Une partie continue sa trajectoire vers l'instrument d'observation et l'autre est envoyée vers les instruments de mesure du front d'onde. Cette séparation se fait par un miroir dichroïque (beamsplitter) ou lame semi-réfléchissante qui sépare lumière en deux.

2.3 L'analyseur de front d'onde

Cet analyseur de front d'onde va permettre de mesurer les déformations du front d'onde. Il effectue l'analyse en temps réel. C'est un système optique associé à un capteur.

Il existe plusieurs méthodes d'analyse : la mesure des écarts de phase résiduels de l'onde incidente après le dispositif de correction, une technique de connaissance de la dérivée de la phase dans deux directions perpendiculaires, l'estimation des courbures de la surface d'onde. Cependant avant de comprendre le fonctionnement du capteur il est nécessaire de caractériser la turbulence.

2.4 Turbulence atmosphérique

Les ondes lumineuses en provenance des étoiles traversent l'atmosphère. On peut représenter l'atmosphère comme une succession de couches d'air à différentes températures et se déplaçant les unes par rapport aux autres. Les variations de températures associées aux turbulences atmosphériques correspondent à des variations de la densité de l'air et de ce fait, de la vitesse de la lumière. Il en résulte que l'onde est perturbée et l'image reconstituée par le télescope dégradée.

La caractérisation précise de la turbulence atmosphérique et ses effets sur les images est un problème complexe. Cependant, pour en simplifier l'explication, on peut considérer que l'atmosphère terrestre, la couche d'air qui nous sépare de l'espace, est en perpétuel mouvement, et ce à une multitude d'échelles. Des grands mouvements de masses d'air à l'échelle continentale, aux micro-mouvements de minuscules bulles d'air roulant les unes sur les autres, en passant par les couches poussées par des vents de directions différentes suivant l'altitude, tous contribuent à la turbulence atmosphérique. Or ces masses d'air variées, en mouvement, ont des caractéristiques optiques différentes, essentiellement dues à leurs différentes températures (l'indice de réfraction de l'air et par conséquent la vitesse de propagation de la lumière en son sein, varient avec la température). Ainsi, au travers de l'air, les images sont continuellement déformées.

Un modèle très étudié de l'atmosphère, et confirmé dans ses grandes lignes par plusieurs études expérimentales, est celui de *Kolmogorov*. Ce modèle consiste à représenter l'atmosphère comme une structure semi-fractale de masses d'air d'échelles décroissantes depuis l'échelle externe (environ 150 mètres à la surface) correspondant aux plus grands phénomènes macroscopiques (couches d'air, vents, perturbations météorologiques) et transmettant leur énergie cinétique d'une échelle à l'autre par tourbillonnement jusqu'à la plus petite échelle où l'énergie se dissipe en chaleur par frottements visqueux. L'étude mathématique de ce modèle permet de faire ressortir plusieurs paramètres caractérisant l'état de la turbulence.

Les effets de la turbulence sont ainsi particulièrement sensibles pour l'astronome, qui, du sol, tente de former des images à partir d'un faisceau qui a traversé des kilomètres d'atmosphère. De plus, la perturbation due à la turbulence atmosphérique, déjà sensible pour les étoiles à l'œil nu, va devenir de plus en plus gênante, à mesure que l'instrument va se perfectionner. Plus on tente de ``grossir'' les images, d'augmenter le pouvoir de résolution de l'instrument, plus la turbulence se montre comme une barrière infranchissable.

En pratique, au sol, contrairement à la situation prévalant dans l'espace, la résolution des images brutes que l'ont peut obtenir au foyer d'un grand télescope ne dépend pas de la taille du miroir mais de la turbulence. Suivant les conditions (site, vents,...), la turbulence peut être plus ou moins importante.

Les effets de la turbulence sont le plus souvent peu sensibles à l'œil nu, de jour, car le pouvoir de *résolution* de l'œil -la finesse des détails qu'il peut distinguer- n'est pas très grand, et les masses d'air que notre regard traverse ne sont en général pas assez grandes ou assez turbulentes pour que l'effet de la turbulence soit sensible. Cependant il y a au moins deux cas où cet effet est perceptible: lorsque l'on regarde par dessus une étendue assez importante de bitume chauffé par le soleil en été (parking, route), les images sont déformées, dansantes...! Et la nuit, lorsque l'on regarde les étoiles, la scintillation (le clignotement (la variation d'intensité) / tremblement (seeing)) que l'on peut observer sous nos cieux agités est aussi une conséquence de l'agitation de l'air au dessus de nous.

Les télescopes, même dans les meilleurs sites, obtiennent une finesse angulaire dans les images de l'ordre d'une seconde d'arc au lieu de leur limite théorique donnée par les lois de la diffraction (ex: télescope de 10m de diamètre -> limite théorique 10msec d'arc).

Le pouvoir de résolution est la capacité de distinguer comme deux éléments bien séparés des objets. Parce que la lumière est une onde, la théorie et l'observation nous montrent que l'image d'une étoile n'est jamais un point mais une petite tache circulaire. Son diamètre dépend de la taille du miroir. Plus il est grand plus la résolution est petite. Avec un grand miroir on peut donc distinguer des détails plus fins qu'avec un petit (et le flux observable est également plus élevé).

2.5 Analyse par estimation de la phase

Cette méthode regroupe trois différents analyseurs : un analyseur comprenant une voie de référence sans aberrations, un analyseur utilisant comme source de référence une partie du flux émis par l'objet et enfin un analyseur utilisant une méthode purement numérique supposant l'existence d'un point source dans le champ observé.

2.6 L'analyse avec source de référence

L'analyseur utilisant cette méthode le plus connu est le Twymann-Green.

Une source ponctuelle située au centre de courbure du miroir à tester éclaire simultanément ce miroir et un miroir de référence homothétique du miroir testé. Les ondes de retour interfèrent sur un capteur d'images. Si les deux surfaces ne sont pas parfaitement homothétiques, la figure d'interférence observée contient des franges dont l'analyse permet de reconstruire la surface d'onde dégradée.

Cette méthode est le moyen le plus précis pour une évaluation quantitative. Il présente un grand intérêt pour le contrôle de qualité d'éléments optiques et n'est pas adapté à une analyse de déformation due à la turbulence atmosphérique.

2.7 L'analyse avec l'objet comme source de référence

Les interféromètres à dédoublement radial utilisent l'objet comme source de référence. Ils permettent une focalisation du front d'onde incident à mesurer sur un petit trou inférieur à la tache de diffraction (pour une optique parfaite). La lumière alors diffractée sert d'onde sphérique de référence, tandis que la lumière non diffractée traverse une couche mince permettant son atténuation afin d'optimiser le contraste des franges. Les problèmes de variations de position de l'image de la source considérée, liées la turbulence atmosphérique, peuvent être évités en défocalisant la tache image formée sur le trou.

Ce système d'analyse n'est généralement pas utilisé à cause de leur faible rendement (par rapport à l'intensité des sources à observer). Une forte atténuation des faisceaux directs est nécessaire afin d'améliorer le contraste des franges. Ils sont pourtant pratiques puisqu'ils mènent directement à la mesure de la phase.

2.8 Analyse par estimation des dérivées de la phase

On peut d'abord trouver des systèmes interférométriques à dédoublement latéral du front d'onde mesurant la phase en utilisant l'onde incidente comme onde de référence, mais décalée suivant une direction donnée. Il existe également des systèmes géométriques comme par exemple la méthode de Hartmann. Elle consiste à placer un masque dans la pupille du système optique considéré. Ce masque est percé de trous réguliers. Chaque trou délimite un pinceau de rayons que l'on enregistre par exemple sur une caméra placée près du foyer. En effectuant la comparaison entre les positions théoriques des "impacts" des pinceaux et les positions mesurées, il est alors possible de calculer les pentes locales de la surface d'onde ramenées dans la pupille.

L'analyseur de Shack-Hartmann est une évolution de ce principe et il sera présenté plus en détail par la suite.

2.9 Analyse par estimation de la courbure de la surface d'onde

Un analyseur appelé en 1988 par F Roddier "Senseur de courbure", a pour principe de mesurer directement la somme des courbures de la surface d'onde dans deux directions perpendiculaires (soit d'estimer le Laplacien de la surface d'onde).

Un des moyens possibles pour mesurer les courbures consiste à effectuer une analyse intra (P1) et extra (P2) focale de la surface d'onde.

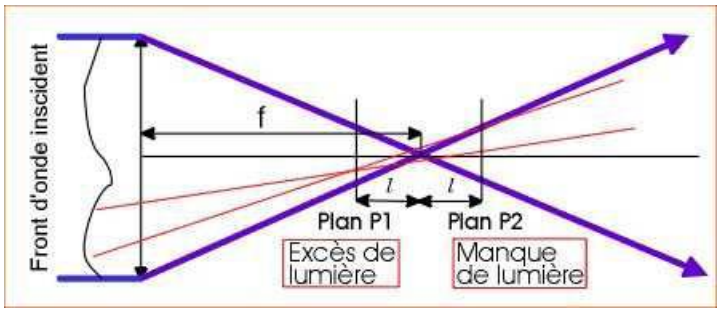


Figure 9 Principe estimation de courbure

Sur le schéma ci-dessus on peut voir que si l'onde arrive avec une certaine courbure (au lieu d'être plane), elle ne va pas se focaliser au foyer d'une lentille, mais en amont ou en aval. Ainsi, en mesurant l'intensité lumineuse dans deux plans intra et extra focaux, on peut en déduire la courbure qui a créé cette différence d'intensité.

Le défaut présent sur la surface d'onde incidente entraîne une surintensité en P1 et une sous intensité en P2. Les valeurs de ces intensités sont proportionnelles à la courbure locale du défaut.

La considération des deux plans intra et extra focaux permet de s'affranchir des problèmes de scintillation qu'il est possible de rencontrer dans le cas de forte turbulence atmosphérique.

Comme il est difficile de mettre un capteur dans les deux plans P1 et P2, il est préférable de focaliser le faisceau sur une membrane vibrante qui va défocaliser le faisceau et envoyer l'image des plans P1 et P2 sur un analyseur qui va mesurer ces intensités lumineuses en différents points de l'image.

Ce type de détecteur est particulièrement adapté aux systèmes d'OA. Ce système d'analyse est par exemple utilisé sur PUEO, système adaptatif réalisé pour corriger les images du télescope Canado-Franco-Hawaïen en 1996.

Actuellement le type d'analyseurs de front d'onde les plus utilisés sont ceux de type Shack-Hartmann, nous en exposerons le principe dans un des chapitres suivants.

Associé à cet analyseur de front d'onde un système informatique permet de recueillir et d'interpréter les données du capteur et calcule les "contre-déformations" à imprimer au miroir.

2.10 Analyseur de Shack-Hartmann

Le Shack-Hartmann est un système optique inventé en 1971 à partir de la méthode Hartmann que nous avons précédemment évoquée et qui fut elle-même inventée en 1900. Il est dédié au contrôle métrologique des optiques, par la reconstruction d'un front d'onde incident dans un système optique. Cette méthode est maintenant la plus utilisée en optique adaptative pour mesurer les distorsions d'un front d'onde par la turbulence en temps réel. C'est une méthode plus précise que celle de Hartmann. Elle permet par ailleurs d'utiliser des étoiles plus faibles.

Il peut mesurer la combinaison des deux effets responsable de l'altération du front d'onde par le système optique et par la turbulence atmosphérique.

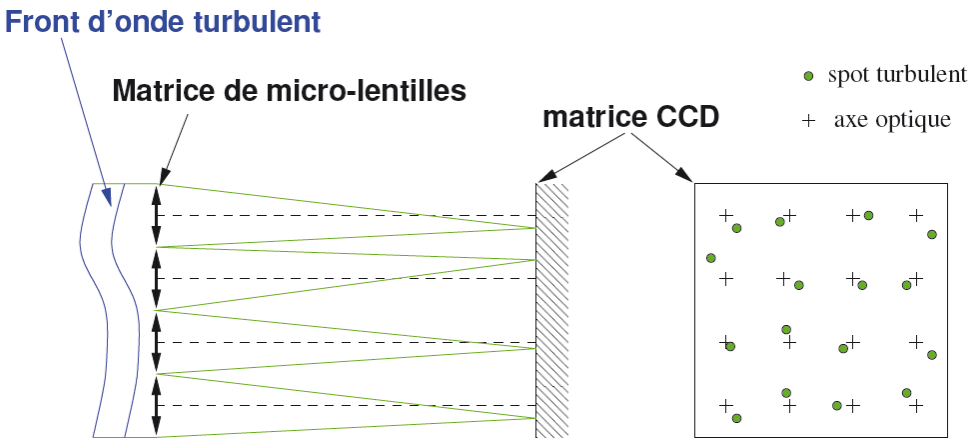


Figure 10 Schéma de fonctionnement de l'analyseur de Shack-Hartmann

La position de référence en X et en Y de chaque spot sur la matrice CCD est mesurée, grâce à des algorithmes, la mesure de position des spots peut se réaliser à mieux que le 1/50ieme de pixels. Si le front d'onde au niveau de la pupille D2 est distordu (figure 2) soit par les défauts optiques, ou soit par la turbulence, en passant à travers la matrice de microlentilles, la position des spots ne sera pas superposés sur l'axe optique. Si on admet que localement au niveau de la microlentille, le front d'onde est un front d'onde plan, mais incliné d'une certaine valeur. C'est l'assemblage de tout ces sous front d'ondes plan locaux et de leur pente qui constitue l'ensemble du front d'onde de la pupille. En mesurant l'écart Dx et Dy (dans la direction orthogonale) pour chaque spot par rapport à la position de référence que l'on arrive à reconstituer tout le front d'onde. En fait le Shack-Hartmann mesure la dérivée première du front d'onde. Géométriquement, il ne mesure que des différences de marche optique. Comme l'indice de l'air est très peu dépendant de la longueur d'onde, les fluctuations d'indice liées à la turbulence sont en première approximation achromatiques. Cette propriété présente une grande importance dans les applications astronomiques car elle permet de faire des mesures en bande spectrale étendue et d'exploiter ainsi tout le flux disponible.

3 Reconstruction du front d'onde

La reconstruction du front d'onde est une opération mathématique relativement classique, et à la portée des ordinateur actuels.

Cette reconstruction du front d'onde est basé sur une famille de fonctions mathématiques, dites polynômes de Zernike. C'est une famille de fonctions orthogonales sur le cercle unité. Il en existe d'autres comme les polynômes de Seidel etc.... On peut reconstruire mathématiquement le front d'onde grâce à une combinaison linéaire de polynôme de Zernike Z0,Z1...ZN et de leur coefficient associé a0,a1..aN.

$$W(r,\theta) = a_0 Z_0(r,\theta) + a_1 Z_1(r,\theta) + a_2 Z_2(r,\theta) + \ldots\ldots = \sum_{i=0}^{N} a_i Z_i(r,\theta)$$

où r est compris entre 0 et 1 et θ entre 0 et 2π.

Cependant avant de vouloir reconstruire le front d'onde, il faut auparavant obtenir ces fameux coefficients. Pour ce faire, on utilise les fonctions suivantes :

$$\begin{aligned} Z_n^m(\rho,\theta) &= N_n^m R_n^{|m|}(\rho)\cos(m\theta) \quad \text{for } m \geq 0,\ 0 \leq \rho \leq 1,\ 0 \leq \theta \leq 2\pi \\ &= -N_n^m R_n^{|m|}(\rho)\sin(m\theta) \quad \text{for } m < 0,\ 0 \leq \rho \leq 1,\ 0 \leq \theta \leq 2\pi \end{aligned}$$

for a given n: m can only take on values of $-n, -n+2, -n+4, \ldots, n$

N_n^m is the normalization factor

$$N_n^m = \sqrt{\frac{2(n+1)}{1+\delta_{m0}}} \qquad \delta_{m0} = 1 \text{ for } m = 0, \quad \delta_{m0} = 0 \text{ for } m \neq 0$$

$R_n^{|m|}(\rho)$ is the radial polynomial

$$R_n^{|m|}(\rho) = \sum_{s=0}^{(n-|m|)/2} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s!\left[0.5(n+|m|)-s\right]!\left[0.5(n-|m|)-s\right]!}\rho^{n-2s}$$

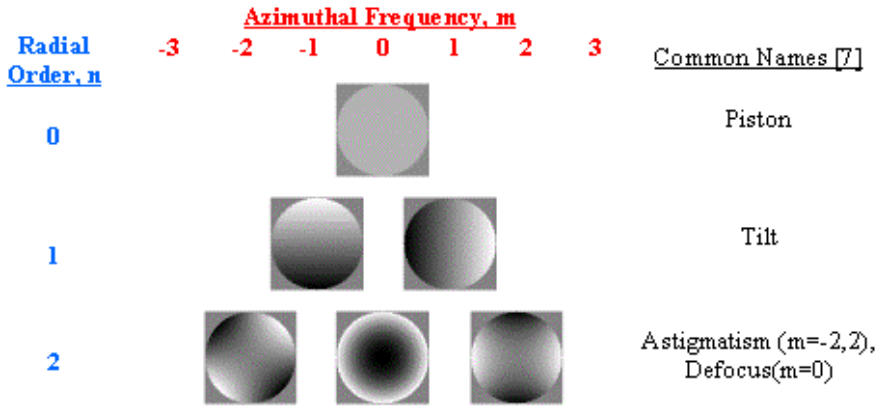


Figure 11 Les zones sombres représentent un affaissement de la surface

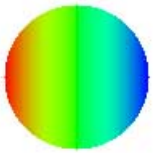
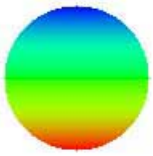
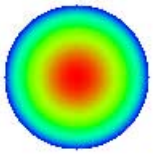
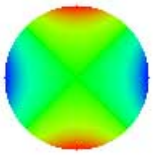
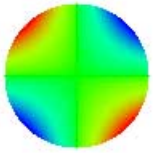
***n* du mode et aberration correspondante**	**Expression de $W_n(x,y)$**	**Représentation**
1. Piston	1	
2. Inclinaison du front d'onde selon x (x tilt)	x	
3. Inclinaison selon y (y tilt)	y	
4. Défocalisation (defocus)	$2r^2-1$	
5. Astigmatisme à 0°	x^2-y^2	
6. Astigmatisme à 45°	$2xy$	

Figure 12 Illustration des premiers modes de Zernike avec leurs polynômes caractéristiques

Plus le numéro du polynôme de Zernike a un d'indice élevé, plus il traduit des aberrations d'ordre élevé, et aussi des formes d'ondes de plus en plus complexes.

Ce qui est bien utile, avec cette famille de polynômes, c'est qu'ils représentent des aberrations optiques indépendantes les unes des autres. Le coefficient (a1) devant le polynôme Z1 représente un Tilt sur l'axe des X qui n'a rien a avoir avec le coefficient (a2) devant Z2 qui représente un Tilt sur l'axe des Y, le coefficient devant Z3 représente (a3) le défocus qui n'a rien avoir avec a1 et a2. On peut donc séparer les aberrations les unes des autres.

On appelle cette reconstruction du front d'onde par polynômes de Zernike, la méthode de reconstruction modale.

Le font d'onde W est parfaitement déterminé et peut être représenté sous forme de cartographie pour décrire les déformations.

Ci-dessous la figure montre la position des spots lorsqu'une onde très déformée traverse le réseau de microlentilles, en rouge les points de référence, en blanc, ceux mesurés. A côté la forme du front d'onde correspondante.

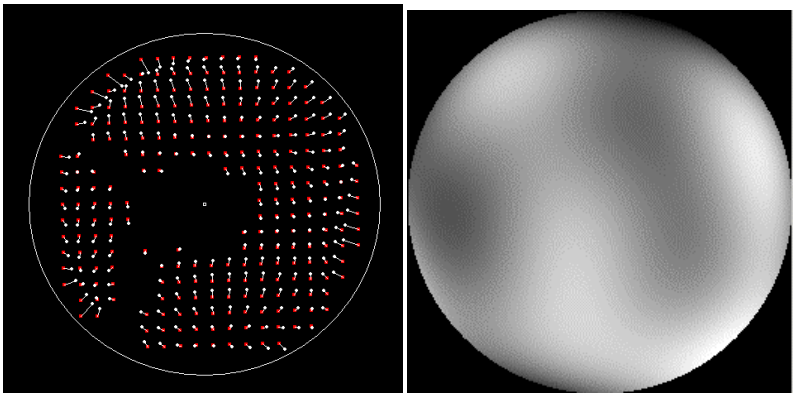


Figure 13 Illustration du résultat donnée par un Shack-Hartmann

Pour calculer la fonction de transfert de modulation (FTM ou MTF en anglais) caractéristique de la qualité du système optique, la fonction pupillaire P doit être reconstruite (elle est directement liée à exp(iW)). La fonction de transfert optique (FTO) est ensuite déduite par autocorrélation de P et ainsi la FTM est obtenue, elle est le module de la FTO. On obtient alors facilement la réponse impulsionnelle (RI) du système optique en prenant le module au carré de la transformée de fourrier de P. Lorsqu'il n'y a pas d'aberrations du front d'onde, la RI est une simple fonction d'Airy. La RI permet par un produit de convolution avec une image, de déterminer l'image obtenue après traversée de l'instrument optique.

3.1.1 Ordre de grandeurs d'un Shack-Hartmann

Les paramètres qui affectent les performances des détecteurs Shack-Hartmann sont :

- le nombre des microlentilles (est de l'ordre de $(D / r0)^2$ où D est le diamètre du télescope et r0 le diamètre du télescope qui même en présence de turbulence serait à la limite de diffraction (diamètre de Fried), ce coefficient permet d'avoir une indication sur l'effet de la turbulence.

AN : D = 1,5m, r0moy = 10cm, un réseau de 16 x 16 pupilles est nécessaire

- la taille des microlentilles, de l'ordre de 100 à 500mm (généralement on compte 10 pixels par microlentille

- la focale des microlentilles qui doit être grande car cela conditionne la précision de mesure des Dx et Dy
- le nombre de modes utilisés pour reconstruire le front d'onde
- le temps d'exposition qui doit être le plus court pour une mesure en temps réel.

Dans le cadre de ce travail, il est important de tenir compte des différents défauts du capteur afin d'obtenir un retard global du système afin de simuler l'ensemble de façon la plus réaliste possible.

3.1.2 Procédé de fabrication des microlentilles

Le procédé de fabrication de microlentilles ressemble à celui de fabrication des circuits électroniques : on recouvre un petit morceau de verre avec de la résine photosensible, on isole certaines parties avec des ultraviolets puis on la développe dans un bain particulier. La résine ayant été insolée par endroits précis, prend n x n formes sphériques sur l'ensemble de la plaque.

Cette plaque n'excède pas la taille d'un ongle. Elle est placée immédiatement avant la cellule CCD à la distance focale. Dans le cas du Shack-Hartmann développé par Julien Martinet, la matrice de microlentille mesure 10 sur 10 mm et compte plus de 4000 lentilles.

3.2 Le système de contrôle

Les données concernant les déformations du front d'onde étant recueillies par l'analyseur, il est alors nécessaire de calculer le traitement qu'il faudra appliquer au faisceau lumineux afin de pouvoir corriger ce front d'onde.

En sortie de l'analyseur, nous disposons d'un tableau de mesures représentant, pour chaque pixel de la matrice du capteur, le vecteur reflet de la projection sur le plan focal du gradient de phase au point de mesure. Cette matrice va ensuite être traduite en signaux électriques qui vont être envoyés au système de correction.

Pour que le système marche, il faut que le cycle "détection d'un défaut-analyse-calcul-correction" soit beaucoup plus court que le temps moyen d'évolution de la turbulence. Ceci n'est possible qu'avec des calculateurs ultra-rapides. De tels calculateurs étaient construits spécialement pour effectuer ces tâches, cependant actuellement les puissances de calcul ont beaucoup augmenté et par conséquent des systèmes sur mesure ne sont plus nécessaires.

Même avec de tels calculateurs, il ne faut pas que la turbulence soit trop importante et donc il y a toujours intérêt de placer les télescopes sur de bons sites.

Les systèmes de contrôle efficaces ont pu être réalisés parce que :

- les ordinateurs ont acquis des puissances de calcul suffisantes, en effet pour un système traditionnel à 32 points d'analyse, il faut effectuer plus de 120000 calculs par seconde!
- Les astronomes ont réussi à se faire une idée de ce qu'était la turbulence.

3.3 Correction des déformations

Un front d'onde initialement plan est déformé de quelques micromètres lorsqu'il traverse 20 kilomètres d'atmosphère. Celui-ci doit être récupéré en un laps de temps très court (pour éviter des tâches indésirables dues aux variations de la turbulence atmosphérique) avec un maximum de photons. De plus, le champ de vision sur lequel les instruments travaillent est très faible : quelques secondes d'arc (pour avoir un fort grossissement).

Généralement deux sortes de miroirs sont combinés pour essayer d'annuler les effets de l'atmosphère : un miroir Tip-tilt et un miroir déformable. En effet, la décomposition des déformations dues à l'atmosphère montre que l'un des effets principaux, en terme d'énergie (87%), est une translation des images instantanées (basculement =tip-tilt). Aussi, un miroir spécifique à deux degrés de liberté, dit Tip-tilt (ou Tilt) corrige cet effet et recentre en temps réel les images. Parallèlement le miroir déformable, constitué d'une matrice d'actuateurs (piézoélectriques par exemple) recouverte d'une membrane souple (de silicium poli par exemple), corrige les autres aberrations optiques (l'amplitude des recentrages est telle que le seul miroir déformable ne pourrait les couvrir).

Ces miroirs sont souvent constitués d'actuateurs sur lesquels repose la surface réfléchissante.

Les actuateurs reçoivent du système de contrôle des commandes qui leur permettent de déformer localement le miroir.

Il existe plusieurs types de miroirs déformables comme par exemple les miroirs bimorphes, à empilement piézoélectrique, segmenté, à cristaux liquides… La suite présentera plus en détails ces différents miroirs.

Pour finir, nous pouvons en conclure qu'un système d'OA est une boucle fermée asservie dont les principaux éléments sont l'analyseur de surface, les miroirs correcteurs et le système de contrôle en temps réel.

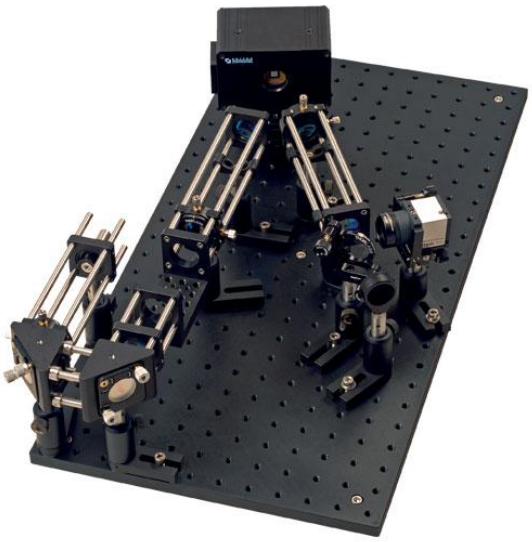


Figure 14 Kit complet d'optique adaptative

4 Les miroirs déformables

Les miroirs déformables sont, comme nous l'avons déjà vu, les éléments qui vont permettre d'appliquer au front d'onde déformé des « contre-déformations » afin d'obtenir une surface d'onde corrigée des aberrations.

Comment applique-t-on une variation de phase à un miroir ? Quel processus physique est utilise pour changer la surface du miroir ?

La phase est proportionnelle au chemin optique et à la longueur. Le chemin optique peut être changé par la variation de l'indice de réfraction ou du chemin géométrique. Il suffit d'appliquer une force ou un potentiel d'amplitude suffisante au miroir déformable pour qu'il se déplace et induise la phase voulue.

L'amplitude des déformations est typiquement de l'ordre de quelques microns.

Dans ce chapitre nous allons présenter les grands types de correcteurs connus.

Deux types de composants peuvent être utilisés :

- les matériaux électro-optiques biréfringents permettent d'appliquer des variations d'indice
- des variations de chemin géométrique peuvent être introduites en utilisant un miroir déformable.

Le miroir déformable est le système privilégié en astronomie car il permet une variation de phase en un temps court, il a une réponse achromatique et il est insensible à la polarisation. Ses caractéristiques dépendent des fluctuations de phase et du degré de correction désiré. La déformation est engendrée par le déplacement d'actionneurs lorsque l'on utilise des miroirs à actionneurs discrets ou par la déformation de plaques en matériau piézo-électrique qui font varier la forme du miroir (miroir monomorphe ou bimorphe).

Un actionneur est un système qui exerce une force sur une partie du miroir pour le déformer.

Les miroirs à actionneurs discrets sont composés d'une surface de verre réfléchissante déformée par la matrice d'actionneurs discrets axiaux montés sur un support rigide. Sous tension, les actionneurs en matériau piézoélectrique déforment la surface du miroir grâce à l'effet piézoélectrique inverse.

Les systèmes d'optique adaptative actuels (miroirs bimorphes) utilisent majoritairement l'effet piézo-électrique ou l'effet électrostrictif.

Ces deux phénomènes physiques sont associés aux matériaux piézo-électriques.

La piézo-électricité, découverte par Jacques et Pierre Curie en 1880, est définie comme une variation de la polarisation électrique d'un matériau lorsqu'il est soumis à des forces (effet piézo-électrique direct). L'effet inverse est obtenu lorsqu'un cristal se déforme sous l'effet d'un courant électrique. Cette déformation est due au déplacement des ions à l'intérieur de la structure cristalline. L'effet piézo-électrique induit une déformation parallèle à la direction du champ électrique et proportionnelle à la tension appliquée.

L'effet électrostrictif est un phénomène physique proche car il associe également une déformation de matériau et un courant électrique mais différent de l'effet piézo-électrique par la direction de la déformation du matériau. L'électrostriction est la déformation d'un

matériau électrostricteur dans une direction perpendiculaire à la direction du champ électrique.

Généralement, la déformation des matériaux piézo-électriques est due à l'association de ces deux effets.

4.1 Le miroir Tip-Tilt

Comme vu précédemment, la perturbation des images la plus importante qu'introduit l'atmosphère est celle de "basculement du front d'onde" qui se traduit par un mouvement rapide du centre de gravité de l'image au foyer d'un télescope.

On confie en général la correction de cette perturbation à un miroir plan installé dans une monture deux axes dite "Tip-Tilt", capable de s'orienter très rapidement.

Tous les systèmes Tip Tilt comprennent:

- une monture deux axes,

- une électronique de proximité pour le conditionnement des capteurs et

- un tiroir de contrôle.

Les performances des montures Tip Tilt résident dans le concept mécanique avec le respect de certains principes, dans le choix des capteurs haute résolution et dans la mise en œuvre d'une électronique à très faible niveau de bruit.

La figure ci-dessous illustre une monture tip tilt.

Figure 15 Miroir tip-tilt du projet naos

4.2 Les correcteurs à cristaux liquides

L'indice du milieu est adapté afin de provoquer l'annulation des défauts de phase mesurés.

Les Correcteurs à cristaux liquides

L 'indice du milieu est adaptée pour provoquer l 'annula
mesurés.

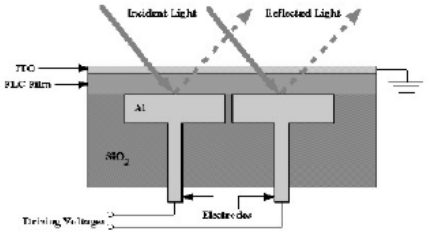


Figure 16

Ces types de correcteurs ne sont actuellement plus utilisés car ils ne permettent pas une rapidité de traitement des contre-déformations suffisante.

4.3 Le miroir déformable corrigeant les ordres élevés

C'est un miroir dont la forme peut être contrôlée pour assurer la compensation des défauts de surface d'onde qui ont été mesurés. Généralement, les défauts de très faible fréquence spatiale (Tip-tilt) ne sont pas compensés par ce miroir. C'est pourquoi il est souvent associé à un miroir tip tilt.

Pour la compensation des défauts de phase d'ordre élevé, il dispose d' »actionneurs ».

Le rôle d'un actionneur est d'apporter une déformation donnée de la surface d'onde avec une amplitude réglable. C'est lui qui reçoit les informations de l'analyseur de front d'onde. Ainsi la déformation globale sera une combinaison des deux fonctions de déformation élémentaires.

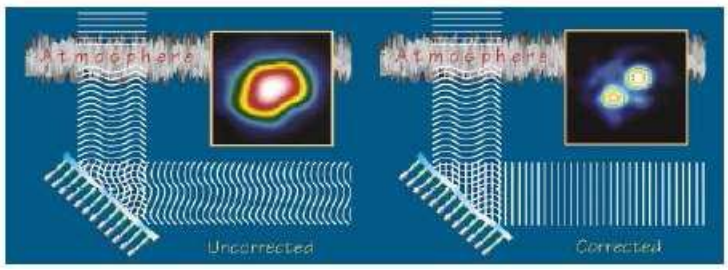


Figure 17 Principe de fonctionnement du miroir déformable

4.3.1 Historique des différents types de miroirs déformables

Le schéma suivant liste les différents miroirs actifs connus

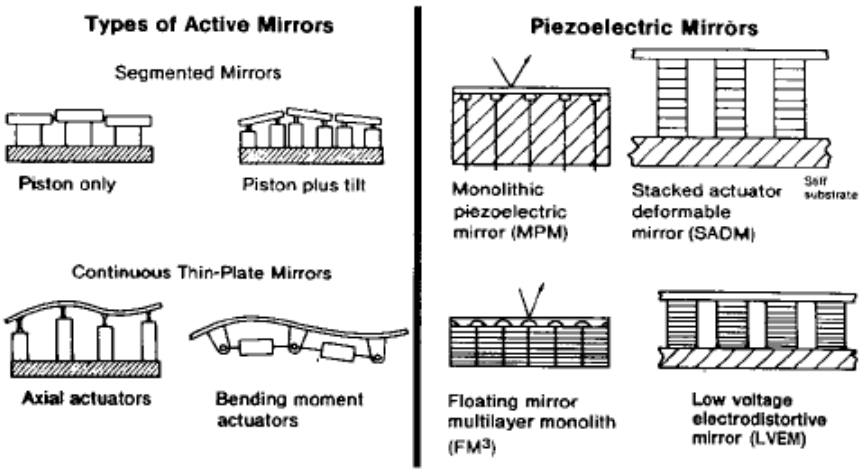


Figure 18

On y trouve :

4.3.2 Les miroirs segmentés

Les miroirs segmentés sont constitués d'une juxtaposition de petits miroirs qui peuvent bouger indépendamment. Ce type de miroir a l'inconvénient de former des aberrations au niveau des intersections des miroirs.

4.3.3 Les miroirs piézoélectriques monolithiques (MPM)

Ils étaient destinés à des applications dans les longueurs d'onde visibles. Ils étaient fabriqués à partir d'un bloc de Plomb Zirconate Titane. Le choix d'un seul bloc (monolithique) de PZT permet d'améliorer la stabilité du système. Les électrodes de commande sont encastrées directement dans le bloc, près de la surface supportant le miroir.

Le miroir, généralement en aluminium, est collé sur la surface supérieure du bloc monolithique avant d'être poli et traité.

Ce type de miroir déformable est très stable et permet d'atteindre de grandes densités d'électrodes de commande (jusqu'à 350 et plus en accolant plusieurs bloc monolithiques). Ils peuvent atteindre des diamètres d'ouverture de 0,25 à 20 cm.

Ce miroir présente une faible sensibilité : une tension de 3 kV est nécessaire pour engendrer un déplacement de 1µm. La sensibilité typique est de 5 Å/V.

Le MPM est idéal pour des applications demandant une grande stabilité et une grande bande passante, mais il requiert des systèmes de commandes à haute tension.

Le principal fabriquant dans les années 70-80 était Litton-Itek.

4.3.4 Les miroirs déformables à actionneur empilé (SADM)

Ils ont été développés dans le but de corriger les faisceaux infrarouges moyens et les systèmes employant des lasers à haute énergie dans les quels des déformations du front

d'onde de plusieurs \m sont courantes Chaque actionneur du SADM est composé d'une série de blocs monolithiques PZT collés les uns aux autres et reliés par une série de contacts électriques extérieurs.

Ce type de composant a l'avantage de conserver les propriétés des blocs PZT tout en augmentant la course possible de déformations.

Chaque actionneur est ensuite disposé sur une base et supporte à son sommet le miroir.

Ce type de système présente cependant une bande passante limitée (<300Hz) et requiert toujours des équipements de haute puissance pour sa commande (1,5kV). La sensibilité typique est de 55 Å/V.

4.3.5 Les miroirs à basse tension d'électro-déplacement (LVEM)

Le LVEM est le résultat d'une nouvelle approche dans la construction des miroirs déformables. Le but était d'obtenir des composants de faible prix, productibles en grande série et d'une grande stabilité.

Sa caractéristique : une commande à basse tension permettant d'employer des circuits imprimés standard pour le pilotage du miroir.

Les LVEM emploient des actionneurs en structure de Plomb Magnésium Nobiate qui présentent une grande stabilité et la possibilité d'obtenir des déplacements très précis. De manière à réduire les coûts, les structures PMN sont fabriquées en employant des techniques identiques à la fabrication en série de composants optoélectroniques, tels que des diodes laser. En employant des techniques de croissance épitaxiale, on peut ainsi obtenir des actionneurs composés d'une série de couches fines (125-250 \m) accolés, et réaliser en parallèle la croissance des connecteurs électriques.

Le déplacement de l'actionneur est au final égal à la somme des déplacements individuels de chaque couche, avec une sensibilité typique de 150 Å/V. La tension maximum de commande devient de la l'ordre de la centaine de volts et la bande passante moyenne peut atteindre 1kHz.

Ces différents types de miroirs ont évolué et à ce jour ceux les plus utilisés sont ceux présentés dans les paragraphes qui suivent.

4.4 Les miroirs déformables actuels

4.4.1 Les miroirs à empilements piézoélectriques

Comme leur nom l'indique, ils sont composés d'empilements piézoélectriques liés à une plaque mince déformable sur laquelle est déposée le miroir. Soumises à une tension électrique, ces cales viennent déformer la surface optique du miroir. En effet les matériaux piézoélectriques se dilatent ou se contractent selon le champ électrique appliqué.

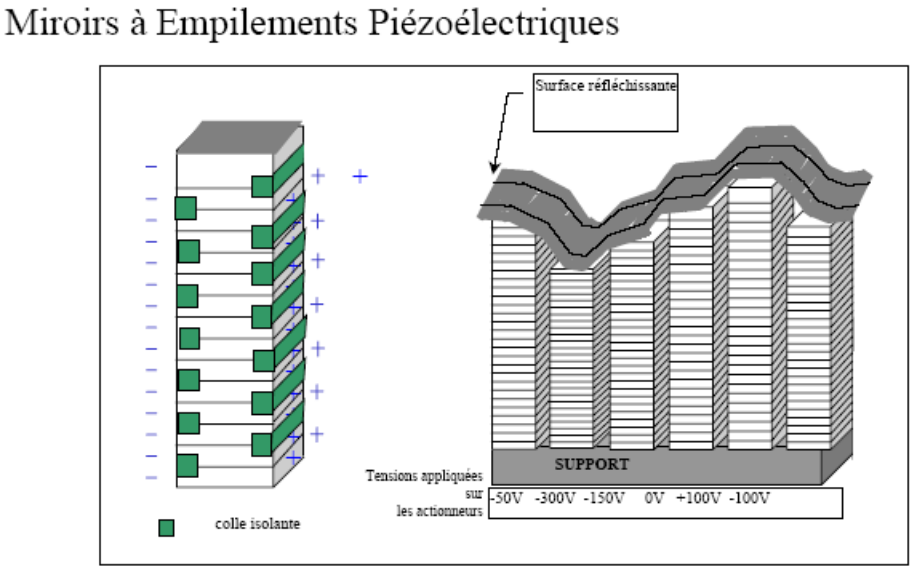


Figure 19

Ces miroirs utilisent une technologie à ce jour bien maîtrisée. Ils sont surtout bien adaptés aux systèmes nécessitant une haute résolution et de très grandes bandes passantes. Cependant leur réalisation est assez complexe et coûteuse.

Les actuateurs piézoélectriques convertissent directement l'énergie électrique en énergie mécanique. Ils rendent possibles des déplacements de l'ordre nanométrique et réagissent en quelques microsecondes. On peut ainsi obtenir des valeurs d'accélération supérieures à 10 g.

Il existe aujourd'hui des actuateurs piézos de grande capacité de charge, capables de déplacer des charges de plusieurs tonnes. Ils peuvent effectuer des déplacements de plusieurs centaines de µm avec des résolutions quasi illimitées.

L'effet piézoélectrique est lié aux champs électriques. Les actuateurs piézos ne produisent pas de champs magnétiques et ne sont pas affectés par eux. En fonctionnement statique, même le maintien de lourdes charges pendant de longues périodes, ne consomme pratiquement pas de puissance.

Un actuateur piézo se comporte comme un condensateur électrique. Au repos il ne génère pas de chaleur. De plus ce type d'actuateur n'a pas de pièces en mouvement telles que des engrenages ou des roulements. Son déplacement est basé sur la dynamique de l'état solide et n'entraîne aucune usure. L'effet piézoélectrique continue d'agir même à des températures proches du 0 kelvin.

L'état de l'art présente des miroirs semi-rigides déformés par des réseaux de quelques centaines d'actionneurs piézo-électriques. Les nombreux actionneurs mis en place pour

augmenter la résolution requièrent une large surface du fait de la dimension minimale entre actionneurs (plus de 6 mm dans la plupart des cas).

Les miroirs déformables sont composés des segments discrets, chacun commandé par 3 déclencheurs piézoélectriques. De nos jours, une technologie commune est de coller une plaque mince sur une rangée d'actuateurs piézoélectriques (voyez la figure). Les actuateurs ne sont pas produits individuellement, mais plutôt en une gaufrette multicouche d'actuateurs piézo-électrique en céramique.

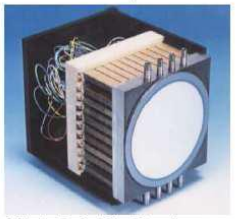
Nombre d'actuateurs	100 – 1500
Espacement inter-actuateur	2-10 millimètres
Géométrie d'électrode	rectangulaire ou hexagonal
Tension	quelques centaines de V
Course maximum	une dizaine de microns
Fréquence de résonance	quelques kiloHertz
Coût	élevé

Figure 20 Paramètres typiques d'un miroir déformable segmenté

Ce type de miroir déformable a été développé principalement pour des applications militaires, ils sont chers. Les actuateurs ont une hystérésis d'environ de 10%. La déformation maximum (course) est limitée par une saturation du matériel piézoélectrique (parfois, la tension appliquée est également limitée).

En France, la société Cilas réalise de tels composants comme le montre l'illustration ci-dessous.

Miroirs à Empilements Piézoélectriques



Miroir Refroidi à 52 actionneurs
CILAS (France)
(Application Laser)

Miroir à 185 actionneurs
CILAS (FRANCE)
Projet NAOS (VLT)

Figure 21

4.4.2 *Les miroirs à empilements électrostrictifs*

Différents Miroirs Déformables (37 à 343 actionneurs)
XINETICS (USA)

Figure 22

4.4.3 *Les miroirs bimorphes*

Ce sont des miroirs à contrôle de courbure.

Le miroir bimorphe est constitué de plusieurs actuateurs (maximum une vingtaine) et chacun de ces actuateurs est constitué de deux cales de PZT superposées. En les polarisant avec des tensions opposées, on crée une courbure des cales.

Les miroirs bimorphes ont leurs actuateurs disposés en secteurs angulaires partageant des disques concentriques à la pupille utile du miroir.

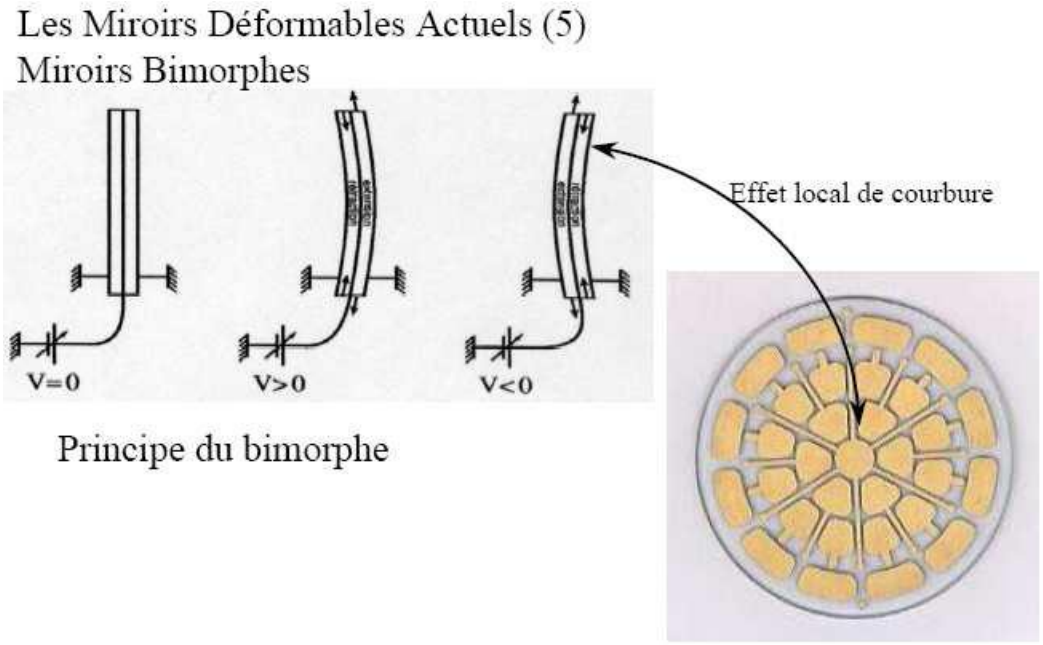


Figure 23

Ainsi ces miroirs sont particulièrement aptes à reproduire facilement des profils proches des premiers polynômes de Zernike, notamment le tilt (basculement) : pour ce défaut, seules

quelques électrodes externes sont utilisées, les électrodes internes étant ainsi libres de corriger les autres aberrations.

Généralement le nombre et la position des actuateurs suffisent à corriger les aberrations du troisième ordre et certaines du cinquième, ce qui est satisfaisant pour améliorer considérablement la qualité de l'image.

Par ailleurs le faible nombre d'actuateurs permet à la commande d'être réalisée sur PC.

Miroirs Bimorphes

Figure 24 Produit de la société Cilas

Un miroir bimorphe se compose de deux gaufrettes piézoélectriques qui sont collées ensemble en étant polarisées de manière opposée. Une rangée d'électrodes est déposée entre les deux gaufrettes. L'avant et les surfaces arrières sont mis à la terre. La surface avant agit en tant que miroir.

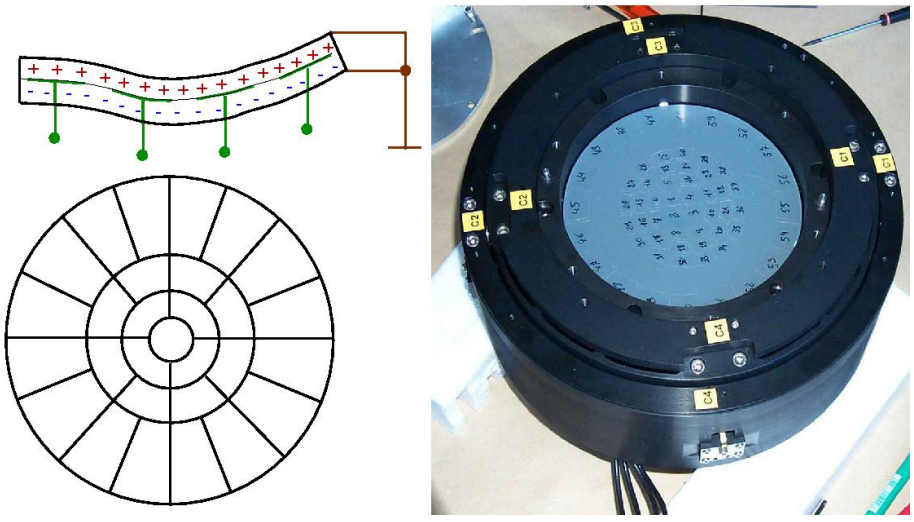


Figure 25 Principe miroir bimorphe et exemple concret

Quand une tension est appliquée à une électrode, une gaufrette se contracte et la gaufrette opposée augmente, ce qui produit un recourbement local. La courbure locale étant proportionnelle à la tension.

Une caractéristique intéressante des miroirs bimorphes est qu'ils sont commandés pas dans la forme extérieure, mais dans la courbure extérieure. Pour la même tension appliquée, la quantité de la déformation produite est proportionnelle au carré de la taille de la région déformée. De même, la saturation de l'actuateur en céramique piézoélectrique doit être spécifiée pas en termes de course extérieure, mais en termes de courbure maximum (ou tension maximum).

La géométrie des électrodes est de type secteur de couronne. Les miroirs bimorphes atteignent une compensation de turbulence plus élevée que les miroirs piézos segmentés.

Nombre d'actuateur	13 – 85
Taille du miroir déformable	30-200 millimètres
La géométrie d'électrode	secteur de couronne
Tension	quelques centaines de V
Fréquence de résonance	plus de 500 Hertz
Coût	inférieur au piézo segmenté

Figure 26 Paramètres typiques d'un miroir déformable bimorphe

4.4.4 *Les miroirs à membrane*

Les petits miroirs à membrane avec la commande électrostatique faite par technologie de silicium sont déjà disponibles sur le marché. Ils sont très bon marché. Le nombre d'actuateurs ne dépasse pas 50, cependant, il faut noter que la membrane est très fragile.

Miroirs à Membrane

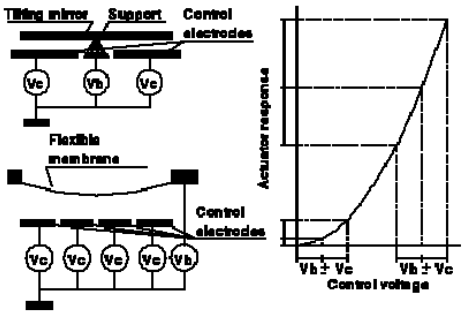


Figure 27

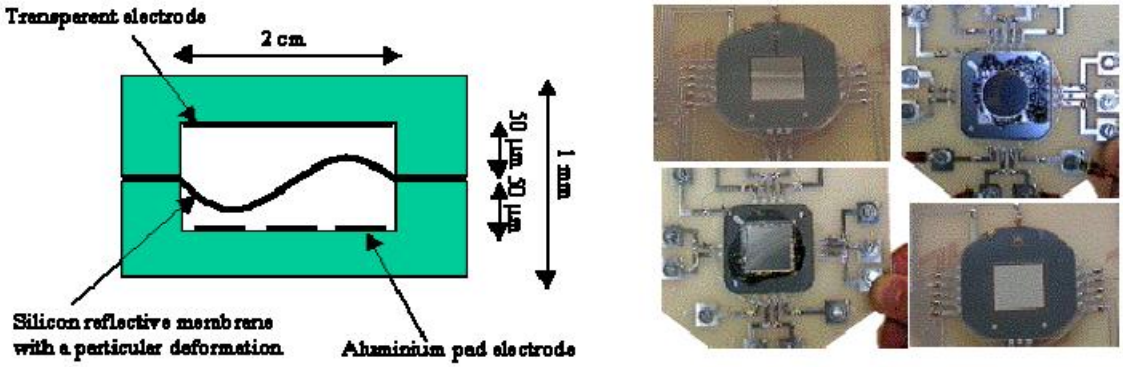
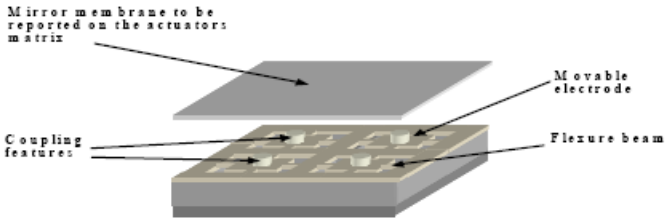


Figure 28 Exemple de miroir à membrane (société SFIM)

4.4.5 *Les MOEMS : axe de développement actuel*

Les Micro systèmes Opto-Electro-Mécaniques sont des systèmes de la taille du micron qui comprennent à la fois des microsenseurs (pouvant inclure des fonctions optiques) et des micro actionneurs. Ils peuvent en plus comprendre de la micro-électronique, des systèmes de commande…



(Source : LETI-CILAS)

C'est pourquoi à ce jour, dans le domaine de l'astronomie, il est étudié de près de nouveaux modèles de miroirs déformables MOEMS. Ils permettraient d'intégrer plusieurs milliers de micro-miroirs semi-conducteurs (de 0,5 à 1 cm de diamètre) sur un substrat en silicium. Dans ce cas la difficulté viendra des actuateurs qui devront être de plus en plus petits.

De nouvelles technologies pour les miroirs déformables sont un besoin urgent. Pour corriger la turbulence aux télescopes extrêmement grands (30-100 m de diamètre), des miroirs déformable avec 10000 à 100000 actuateurs seront exigés ! Une manière possible de produire un tel système est d'utiliser des technologies de type microélectronique (**MOEMS** = les systèmes Micro-Opto-Électro-Mécaniques). Ces miroirs sont faits par la micro-lithographie, d'une manière semblable aux ships électroniques, et de petits éléments de miroir sont guidés par les forces électrostatiques. Les problèmes restants pour les MOEMS sont une course insuffisante pour de grandes turbulences.

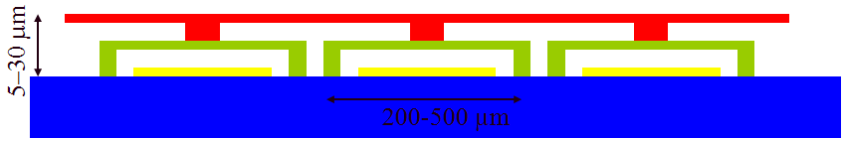


Figure 29 Principe MOEMS (jaune électrodes - vert actionneurs - rouge miroir continu)

Evolution	Lumière visible 2,2→0,5µm	Haut contraste 290→50nm	Très grands télescopes 8→100m	Multi-objets 1→50 objets
Science	• Exo-planètes • Milieu circumstellaire		• Exo-planètes • Galaxies primordiales	• Dynamique des galaxies lointaines
Impact sur le miroir déformable	↗ du nombre d'actionneurs (200→2000 →500 000) ↗ de la fréquence de la boucle (500→2000 Hz) ↘ de l'espace inter-actionneurs (7 →2→0,5mm)			↘ de l'espace inter-actionneurs (7→2→0,5mm) 1 MD/objet

Figure 30 Evolution des caractéristiques liées à l'optique adaptative

4.4.6 *Miroir à liquide ferromagnétique*

Une autre manière de commander la déformation consiste à employer des cristaux liquides ferromagnétiques. Jusqu'à récemment, les cristaux liquides étaient trop lents, mais maintenant cet inconvénient semble avoir été surmonté.

Les miroirs liquides déformables remplacent les actuateurs piézos par des séries de bobines générant un champ magnétique pour déformer la surface d'un ferrofluide. L'idée avait déjà été proposée en 1994 mais avec du mercure et avait fini par être abandonnée, le mercure s'étant révélé trop lourd.

Des prototypes ont été réalisés avec des particules nanométriques de magnétite comme composant magnétisable du ferrofluide, lequel a été versé dans un récipient comportant 37 bobines de 5 mm de diamètre formant un réseau.

Figure 31 Illustration de l'utilisation de bobines comme actionneur et effet des champs sur liquide ferromagnétique

Le miroir est une membrane très souple sur laquelle on a déposé d'un côté une couche réfléchissante, et de l'autre côté une couche magnétique. La membrane est localement actionnée par le champ magnétique généré par un réseau de micro-bobines planaires placé en vis-à-vis.

La membrane est un film polymère d'épaisseur variant de 2 à 5 µm, "encastré" sur une bague (en AsGa ou Si). La rugosité obtenue est inférieure à 10 nm. Les composants magnétiques actifs utilisés sont soit des aimants aux terres rares miniaturisés (industrie horlogère) puis collés, soit des plots d'aimants sérigraphiés directement sur la membrane. Il est également envisageable d'utiliser des couches magnétostrictives ou de matériaux doux. Mais les aimants présentent aujourd'hui l'avantage de développer de grandes forces de répulsion ou d'attraction.

4.4.7 Exemple : Optique adaptative du projet VLT

Le miroir déformable (115 mm de diamètre) est contrôlé en 185 points (un point tous les 7 mm) par des actionneurs piézoélectriques qui abaissent ou soulèvent sa surface sur 5 µm de course. 5 calculateurs coopèrent pour contrôler le système d'optique adaptative, sa mécanique, ses analyseurs de surface d'onde, son optique déformable. Avec le système d'optique adaptative NAOS, le VLT aura une résolution augmentée d'un facteur trois par rapport à celle du télescope spatial Hubble. Ainsi, la forme de ce miroir doit pouvoir être adaptée 500 fois par seconde pour suivre au mieux les perturbations atmosphériques, qui changent à une cadence très rapide

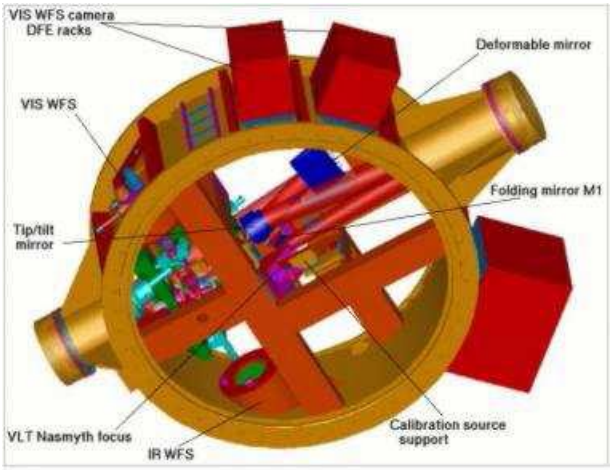


Schéma de NAOS : le système d'optique adaptative du VLT

Figure 32

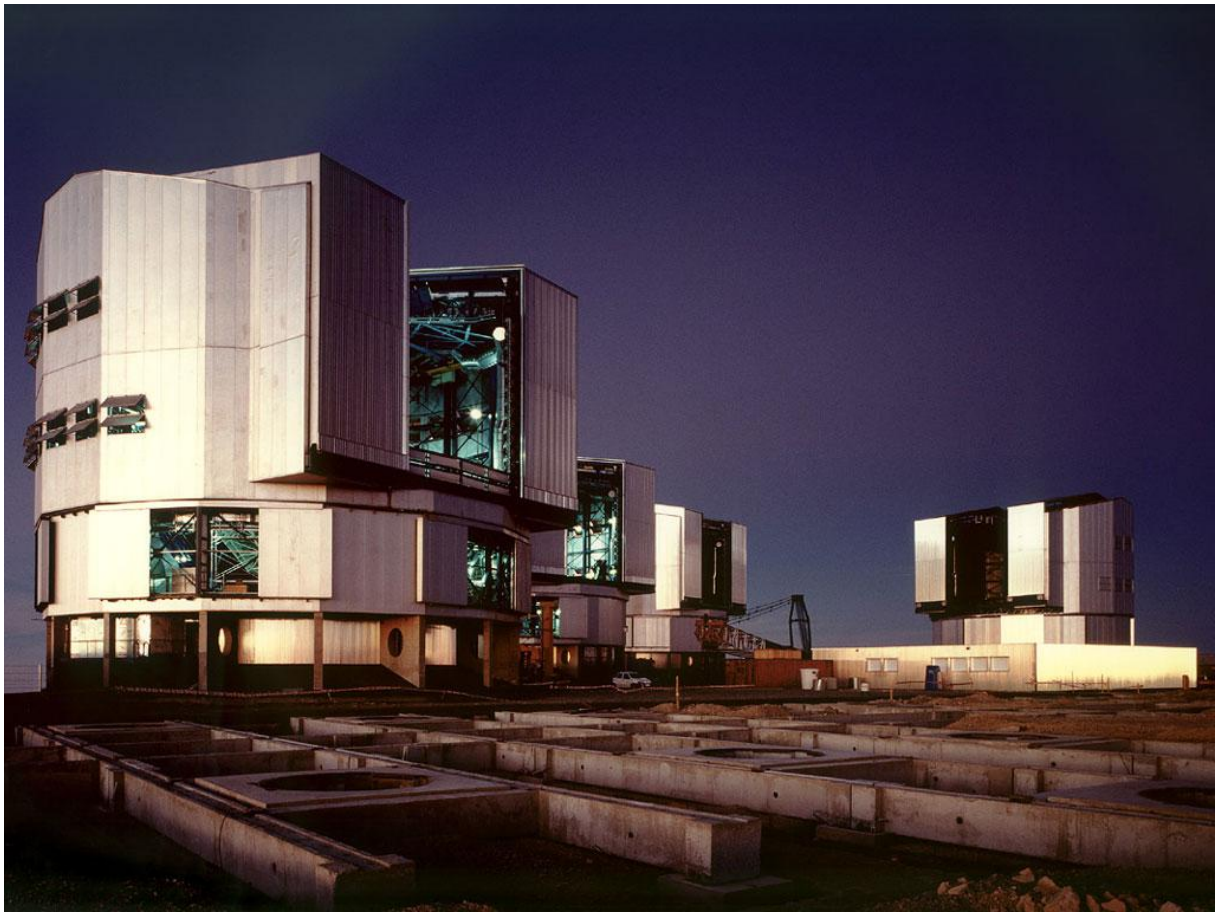


Figure 33 Site du télescope VLT

5 Le miroir déformable HEADS

Ce travail consiste dans un premier temps à modéliser le système HEADS qui correspond à l'abréviation de HIGH EFFICIENCY ACTUATOR FOR DEFORMABLE SECONDARIES. C'est-à-dire établir un modèle afin de pourvoir calculer ses modes propres et la fonction de transfert du miroir permettant de convertir une force à l'entrée à un déplacement sur le miroir. Cette démarche a également pour but d'optimiser la régulation qui se fera de façon indépendante pour chaque mode. Cela s'explique par le fait que toute déformation peut se décomposer en une superposition de différents modes de déformation chacun lié à une fréquence propre. Par conséquent un régulateur sera implémenté pour chaque type de déformation. À présent que la base du développement à suivre est posée nous allons d'abord caractériser le modèle.

5.1 Description HEADS

Ces dernières années, un certain nombre de nouvelles technologies ont émergé pour construire les miroirs déformables : divers types de miroirs piézo-électrique, actionneurs électromagnétiques avec ou sans contreréaction de position, MEMS de diverses factures…

Actuellement la plupart des miroirs tip-tilt sont basés sur les déclencheurs piézoélectriques. Cependant les grands miroirs secondaires adaptatifs récents, typiquement miroirs du diamètre de l'ordre de 1 m, utilisent les actionneurs électromagnétiques. On a identifié la nécessité de développer un miroir à 5 degrés de liberté adaptatif souple qui peut être dimensionné et construit facilement pour s'adapter à tous besoin d'un système astronomique d'optique adaptative et pour explorer les possibilités d'application industrielle, comme dans le guidage de laser de précision.

Le but est d'utiliser les progrès faits dans des miroirs déformables d'ordre élevé à actuateurs électromagnétiques et d'adapter la technologie à un système sur une échelle plus petite - des miroirs du diamètre de l'ordre de 50-100 millimètres. Nous avons ainsi développé un miroir déformable de 50 millimètres actionné avec ce type d'actionneurs qui tire bénéfice d'une grande puissance de calcul disponible pour mettre en application des algorithmes de commandes puissants.

Les DSP de dernier cri laisse mettre en application la commande en boucle fermée entièrement vectorisée à 100 kilohertz, utilisant des sondes de position implantées avec les actuateurs. Cette stratégie de commande ajoutée aux amplificateurs de courant généreusement dimensionnés vise à produire un temps de réponse inférieur à 500 µs. Notre miroir montre également une simplicité ainsi qu'une compacité élégante. Le prototype de miroir à 5 actionneurs a été conçu, établi et examiné. Sa course permettra la correction de la turbulence atmosphérique dans les modes piston, tip-tilt, défocus et astigmatisme à 45°.

Un type original de sondes de position capacitives a été développé. Une première caractérisation du comportement en circuit fermé du miroir complet a été exécutée et le calibrage à l'aide d'un interféromètre d'une résolution de 2 nanomètres a été effectué.

Modes	5 modes: piston, tip-tilt, defocus, astigmatism
Actuator resolution	< 10 nm
Actuator stroke	175 µm
Bandwidth	Minimum 100 Hz (goal 300 Hz)
Modal stroke:	
Piston	175 µm
Tip-tilt	±3 mrad
Defocus and astigmatism	1.5 µm ptv over 50 mm diameter
Other requirements	
Mirror diameter	Ø 80 mm
Mirror thickness	1.5 mm
Outer system diameter	Ø 120 mm cylinder
Outer system height	50 mm

Figure 34 Caractéristiques principales du projet HEADS

5.2 Description fonctionnelle et liste des composants

5.2.1 Composants principaux

Le miroir déformable comporte plusieurs composants principaux :

- Un ménisque en verre déformable (1.5 millimètre d'épaisseur) avec des aimants collés sur sa surface arrière, la plaque de verre est métallisée pour faire office de miroir et de conducteur pour le capteur capacitif. Une butée est située sur le bord externe de l'appui du miroir pour le sous-tenir si le système n'est pas sous tension.
- Un fond en cuivre qui sert d'appui et de refroidissement pour les actuateurs. Cet élément de structure forme l'interface mécanique externe pour le miroir déformable.
- un verre épais (10 millimètres) fixé sur le fond en cuivre. Il est maintenu en contact par trois billes et un joint circulaire. Cet élément est considéré comme un corps solide sur lequel le ménisque déformable prend sa référence de position. Les bobines ainsi que le corps les entourant pour transférer la chaleur vers le fond passe par des alésages dans la plaque de référence pour approcher le ménisque.
- Les actuateurs électromagnétiques sont des bobines constituées d'un enroulement spires placés sur une structure en cuivre pour accélérer le transfert de chaleur. Ils sont alignés par rapport aux aimants collés sur le miroir.

- Les sondes de position. Pour chaque actuateur, la position est mesurée en utilisant les capteurs capacitifs fonctionnant grâce à la capacité variant en fonction de l'espace entre l'aimant et l'anneau métallisé surplombant l'alésage présent sur la plaque de verre servant de référence. Chaque signal est conditionné et amplifié par un circuit analogique placé à proximité immédiate de l'actuateur.

Les sondes de position sont l'une des particularités techniques de ce projet. Elles sont constituées de couches minces métallisées d'aluminium déposées sur la face arrière du miroir et autour des alésages présents sur la plaque de référence où passent les bobines.

Le schéma ci-dessous montre le principe en apparence schématique des divers enduits en aluminium. Celui sur la face du miroir plan est naturellement la surface optique. Ceux de la face arrière et de la plaque de référence constituent les sondes capacitives.

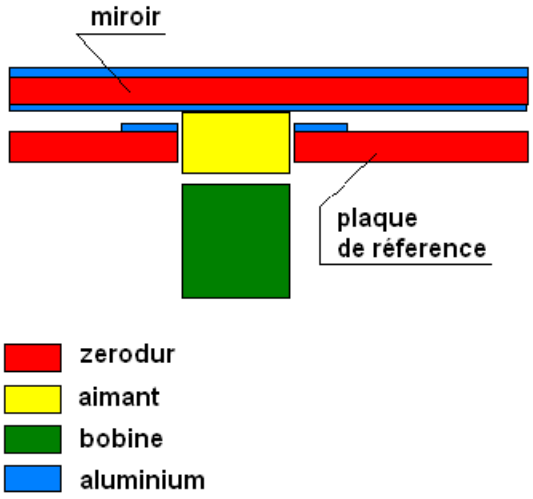


Figure 35 Schéma de principe actionneur miroir

- Une unité de circuits de commande avec la puissance de calcul nécessaire s'occupe du traitement électronique pour les sondes de distance utilisées en contre-réaction pour la régulation et des circuits de puissance pour les actuateurs.

A présent, on va reprendre chaque élément et le détailler de façon plus complète.

5.2.2 La plaque de référence

Puisque la résolution ciblée en position de notre miroir est de quelques nanomètres, la plaque en verre de référence doit avoir une stabilité garantissant cet ordre de grandeur.

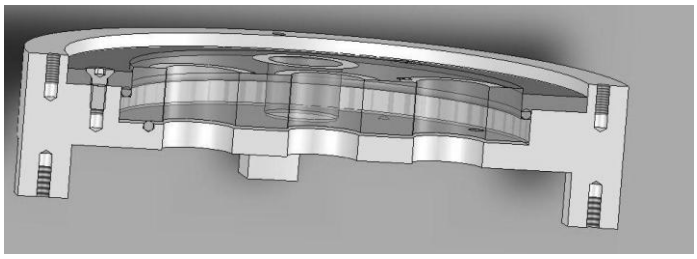


Figure 36 Coupe du modèle SolidWorks

La stabilité mécanique est atteinte en rendant le système hyperstatique. La plaque de référence est tenue sur trois billes de roulement qui définissent le plan de la référence. La rotation et la translation sont contraintes en appliquant une légère charge sur un joint circulaire à l'aide d'un anneau en verre fixé sur la structure qui sert également à l'immobilisation du miroir. Naturellement, ceci causera un effort localisé et c'est pourquoi il faut avoir un élément de référence assez épais. La dilatation due aux changements de température sur l'élément de référence doit être aussi petite comme possible. Le matériel choisi est le VE Zerodur® avec un coefficient de dilatation thermique (CTE) de 0.1*10-6 K-1 pour la qualité inférieure. Il est cependant plutôt difficile d'usiner. Par conséquent, l'élément de référence doit être aussi simple que possible. Cependant dans le cas du prototype, la silice fondue est tout à fait satisfaisante, parce que le CTE plus grand peut être utilisé pour une meilleure conductivité thermique, dans le but de diffuser la chaleur plutôt vers de la plaque de référence que sur la partie miroir.

5.2.3 Le miroir déformable

Pour des raisons de dilatation thermique, le miroir déformable est fait en Zerodur®. Son comportement mécanique a été étudié à l'aide de méthode par élément fini pour évaluer l'épaisseur exigée du miroir. Il faut préciser ici que nous avons l'intention d'utiliser le miroir pour corriger davantage que juste les trois premiers modes qui entrainent le déplacement de l'image, mais corriger également les modes atmosphériques inférieurs, en particulier le focus et l'astigmatisme à 45°. Par conséquent, en raison de la rigidité de ménisque, un compromis doit être trouvé entre la course de défocus et l'épaisseur. Le système a apparemment été conçu dans le but de fonctionner en étant à la vertical, par la suite les simulations prennent le système dans différente orientation. Dans la position verticale, le seul avantage est de diminuer la déformation statique, cependant la déformation du ressort entraîne des complications pour obtenir une régulation efficace. De plus, il est probable que les masses des aimants entrainent une flexion du ressort dont l'équilibre est moins stable qu'en position horizontale. Un dernier détail dévalorise cette orientation. D'un point de vu

thermique, les zones chauffées ne seront pas symétriques. Par conséquent, les déformations dues à la chaleur également.

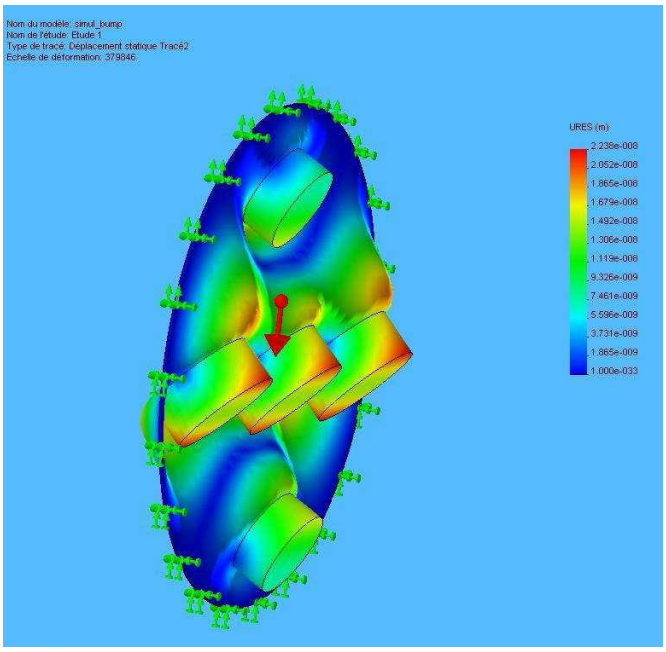


Figure 37 Effet de la gravité sur le miroir avec ses aimants

5.2.4 La structure flexible

Pour tenir le miroir, une structure ressort est proposée. Elle est constituée de trois anneaux, le premier (extérieur) est fixé sur la structure, le second (milieu) a des fixations avec un décalage de 180°, ce qui permet les mouvements tip-tilt et finalement l'anneau intérieur est collé sur le miroir. La structure flexible doit fixer le ménisque en translation sans empêcher le tip-tilt. La dilatation thermique de la structure ressort n'est pas identique que celle du miroir et donc, un grand soin doit être pris pour que cette différence ne se traduise pas en déformations sur le miroir.

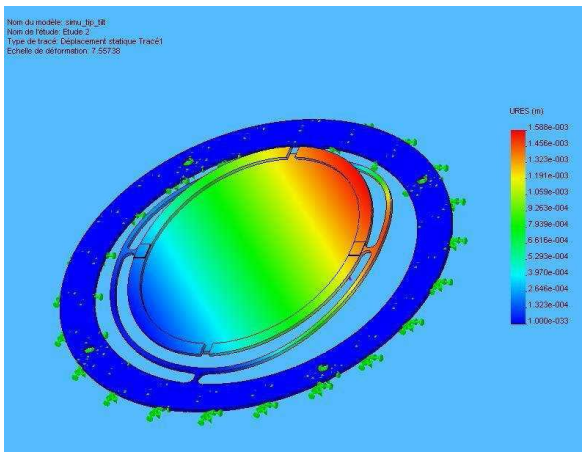


Figure 38 Illustration de la partie ressort

La structure est faite d'alliage d'aluminium 1060. Son coefficient de dilatation thermique est très différent de celui du Zerodur®. Par conséquent l'expansion différentielle entre la structure du miroir et des anneaux ne devrait pas être transmise. Dans ce but le plan prévoyait l'anneau intérieur divisé en deux parties afin de diminuer les contraintes dus aux variations de température et la fixation devait se faire sur deux points. Cependant sur le prototype l'anneau intérieur est collé sur l'intégralité de la surface disponible, probablement en raison du manque de solidarité entre les deux éléments avec la solution proposée.

5.2.5 Le système de contrôle

L'architecture de contrôle complète est représentée dans la figure ci-dessous. Passons en revue les blocs constitutifs :

- But : c'est un vecteur multidimensionnel avec la position à atteindre pour chaque actuateur.
- Contrôleur : les blocs de commande de position correspondent à un PID pour chaque mode.
- Actuateurs : Ce bloc contient la conversion de la position en un courant.
- Ménisque : modèle du miroir. L'entrée est le vecteur de courants de l'actuateur et la sortie la position atteinte. L'efficacité est fortement liée à la précision des sondes de la position
- Commande à priori : génération de la précommande tenant compte des future couple à appliquer.

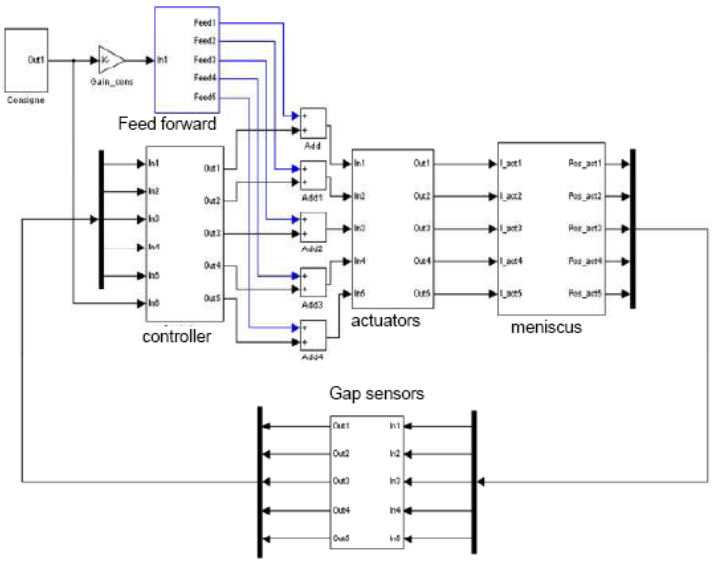


Figure 39 Schéma de principe de la commande

Le contrôleur mis en application est un MIMO (Multi Input Multi Output) avec des régulateurs PID. Les actuateurs sont les circuits linéaires RL avec une saturation de la boucle de courant et de tension. La largeur de bande nominale de boucle fermée avec le contrôleur est calculée à environ 90 kilohertz. Les sondes de positions sont modélisées avec un gain de 1 et aucun bruit. La commande à priori d'alimentation est produite statiquement : Elle produit une commande égale aux valeurs finales prévues après la coupure. Elle est obtenue à partir de la matrice K de rigidité, donnant les forces exigées pour tenir le ménisque déformable en n'importe quelle position. Il s'agit d'une commande à priori mais il n'est pas sur que le modèle en tienne compte.

Maintenant que les éléments clés du projet sont mise en place il est nécessaire de prendre le tout afin de détailler les pièces permettant à l'ensemble de tenir en un seul bloc.

5.2.6 Structure

Le système est constitué d'une structure qui soutient le miroir posé sur une sorte de ressort circulaire ainsi que les bobines permettant d'actionner le miroir comme nous l'avons dit auparavant.

La structure est composée de 3 éléments principaux, le premier est le baffle supérieur qui est un couvercle vissé sur l'élément intermédiaire, ce qui permet par la même occasion de fixer le ressort circulaire qui est placé entre. La partie inférieure sert à la fixation des bobines et à la dissipation de la chaleur, elle est également vissée sur l'élément intermédiaire qui à été appelé auparavant fond en cuivre. Toute la visserie est de diamètre M3.

Il reste encore un élément qui sert à immobiliser les bobines et la plaque de référence donc à garantir leurs positions (partie en bleu sur la figure ci-dessous). Dans un premier temps, une pièce encadre les bobines puis un anneau au bord conique permet de serrer le toute en le fixant avec des vis sur l'élément intermédiaire de la structure.

Finalement une série d'O-ring est présent afin d'éviter les vibrations et de garantir l'adhérence entre les différentes pièces. Ils sont positionnés entre la structure intermédiaire et la cage contenant chaque bobine. Un O-ring de plus grand diamètre se trouve entre les éléments de stabilisation de la partie supérieure des bobines. Pour conclure trois billes servent à stabiliser la partie intermédiaire de la structure et la plaque de référence.

Les disques que l'on voit sur la plaque de référence sont de fine couche d'un élément métallique qui servent pour le capteur capacitif de positon.

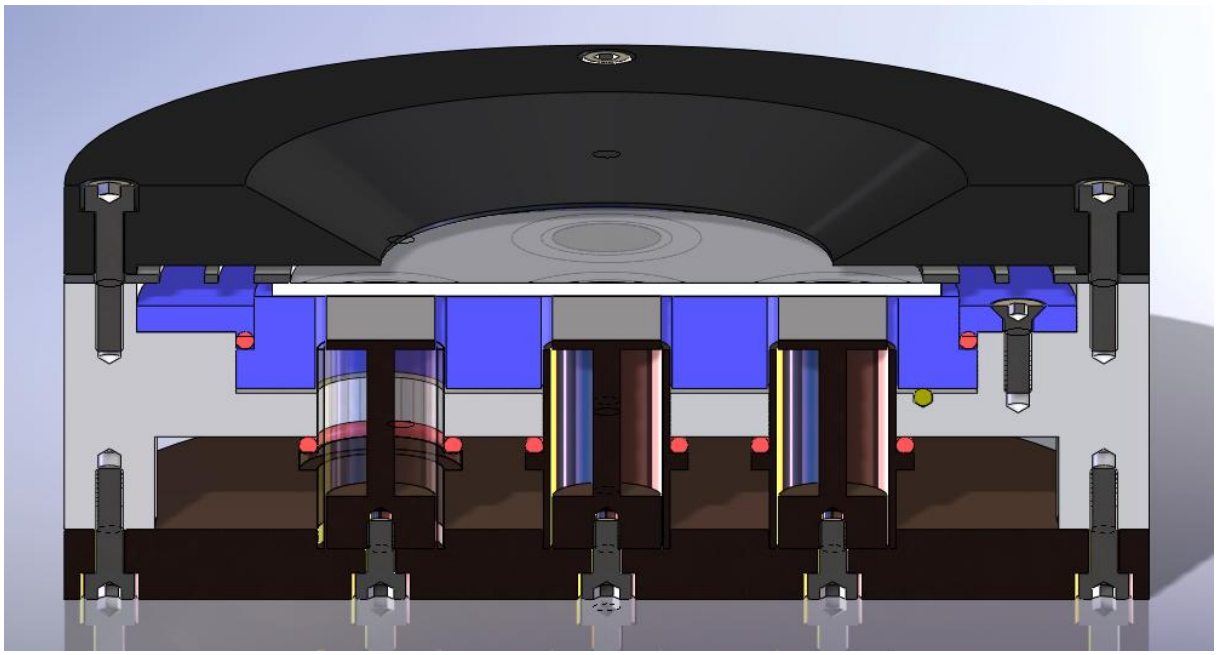


Figure 40 Coupe du modèle SolidWorks sans les bobinages

Au niveau des matériaux, le baffle et la structure intermédiaire sont en aluminium tandis que la partie inférieure est en cuivre et les éléments bleus sont en verre. Le miroir est également en verre mais recouvert d'une couche réfléchissante.

5.2.7 Modèle réel : détails et dimensions

L'ajout de rondelles entre le baffle et le ressort circulaire (D= 6 mm ; d= 3 mm ; e= 0.5 mm) ainsi qu'en dessous entre la structure intermédiaire et le ressort circulaire semble avoir été nécessaire pour laisser la possibilité au miroir de se déplacer. Les rondelles sous le ressort sont (conique) (D= 8 mm ; d= 3 mm ; e= 0.7 mm).

Des vis coniques fixent anneau de serrage à structure intermédiaire. Leur longueur est de 8 mm.

Longueur des vis fixant le baffle à structure intermédiaire -> 14 mm.

Longueur vis fixant la structure intermédiaire au fond en cuivre -> 12 mm.

Tous les trous de passage des vis ont un lamage afin de noyer les têtes de vis probablement dans un but esthétique.

Sur le fond, 6 petits trous de diamètre (7 à 8 mm) sur fond sont présents pour le rehaussage (nécessaire pour le passage câbles et le refroidissement). Il y a également 5 perçages pour les capteurs et 1 pour l'excitation (pied h= 8 mm), finalement 5x 2 perçages pour alimentation des bobines (d= 2 à 3 mm) sont à proximité des passages de vis les fixant.

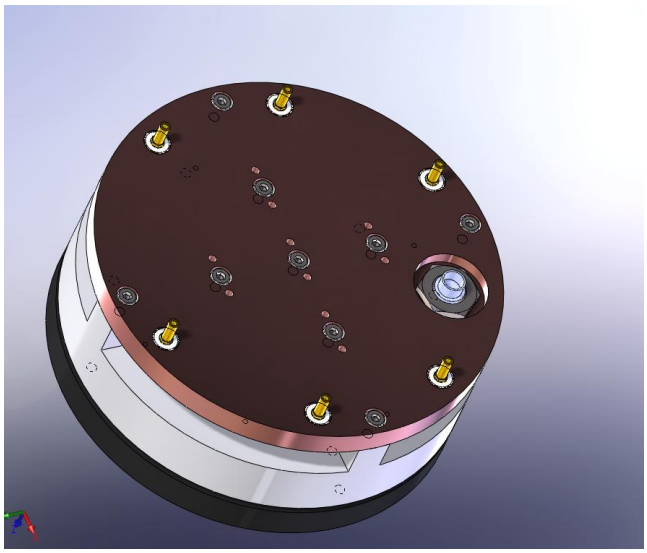


Figure 41 Illustration du fond du système

5.2.8 Caractéristique des bobines

Des conducteurs de chaleur entourent les bobines et diffusent vers le fond en cuivre, ils sont fixés par serrage des éléments les encadrant. Le bobinage est entouré de scotch. La structure soutenant le bobinage est également en cuivre. Il faut noter que le cuivre n'a pas la propriété de conduire les champs magnétiques.

Dimension bobinage : d= 3 mm D= 10 à 11mm H= 16.8 mm e_fil= 0.5 mm

Sur la structure intermédiaire des perçages ont été ajoutés : 5x 3 mm pour le passage des fils le traversant pour relié les capteurs de position à leur électronique + 5x non traversant pour la fixation de électronique précédemment citée.

Câblage diamètre fil et gaine -> 0.5 mm

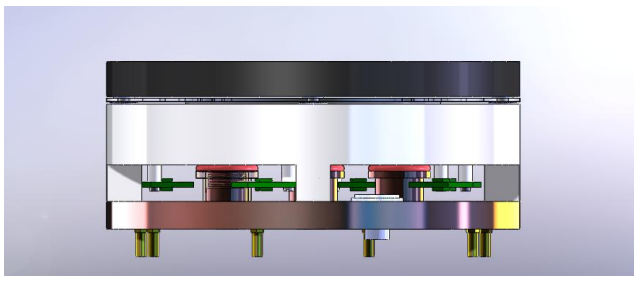


Figure 42 Mise en évidence de la structure intermédiaire (partie blanche) ainsi que son électronique (parties vertes)

A présent que les caractéristiques sont connues, quelques valeurs peuvent être calculées :

Périmètre moyen d'une boucle de la bobine : $p_{moy} = 2\pi \cdot r_{moy} = 2\pi \cdot 7 \cong 44[\text{mm}]$

Volume bobine :$V = \pi \cdot (r_{ext} - r_{int}) \cdot l = \pi \cdot (5.5 - 1.5) \cdot 16.8 = 87.96\ [mm^2]$

Nombre enroulement :$N = \frac{l}{d_{fil}} \cdot (\frac{r_{ext} - r_{int}}{d_{fil}}) = \frac{16.8}{0.5} * \frac{5.5-1.5}{0.5} \cong 270$

Longueur fil : $L = N \cdot p_{moy} = 270 \cdot 44 \cdot 10^{-3} = 11.83[m]$

Résistance fil : $\frac{\rho_{cu} \cdot L}{S} = \frac{0.0175 \cdot 11.83}{1.96 \cdot 10^{-7}} \cong 1.05[\Omega]$

Inductance bobine : $\frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot S}{l} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 270^2 \cdot 1.96 \cdot 10^{-7}}{16.8 \cdot 10^{-3}} \cong 1.06 \cdot 10^{-6}[H]$

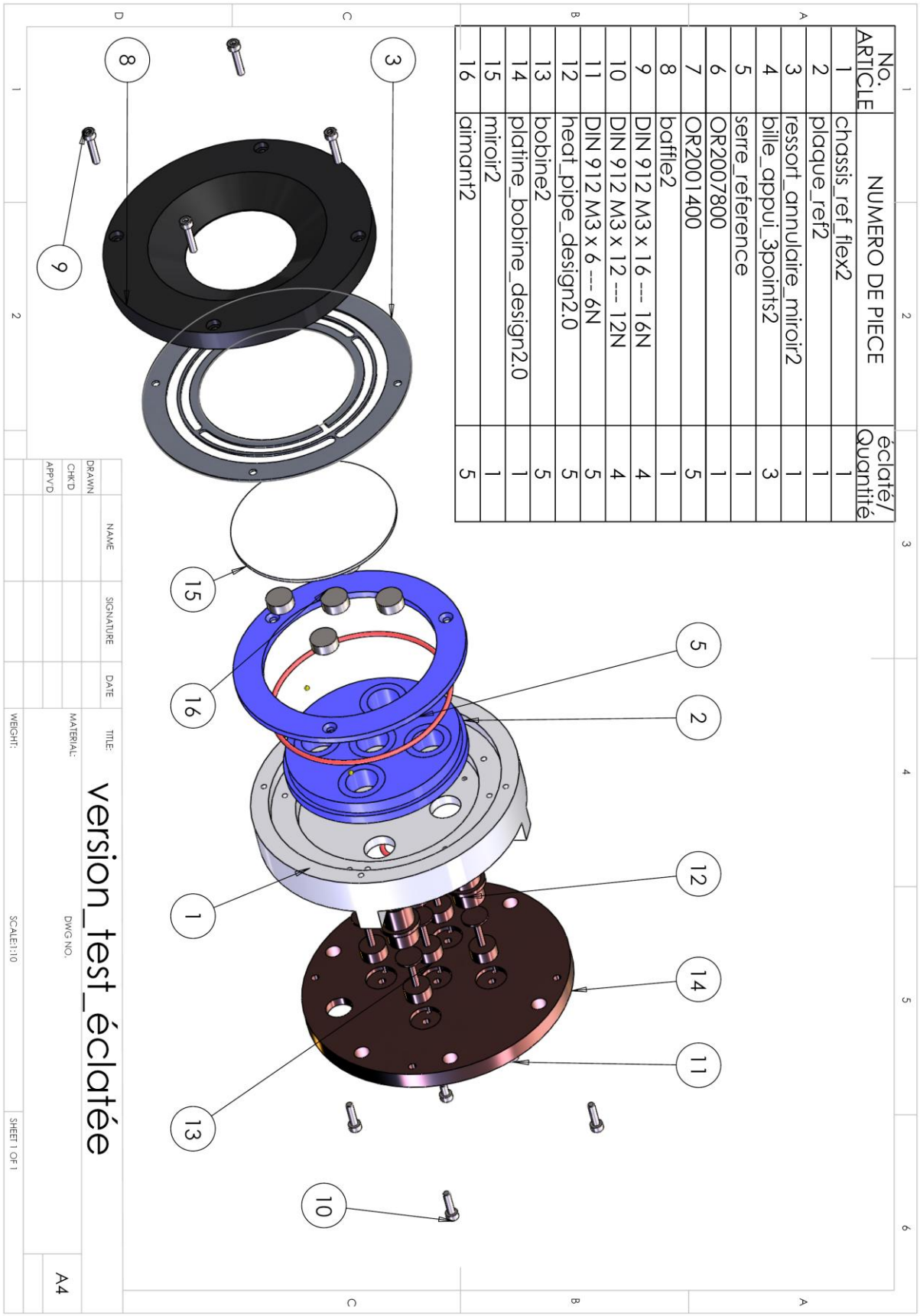
Etant donné que l'inductance et la résistance sont trouvées la constante de temps de la bobine peut être calculée :

$$\tau_b = \frac{L}{R} = \frac{1.06 \cdot 10^{-6}}{1.05} \cong 10^{-6}[s]$$

Par conséquent, il est intéressant de noter qu'il faudra environ 5 µs pour sortir du transitoire. Cette valeur est suffisamment petite pour être négligée car le temps pour atteindre une valeur de déplacement sera de l'ordre de 100 fois cette valeur.

Un autre détail important est le fait qu'il n'y a pas d'élément en fer pour diriger les champs magnétiques. Par conséquent, il n'est pas possible de faire un schéma équivalent avec des perméances liées au fer et aux entrefers. Il est donc difficile de prévoir la valeur du coefficient conversion entre le courant à la force. Une simulation par élément fini sur un programme comme flux pourrait calculer les forces et donc ce coefficient mais le temps est limité et cette valeur sera fixée à 0.5 dans la simulation du modèle. Cette valeur est probablement trop élevée, mais elle permet de continuer le travail.

Sur les 2 pages suivantes une vue éclatée du système est présentée, ainsi qu'un mise en plan permettant de mettre en évidence les détails de la conception. La vue éclatée n'intègre pas les éléments ajoutés comme les rondelles, l'électronique liée aux capteurs de position ou les éléments de rehaussage afin de ne pas surcharger l'image qui doit rester lisible sur une page A4.



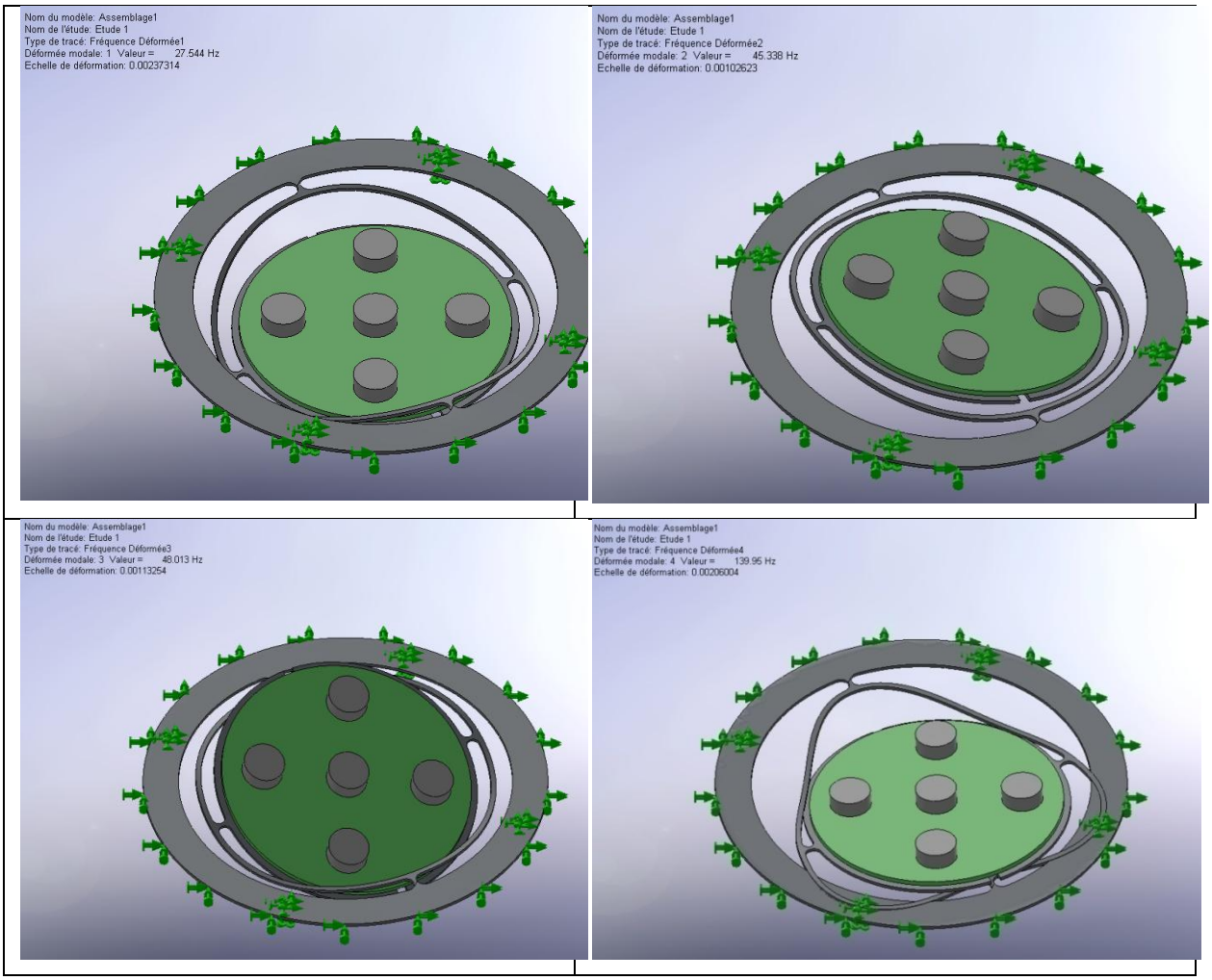
No. ARTICLE	NUMERO DE PIECE	éclaté/ Quantité
1	chassis_ref_flex2	1
2	plaque_ref2	1
3	ressort_annulaire_miroir2	1
4	bille_appui_3points2	3
5	serre_reference	1
6	OR2007800	1
7	OR2001400	5
8	baffle2	1
9	DIN 912 M3 x 16 --- 16N	4
10	DIN 912 M3 x 12 --- 12N	4
11	DIN 912 M3 x 6 --- 6N	5
12	heat_pipe_design2.0	5
13	bobine2	5
14	platine_bobine_design2.0	1
15	miroir2	1
16	aimant2	5

DÉTAIL B
ECHELLE 2 : 1
1.50
B
COUPE A-A
48.56
A
A
ϕ120
DO NOT SCALE DRAWING
REVISION
DEBUR AND BREAK SHARP EDGES
FINISH:
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:
NAME
SIGNATURE
DATE
DRAWN
CHK'D
APP'V'D
MFG
Q.A
MATERIAL:
WEIGHT:
TITLE:
DWG NO.
version_test_plan
A4
SCALE:1:2
SHEET 1 OF 1

6 Modélisation

6.1 Méthode d'approche

A partir de maintenant le modèle est bien mis en place et il reste à établir un modèle par élément fini qui permet d'en caractériser les modes propres. Pour ce faire, le programme Cosmos lié à SolidWorks permet d'effectuer une analyse fréquentielle sortant les différents modes propres comme le montre les résultats suivants.



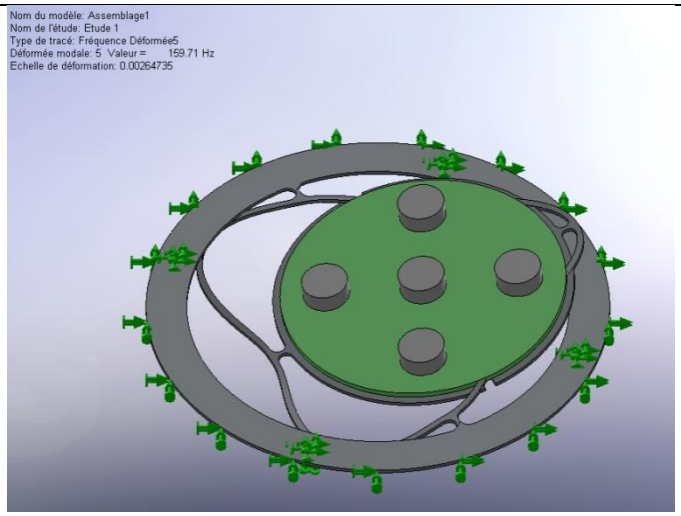


Figure 43 Illustration des différentes déformées modales

Étant donné que le miroir est muni de 5 actionneurs, il nous sera possible de corriger les 5 modes de déformation. Afin de bien comprendre la démarche, il est utile de comprendre ce qu'est réellement un mode propre. La fréquence propre d'un système est la fréquence à laquelle il oscille lorsqu'il est en évolution libre, c'est-à-dire sans force excitatrice extérieure ni forces dissipatives (frottements ou résistances par exemple). Le mode propre est le déplacement qui est associé à cette fréquence.

Une fois que les modes propres sont calculés, il reste à obtenir la fonction de transfert permettant de convertir une force en déplacement. C'est à ce moment que l'utilisation de Matlab devient utile, car il n'est pas possible de demander à cosmos de le faire. Par conséquent, il devient également nécessaire de modéliser le système. Pour ce faire, plusieurs toolboxes proposent des fonctions d'analyse par éléments finis, dans notre cas le choix s'est porté sur Calefem ainsi que Openfem. Dans un premier temps, l'analyse s'est faite à partir de Calefem qui permet de modéliser des éléments de type poutres, puis dans un second temps un modèle plus fin se fait avec Openfem qui permet l'utilisation de l'élément de type surfacique comme des quads qui permettent de modéliser de façon précise notre miroir.

6.2 FEM : méthode d'éléments finis

Un problème d'éléments finis est résolu si l'on trouve un vecteur déplacement correspondant à tous les points du solide. Le principe de base consiste à remplacer un modèle continu possédant un nombre infini de paramètres par un modèle discret caractérisé par un nombre fini de paramètres.

Les principales étapes consistent à :

Décomposer en domaines de forme géométrique simple reliés entre eux en des points appelés nœuds.

Les déplacements sont définis par le déplacement des nœuds. Ceci permet de déduire l'état des déformations et des contraintes en tous points de chaque élément constituant le système.

Il reste ensuite à définir la matrice de rigidité globale du modèle en prenant celles de chaque élément.

Après la mise en place des conditions aux limites, on calcule les déplacements inconnus. Les déplacements des nœuds sont les inconnues du système.

6.3 Principe de fonctionnement des toolbox

Le programme informatique CALFEM est une toolbox MATLAB pour des applications à éléments finis. L'analyse par éléments finis peut être effectuée interactivement ou dans un mode orientée par groupe. En mode interactif les fonctions sont évaluées dans la fenêtre de commande de MATLAB. Dans le groupe orienté le mode un ordre des fonctions sont écrits dans un dossier appelé .m-file, et évalué en écrivant le nom de fichier dans la fenêtre de commande. Le mode orienté par groupe est une manière plus flexible d'exécuter l'analyse par éléments finis parce que le .m-file peut être écrit dans un rédacteur ordinaire. Cette manière d'employer CALFEM est recommandée parce qu'elle donne une organisation structurée des fonctions. Des changements et les réexécutions sont également facilement exécutés du mode orienté par groupe.

6.4 Fonctions système statique/dynamique

Le groupe de fonctions système comporte des fonctions pour l'établissement, la solution, et l'élimination des systèmes des équations. Les fonctions sont séparées dans deux groupes :

Fonctions système statiques

Fonctions système dynamiques

Les fonctions système statiques concernent le système des équations linéaire

$$K \cdot a = f$$

où K est la matrice de rigidité a le champ de déplacement et le f est le vecteur global de charges. Les fonctions système statiques employées souvent sont assem et solveq. La fonction assem assemble la matrice globale de rigidité et solveq calcule le vecteur global de déplacement en considérant les conditions aux frontières. Il convient de noter que ces variable K, f peuvent être utilisé pour d'autre systèmes que les systèmes mécaniques structuraux. Par exemple, dans l'écoulement de la chaleur un problème K représente la matrice de conductivité, f l'écoulement de la chaleur, et a la température.

Les fonctions système dynamiques sont liées à différents aspects des systèmes dynamiques linéaires des équations ordinaires couplées selon ˙d de

$$C \cdot \dot{a} + K \cdot a = f$$

pour les systèmes de premier ordre et

$$M \cdot \ddot{a} + C \cdot \dot{a} + K \cdot a = f$$

pour les systèmes de second ordre. Les systèmes de premier ordre se caractérisent typiquement dans la conduction transitoire de chaleur et les systèmes de second ordre arrivent dans les cas de dynamique structurale.

6.5 Valeur propre

Lorsqu'un corps est écarté de sa position de repos, il a tendance à vibrer à certaines fréquences appelées fréquences, propres naturelles ou de résonance. A chaque fréquence propre correspond une déformée, appelée mode propre de vibration. L'analyse fréquentielle permet de calculer les fréquences de résonance et les modes propres associés.

En théorie, chaque corps est doté d'un nombre infini de modes. En analyse par éléments finis, les modèles comportent autant de modes que de degrés de liberté. Cependant, dans la plupart des cas, seuls quelques modes sont pris en considération.

La fonction eigen résout les problèmes aux valeurs propres, où $\lambda=\omega^2$

$$| K - \lambda M | = 0$$

Les valeurs propres sont stockées dans un vecteur et les vecteurs propres correspondants dans une matrice. Si certaines rangées et colonnes dans les matrices K et M doivent être éliminées en calculant les valeurs propres, les conditions aux limites doit être donné dans la fonction, il représente les degrés de liberté des nœuds étant fixé. Les rangées (et les colonnes) qui doivent être éliminés sont décrites dans le vecteur b défini comme

$$\mathrm{b} = \begin{bmatrix} dof_1 \\ dof_2 \\ \vdots \\ dof_{nb} \end{bmatrix}$$

Les valeurs propres calculées sont données dans l'ordre s'étendant du plus petit au plus grand. Les vecteurs propres sont normaux pour que

$$\mathrm{X}^T \mathrm{MX} = \mathbf{I}$$

où I est la matrice d'identité.

6.6 Types d'éléments

Le groupe de fonctions d'élément contient plusieurs types qui ont été divisées en groupes :

Éléments de ressort

Éléments de barre

Éléments de flux de la chaleur

Éléments pleins

Éléments de faisceau

Éléments de plaque

Pour chaque type d'élément il y a une fonction pour le calcul de la matrice K^e de rigidité d'élément. Pour la plupart des éléments, un vecteur de charge d'élément F^e peut également être calculé. Ces fonctions sont identifiées par leur dernière lettre - e.

Utilisant la fonction d'assemblage assem, les matrices de rigidité d'élément et les vecteurs de charge d'élément sont assemblés dans une matrice globale K de rigidité et dans un vecteur de charge global F. Les valeurs nodales inconnues des températures ou des déplacements A sont calculées en résolvant le système d'équations KA= f utilisant la fonction solveq. Un vecteur des valeurs nodales des températures ou des déplacements pour un élément spécifique sont constitués par la fonction extract.

Quand les valeurs nodales d'élément ont été calculées, le flux d'élément ou les efforts d'élément peut être calculé utilisant des fonctions spécifiques au type d'élément concerné. Ces fonctions sont identifiées par leur dernière lettre - s.

Pour quelques éléments, une fonction pour calculer le vecteur de force interne est également disponible. Ces fonctions sont identifiées par leur dernière lettre - f.

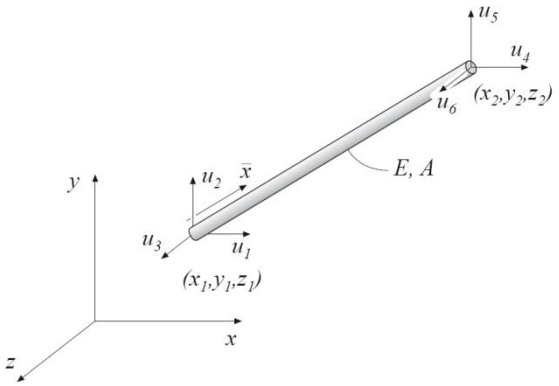
Les éléments de barre sont disponibles pour une analyse sur une, deux, et trois dimensions.

Dans la toolbox OpenFem, le choix des éléments est encore plus important. On peut noter notamment un grand nombre d'élements volumiques et d'éléments coques, ces derniers seront utiles à la modélisation du miroir. Les éléments 3D comportent un grand nombre de degré de liberté ce qui explique les différences entre l'implémentation des modèles entre les deux toolbox

6.7 Méthode de calcul utilisé par la toolbox CALFEM

6.7.1 Fonction

Calcul de la matrice de rigidité pour un élément tridimensionnel de barre.



Description : bar3e fournit la matrice KE de rigidité d'élément pour un élément tridimensionnel de barre. Les variables d'entrée sont

ex = [x_1 x_2] ey = [y_1 y_2] ez = [z_1 z_2]

ep = [E A]

il faut fournir les coordonnées nodales d'élément x_1, y_1, z_1, x_2 etc, le module d'élasticité E, et la section en coupe A.

6.7.2 Théorie :

La matrice globale K^e de rigidité d'élément est calculée selon

$$\mathbf{K}^e = \mathbf{G}^T \, \bar{\mathbf{K}}^e \, \mathbf{G}$$

où

$$\bar{\mathbf{K}}^e = \frac{EA}{L}\begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \qquad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} n_{x\bar{x}} & n_{y\bar{x}} & n_{z\bar{x}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & n_{x\bar{x}} & n_{y\bar{x}} & n_{z\bar{x}} \end{bmatrix}$$

La matrice G de transformation contient les cosinus de direction

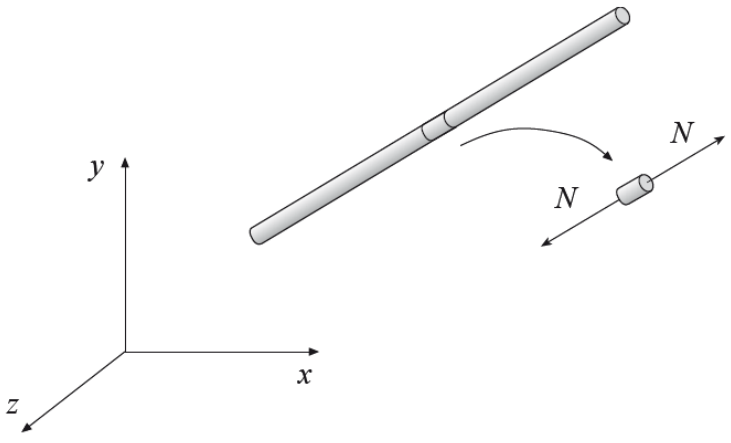
$$n_{x\bar{x}} = \frac{x_2 - x_1}{L} \qquad n_{y\bar{x}} = \frac{y_2 - y_1}{L} \qquad n_{z\bar{x}} = \frac{z_2 - z_1}{L}$$

Où la longueur vaut

$$L = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}.$$

6.7.3 Fonction

Calcul de la force normale dans un élément tridimensionnel de barre.



Les variables d'entrée e_x, e_y, e_z, et ep sont définis dans bar3e, et les déplacements nodaux d'élément, stockés dans ed, ils sont obtenus par la fonction extract.

La variable de sortie es = [N] contient la force normale N de la barre.

6.7.4 *Théorie*

La force normale N est calculée à partir de

$$N = \frac{EA}{L}\,[\,-1 \quad 1\,]\,\mathbf{G}\,\mathbf{a}^e$$

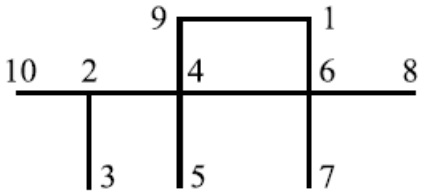
là où E, A, L, et la matrice G de transformation sont définis dans bar3e. Les déplacements nodaux dans des coordonnées globales

$$\mathbf{a}^e = [\,u_1 \;\; u_2 \;\; u_3 \;\; u_4 \;\; u_5 \;\; u_6\,]^T$$

est alors montré dans bar3e, il est également stocké dans la variable Ed.

6.8 Assemblage matrice

Dans le cas d'un système complet, un ensemble d'éléments doit être assemblé dans des matrices globales. Cela consiste à placer les matrices de rigidité élémentaire dans une matrice globale où les lignes et colonnes représentes les degrés de liberté de chaque élément l'un après l'autre. Pour illustrer ceci prenons une structure à un seul degré de liberté :



Ce qui nous mène à une matrice de rigidité globale comme ci-dessous, où chaque croix représentes la matrice de rigidité de l'élément.

$$[K] = \begin{bmatrix}
\times & . & . & . & . & \times & . & . & \times & . \\
. & \times & \times & \times & . & . & . & . & . & \times \\
. & \times & \times & . & . & . & . & . & . & . \\
. & \times & . & \times & \times & \times & . & . & \times & . \\
. & . & . & \times & \times & . & . & . & . & . \\
\times & . & . & \times & . & \times & \times & \times & . & . \\
. & . & . & . & . & \times & \times & . & . & . \\
. & . & . & . & . & \times & . & \times & . & . \\
\times & . & . & \times & . & . & . & . & \times & . \\
. & \times & . & . & . & . & . & . & . & \times
\end{bmatrix}$$

Par exemple l'élément 4-6 contribue en [4; 4], [4; 6], [6; 4] et [6; 6]. Il est important de noter que les matrices sont de type symétrique. Il est par conséquent inutile d'en mémoriser l'intégralité. D'ailleurs il semblerait que les logiciels réorganisent la numérotation des nœuds

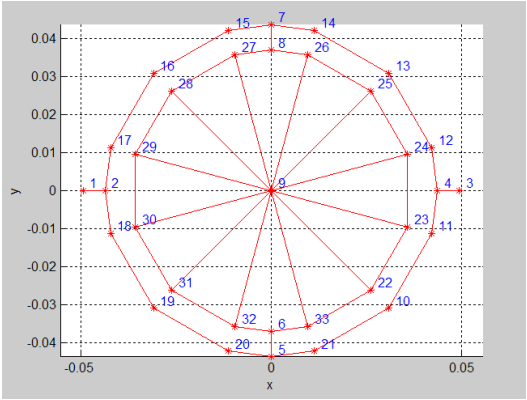
afin de limité la taille de cette matrice en plaçant les valeurs non-nul à proximité de la diagonale.

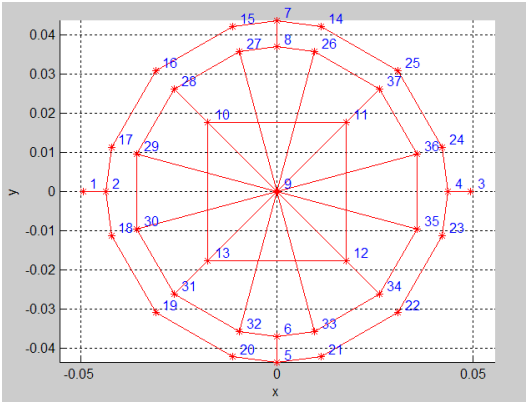
La matrice globale de masse M est constituée de la même façon, la seule différence étant que l'on place des masses et des inerties au lieu de matrice de rigidité. Dans le cas d'un élément à 6 degrés de liberté, les 3 premiers représentent les masses selon les axe x, y et z, tandis que les suivants sont les valeurs des inerties selon le plan perpendiculaire à l'axe en question. Par exemple, la première inertie est liée à la rotation selon le plan yz.

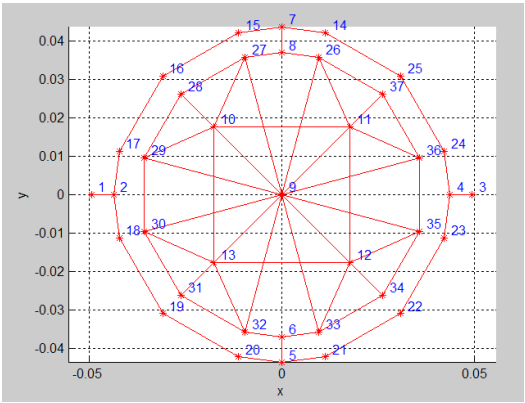
Ensuite dans notre cas, il faut extraire les modes propres. Cette méthode a pour but de découpler les contributions des déformations liées à chaque valeur propre.

7 Modélisation

Plusieurs tentatives de modélisation ont été effectuées avec la toolbox Calefem. L'approche choisie est de type incrémentale en prenant d'abord un modèle simple qui fonctionne et le en complétant petit à petit.







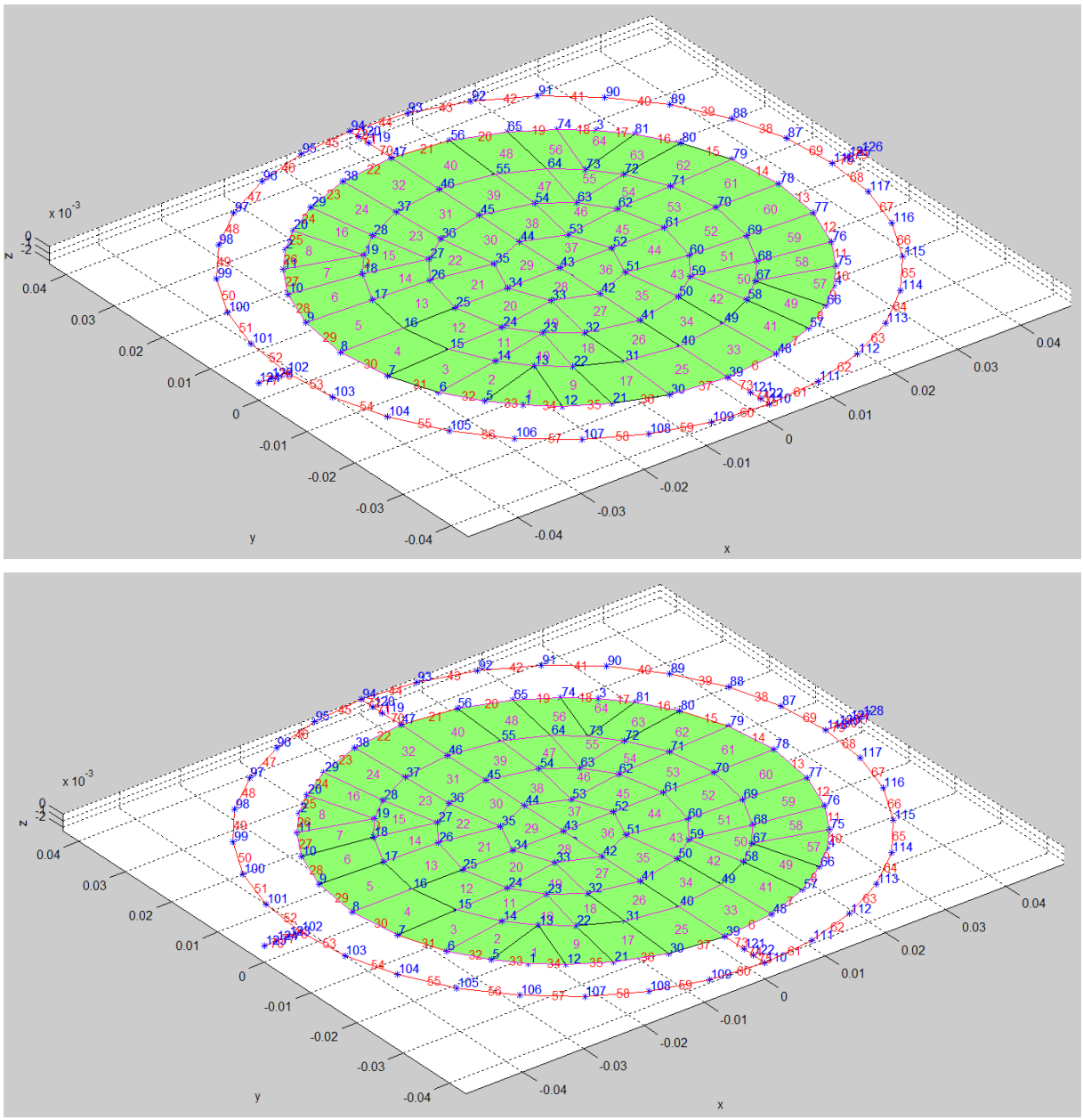


Figure 44 Evolution des différents modèles

Dès le départ la structure ressort est modélisée à l'aide d'élément poutre et les points fixe sont l'extrémité des liens rendant solidaire le système modélisé au bâti.

8 Le modèle final

La modélisation du miroir déformable est finalement constituée de plusieurs types d'éléments. Premièrement les poutres restent utilisées pour la constitution de l'anneau du ressort. Les liens rendant solidaires la structure, le miroir et l'anneau se sont légèrement compliqués. Etant donné que la torsion des liens ne se fait pas sur toute la longueur de l'élément. La zone en question a été limitée en ajoutant des éléments moins flexibles en augmentant leur largeur.

La seconde différence consiste à modéliser le miroir à l'aide d'éléments quads de la toolbox openfem. Ses éléments permettent de créer des surfaces constituées de quadrilatères.

Finalement les aimants sont modélisés à partir de poutres circulaires placées perpendiculairement à la surface du miroir.

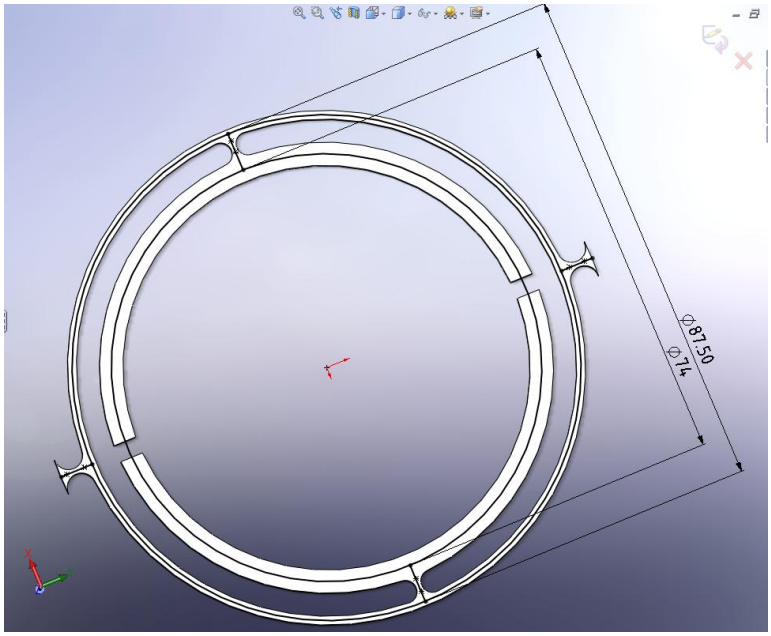


Figure 45 Dimension du modèle

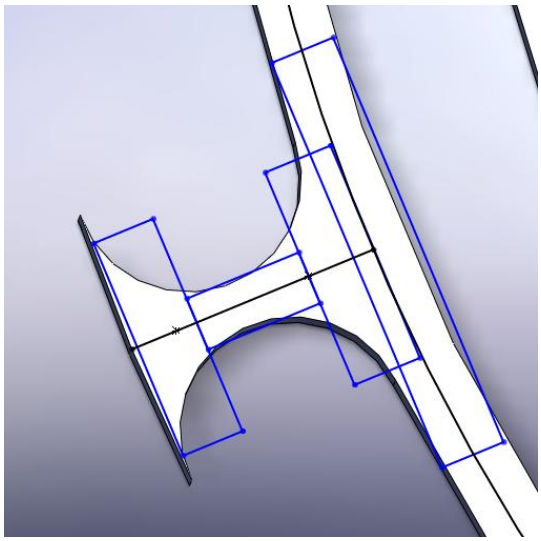


Figure 46 Modélisation des liens

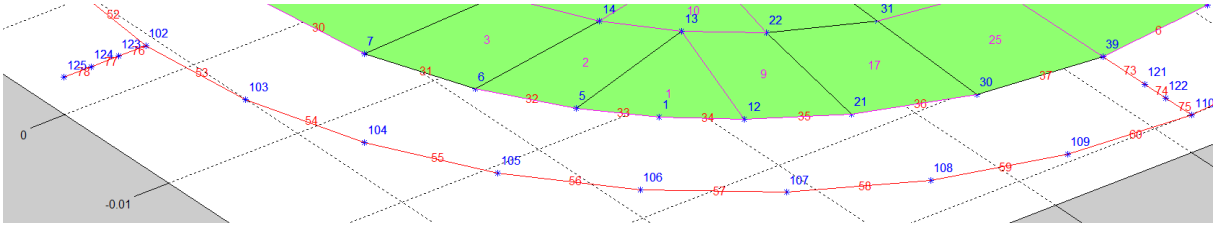


Figure 47 Résultat sur le modèle

La caractérisation de ses éléments a été la suivante :

```
% Materials
pois = 0.33;
% Al alloy
rho_Al = 2700.;
E_Al = 69000e6; G_Al = E_Al / (2*(1+pois));
alpha_Al = 23.4e-6;

R_act = 25e-3; % Pupil diameter
diam = 70e-3;  % Mirror diameter
R_flex1 = 78e-3/2;
R_cardan = 87e-3/2;
R_flex2 = 91e-3/2;
R_flat = 99e-3/2;
Lflex = 2e-3;
nb_c = 16;

magnet_mass = 4.2e-3;
R_bobine = 5;
Kf = 0.5;
```

```
h = 1e-3;       b = 4e-3;
[A, Iy, Iz, J] = rect_pro (b,h);
Ep_contour = [E_Al  G_Al  A Iy Iz J A*rho_Al];

h = 1e-3;       b = 1.3e-3;
[A, Iy, Iz, J] = rect_pro (b,h);
Ep_flex = [E_Al  G_Al  A Iy Iz J A*rho_Al];

h = 1e-3;       b = 3e-3;
[A, Iy, Iz, J] = rect_pro (b,h);
Ep_flat = [E_Al  G_Al  A Iy Iz J A*rho_Al];

h = 1e-3;       b = 1.5e-3;
[A, Iy, Iz, J] = rect_pro (b,h);
Ep_cardan = [E_Al  G_Al  A Iy Iz J A*rho_Al];

r = 0.006;
[A, Iy, Iz, J] = circ_pro (r);
Ep_stiff = [E_Al*3  G_Al*2.75  A Iy Iz J
                               A*rho_Al/10000];

FE.pl = m_elastic('dbval 100 aluminum');
FE.il = [p_shell('dbval 110 kirchhoff 0.0015')
```

Ep_contour : partie de la structure ressort qui est collée au miroir

Ep_flex : partie flexible des liens entre les anneaux de la structure ressort

Ep_flex : partie rigide des liens entre les anneaux de la structure ressort

Ep_cardan : anneau de la structure ressort

Ep_stiff : poutre modélisant les aimants

FE.pl et Fe.il : caractéristiques du miroir

Les fonctions rect_pro et circ_pro permettent d'obtenir les inerties et les aires

Il est important de remarquer que les propriétés de l'aluminium et du verre sont très proche par conséquent il n'a pas été jugé nécessaire de définir plusieurs modules de poisson, masses volumiques ou modules de Young… Les différences sont illustrées par le tableau suivant :

	Masse volumique	Coefficient de poisson	Module de Young	
Verre zerodur	2530 [kg/m^3]	0.24	69000 [MPa]	
Aluminium	2690 [kg/m^3]	0.33	69000 [MPa]	

A présent, les propriétés des matériaux sont mises en places, il reste à créer les éléments en plaçant les nœuds et en les reliant. Ceci se fait à l'aide des fonctions contenues dans heads_data. Ces points sont numérotés et stockés dans la matrice Coord, tandis que les éléments se placent dans la matrice Elem qui fonctionne en associant les numéros des nœuds. Etant donné que l'on travaille sur les nœuds à ces moments, on en profite pour imposer les conditions aux limites. C'est-à-dire que l'on bloque des degrés de libertés des nœuds étant fixés sur la structure. Dans notre cas, il s'agit de l'extrémité de la partie ressort.

Ensuite chaque élément est associé à ses propriétés à l'aide de la fonction assem qui permet de créer une matrice de rigidité K et de masse M, ceci se fait par l'appel à la fonction heads_KCM. Cette méthode de fonctionnement est liée à la toolbox Calefem.

Pour la surface du miroir les éléments quad proviennent de la toolbox Openfem. La méthode de modélisation est différente. Toutes les informations sur le modèle sont placées dans une structure définissant les coordonnées des nœuds, les éléments ainsi que leurs propriétés.

Pour le miroir, cette structure est d'abord utilisée puis on en extrait les parties nécessaires pour faire fonctionner le modèle sur Calefem. Le détail du code se trouve en annexe. Mais il n'a pas été jugé nécessaire de s'étendre sur le fonctionnement.

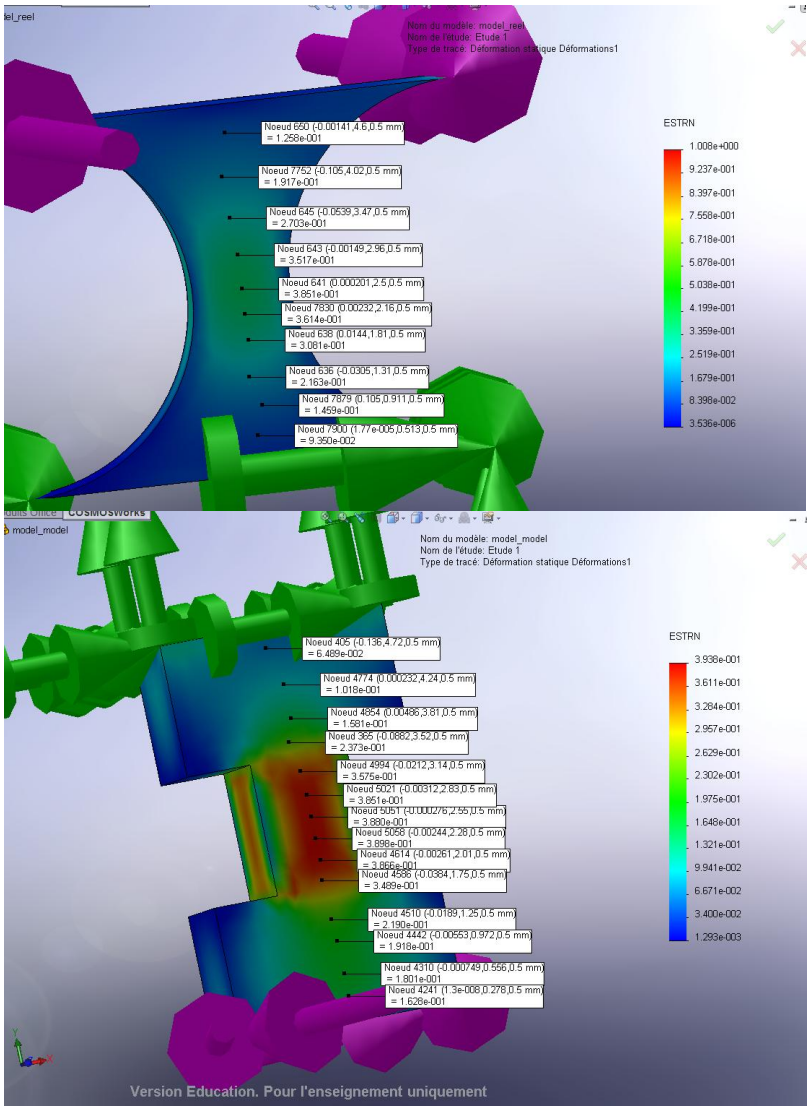
```
model = struct('Node',[],'Elt',[]);
%           NodeID  unused    x y z
model.Node=[ 1       0 0 0     0 1 0;
             2       0 0 0     0 0 0;
             3       0 0 0     1 1 0;
             4       0 0 0     1 0 0;
             5       0 0 0     2 0 0;
             6       0 0 0     2 1 0;
             7       0 0 0     1 1 1]; % reference node

model.Elt=[
           % declaration of element group for longerons
              Inf      abs('beam1')
           %node1  node2   MatID ProID nodeR, zeros to fill the matrix
              1       3       1     1     7       0
              3       6       1     1     7       0
              2       4       1     1     7       0
              4       5       1     1     7       0
```

Figure 48 Déclaration des nœuds et éléments sur OpenFEM

8.1.1 Validation des liens reliant l'anneau ressort au miroir

Le point critique est la modélisation des liens entre les différents anneaux du ressort qu'il faudrait contrôler en torsion. Pour ce faire, le programme de simulation de SolidWorks permet de contrôler les déformations en torsion. Les résultats obtenus sont les suivants.



On remarque que si l'on divise la longueur de la pièce (5 mm) en 3 parties avec une largeur de l'élément intermédiaire de 1.3 mm l'état des déformation est similaire.

Afin de garder un rapport acceptable au niveau des surface une largeur de 3 mm est tout à fait correct.

$$A_{model} = 3 \cdot 5 - 1.7 \cdot 1.3 \cong 12.9\ [mm^2]$$

$$A_{réelle} = 6.32 \cdot 5 - 2.5^2 \cdot \pi \cong 12\ [mm^2]$$

Sur les figures de droite les flèches vertes représentent le blocage des degrés de liberté tandis que les violettes le couple appliqué.

Dans les 2 cas l'épaisseur de la pièce est de 1 mm.

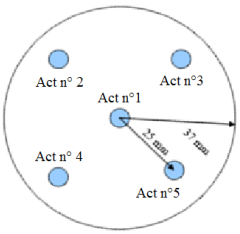
Figure 49 Simulation de déformée en torsion sur SolidWorks

9 Analyse statique

9.1 Forces à appliquer

A présent le modèle est assemblé et l'analyse statique du modèle peut commencer. Dans un premier temps, il est apparu nécessaire de calculer les forces à appliquer pour induire les déformations liées à chaque mode propre. Pour ce faire, d'abord il a fallu créer une matrice permettant de passer des actuateurs vers les déformations liées aux polynômes de Zernike. Cette matrice contient le sens du mouvement dans lequel le nœud associé à l'actuateur va se déplacer. Si l'on numérote les nœuds de la façon suivante ça donne le résultat suivant :

$$modes2act = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$



Le mouvement à faire est donc représenté sur chaque colonne représentant les 5 modes corrigeables. Dans le programme, ses valeurs sont multipliées par un facteur afin qu'ils correspondent à des déplacements réalistes.

La fonction FE_stat permet de calculer les forces nécessaires à l'obtention de ses déformations. Les résultats obtenus sont les suivants :

Piston	sans gravité		gravité en z		gravité en y		gravité en x
Act_disp	Act_forces		Act_forces		Act_forces		Act_forces
[1e-4 m]	[N]		[N]		[N]		[N]
1	-0.0418		-0.0846		-0.0846		-0.0846
1	0.073		0.0083		0.0156		0.0229
1	0.073		0.0083		0.001		0.0083
1	0.073		0.0083		0.0156		0.0083
1	0.073		0.0083		0.001		-0.0062
Tilt-X							
0	0		-0.0427		-0.0427		-0.0427
-1	-0.1472		-0.2119		-0.2046		-0.1974
1	0.1472		0.0825		0.0752		0.0825
-1	-0.1472		-0.2119		-0.2046		-0.2119
1	0.1472		0.0825		0.0752		0.0679
Tilt-Y							
0	0		-0.0427		-0.0427		-0.0427
1	0.135		0.0703		0.0776		0.0849
1	0.135		0.0703		0.063		0.0703
-1	-0.135		-0.1997		-0.1925		-0.1997

-1	-0.135		-0.1997		-0.207		-0.2143
	sans gravité		gravité en z		gravité en y		gravité en x
Focus							
-1	-76.8534		-76.8962		-76.8962		-76.8962
1	19.2864		19.2217		19.2289		19.2362
1	19.2864		19.2217		19.2144		19.2217
1	19.2864		19.2217		19.2289		19.2217
1	19.2864		19.2217		19.2144		19.2071
Astigm							
0	0		-0.0427		-0.0427		-0.0427
1	33.4802		33.4155		33.4228		33.4301
-1	-33.4802		-33.5449		-33.5522		-33.5449
-1	-33.4802		-33.5449		-33.5376		-33.5449
1	33.4802		33.4155		33.4082		33.4009

Figure 50 Forces nécessaires pour obtenir les déformées modales

9.1.1 *Discussion des résultats*

Il est clair que le nombre de décimale affiché n'a pas vraiment de sens. Cependant il permet de remarquer que les valeurs diffèrent légèrement en fonction de l'orientation du miroir. On observe que ces différences sont réellement négligeables pour les deux derniers modes. Par conséquent, indépendamment de l'orientation, la régulation pourrait être identique.

Mais pour les trois premiers, les changements sont significatifs. On remarque qu'en moyenne les amplitudes les plus faibles sont bien entendu présentent en l'absence de gravité, mais cela n'est pas réaliste. Le point intéressant est que la gravité selon y semble permettre de fournir des forces moins élevées que dans les deux autre cas. Concernant la gravité selon x, la dissymétrie des forces indique que le miroir doit être, à l'état initial, dans une position qui n'est pas comparable au deux autres situations. Une autre notion importante mise en évidence est le fait que l'effet de la gravité induit la nécessité d'appliquer une force sur l'actuateur centrale ce qui n'était pas le cas auparavant.

De plus, il faut noter que par la suite les effets de la gravité ne sont pas pris en compte dans la fonction de transfert qui sera calculée. Par conséquent, le modèle fournira des forces qui ne sont pas tout à fait correct pour avoir les déplacements voulus.

Finalement, les déplacements imposés dans cette partie sont largement supérieur à la consigne qui sera donnée pour les deux derniers modes. Mais ils permettent toutefois de se donner une idée sur les différences de forces qu'il sera nécessaire de fournir pour chaque mode. De manière générale, on remarque que les ordres de grandeurs sont acceptables pour les premiers modes, les valeurs maximales sont aux alentours de 0.2 N ce qui parait atteignable.

9.2 Effet gravité

Au niveau de la statique, il est également important d'observer les déplacements induits par la gravitation selon le positionnement du miroir. La même fonction qu'utilisée précédemment permet de d'obtenir le résultat. Dans ce cas, la seule différence est son utilisation en inversant la solution et les variables. Le déplacement est l'inconnu tandis que les forces sont données. La force est obtenue en multipliant la partie de la masse appartenant au nœud dans la direction voulue par l'accélération gravitationnelle. Les résultats obtenus sont les suivants :

9.2.1 Miroir à l'horizontal

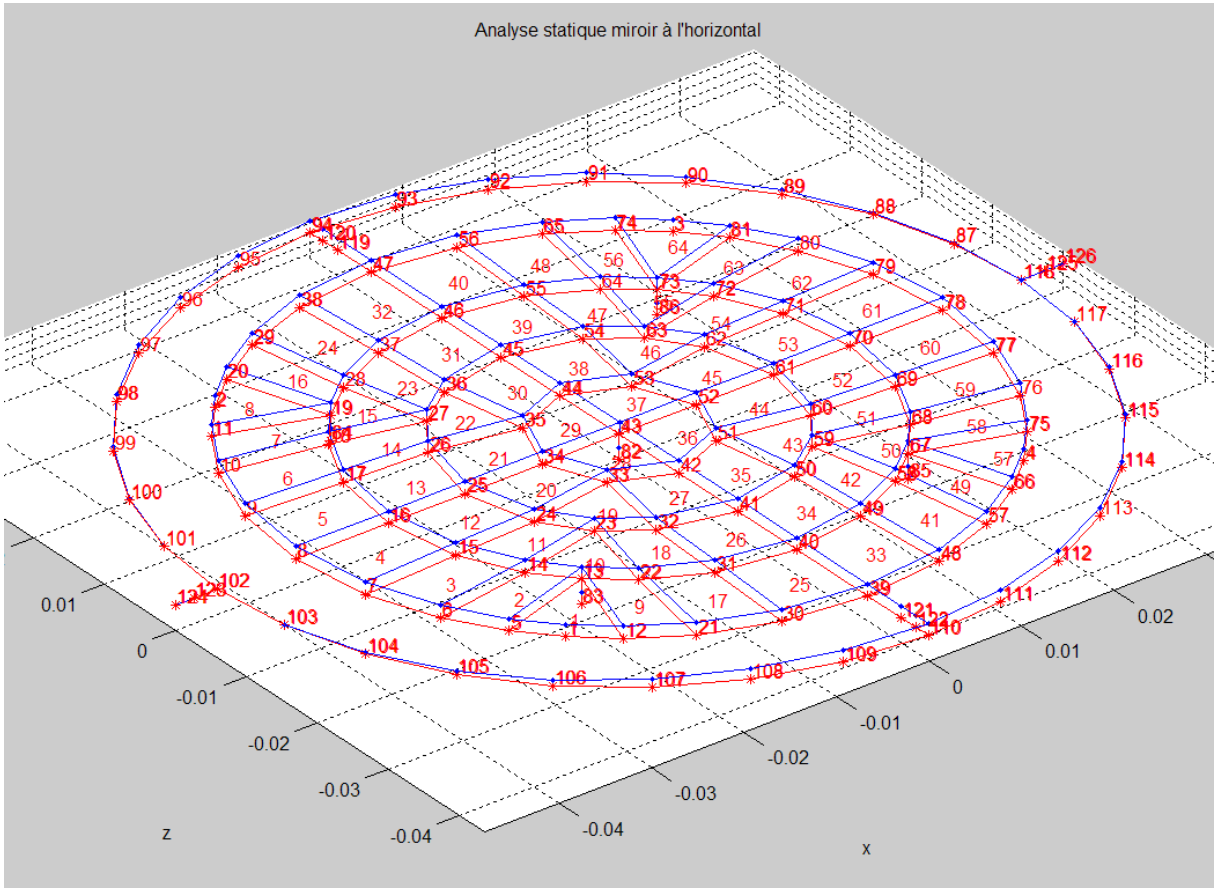


Figure 51 Illustration des déformations induites par la gravité si le modèle est à l'horizontal

Afin de mettre en évidence les déformations sur les graphes un facteur de multiplication a été utilisé. Ceci explique pourquoi il n'y a pas d'échelle en z sur les graphes. L'affaissement du miroir est dans le cas où il est posé à l'horizontal d'environ 0.12mm. Cependant la valeur du déplacement varie sur la surface du miroir. La figure suivante permet de mettre de voir les déformations de la surface.

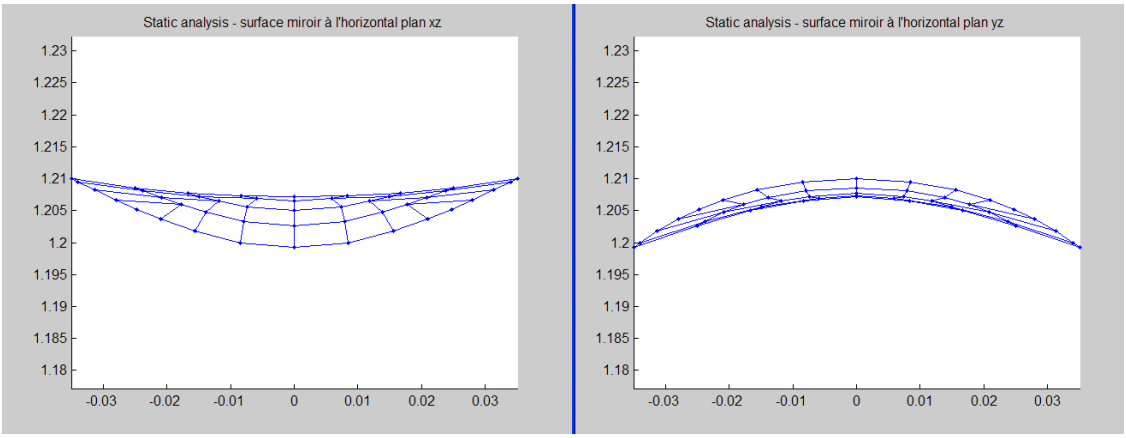


Figure 52 Déformation de la surface du miroir à l'horizontal

L'axe vertical représente la déformation en dixième de mm.

Cette forme de scelle s'explique par le fait que le miroir est tenu uniquement par deux points. Si l'on place le miroir dans à la vertical la déformation du toute est la suivante.

9.2.2 Miroir à la verticale selon x et y

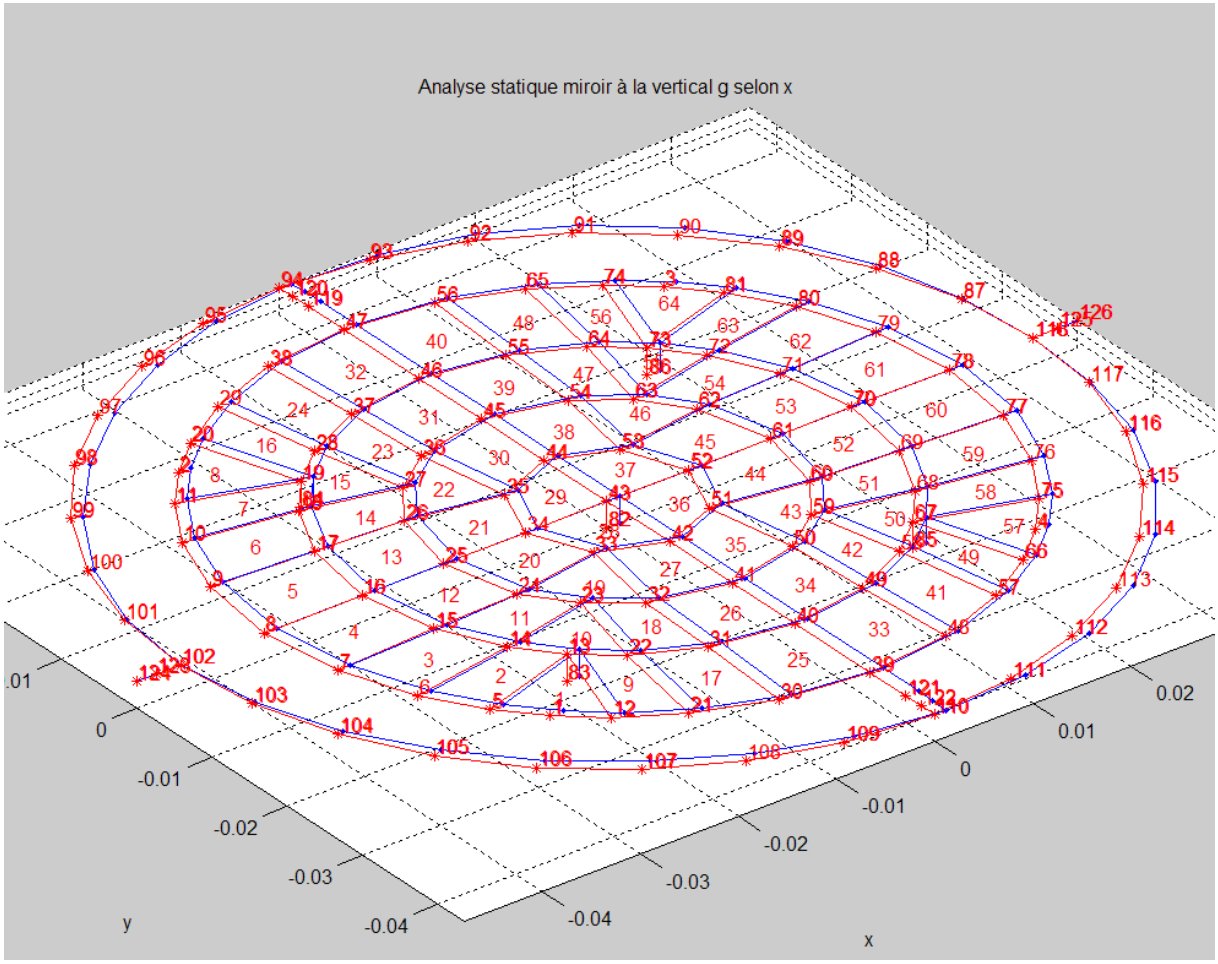


Figure 53 Illustration des déformations sur le miroir à la vertical (le coefficient multipliant les déplacements est différent du cas précédant)

La déformation est de l'ordre de 25 microns ce qui est bien inférieure au cas horizontal. Cependant il faut noter que dans cette configuration les aimants ne sont plus tout à fait alignés sur les actuateurs et par conséquent les sondes capacitives auront des résultats faussés, mais le déplacement est identique sur tous les actuateurs. Ainsi un calibrage suffit à rendre les mesures correctes à nouveau. De plus, dans cette position, il faut prendre un grand soin à placer le miroir à niveau verticalement mais en plus, selon le bon angle dans le plan perpendiculaire. Auparavant la gravité agissait en x, si on fait une rotation de 90°, la déformation est inférieure soit environ 17 microns.

Dans le cas vertical, il faut également noter que les masses des aimants entraînent une inclinaison du miroir de 12 microns d'amplitude aux extrémités ; pour la gravité selon x et un peu plus de un micron de moins avec la gravité en y.

Le fait que l'effet soit moins important avec la gravité selon x s'explique en raison de la charge qui est soutenue directement par les éléments rendant solidaires le ressort. Les valeurs obtenues sont tirées de la variable xyz, calculé dans la fonction heads_gravity_effect.

9.2.3 Analyse de la surface avec Cosmos

Les figures faites avec le simulateur de SolidWorks, mettent en évidence l'effet des aimants sur la surface si l'on bloque tous les degrés de liberté du contour du miroir.

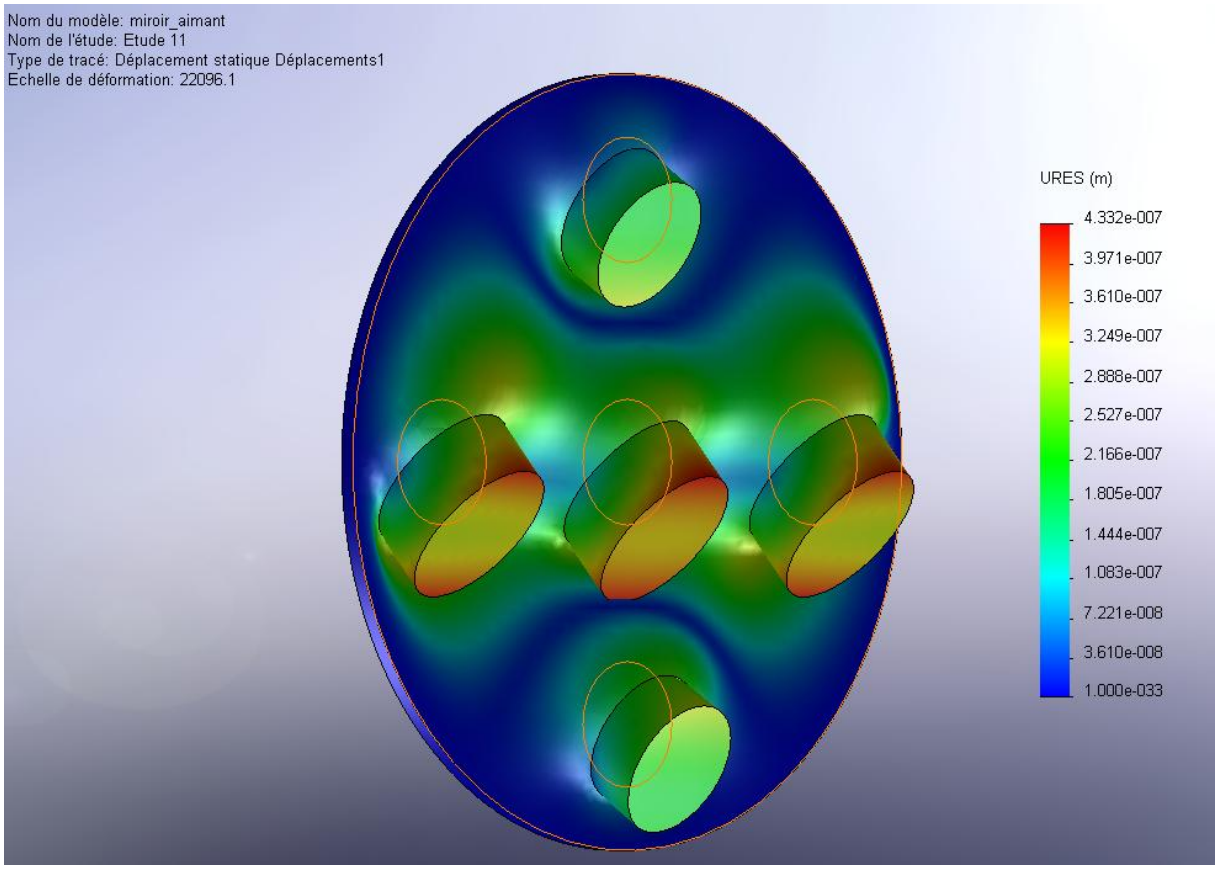


Figure 54 Simulation SolidWorks de l'effet des aimants en fixant le miroir

On remarque que dans le cas vertical la surface subit une relativement importante déformation qui est plus grande que dans le cas horizontal. Ceci s'explique probablement en raison du couple de torsion induit par les aimants. Dans le cas horizontal, seule la masse agit sur la surface sans avoir de bras de levier contrairement au cas vertical. Cependant, dans notre cas, le miroir n'est pas tout à fait fixe, par conséquent ces valeurs doivent être revues légèrement à la baisse.

Le solveur SolidWorks ne permet pas de faire une analyse complète du système ressort et aimant car il refuse de prendre le risque de résoudre un système où les ordres de grandeurs des déformations sont différentes d'une pièce à l'autre. Par conséquent il n'y a pas moyen de comparer les résultats obtenus. Cependant si l'on prend le modèle réel et l'on observe les déformations, on remarque que les ordres de grandeurs sont réalistes.

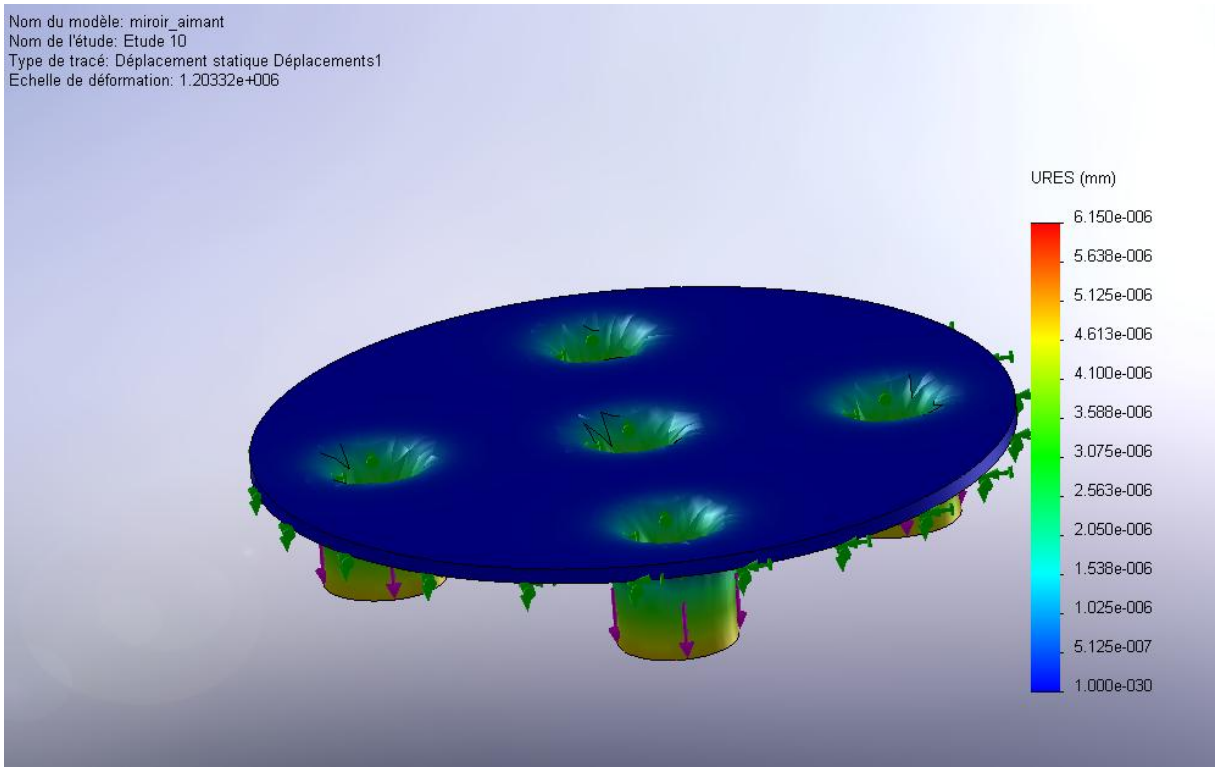
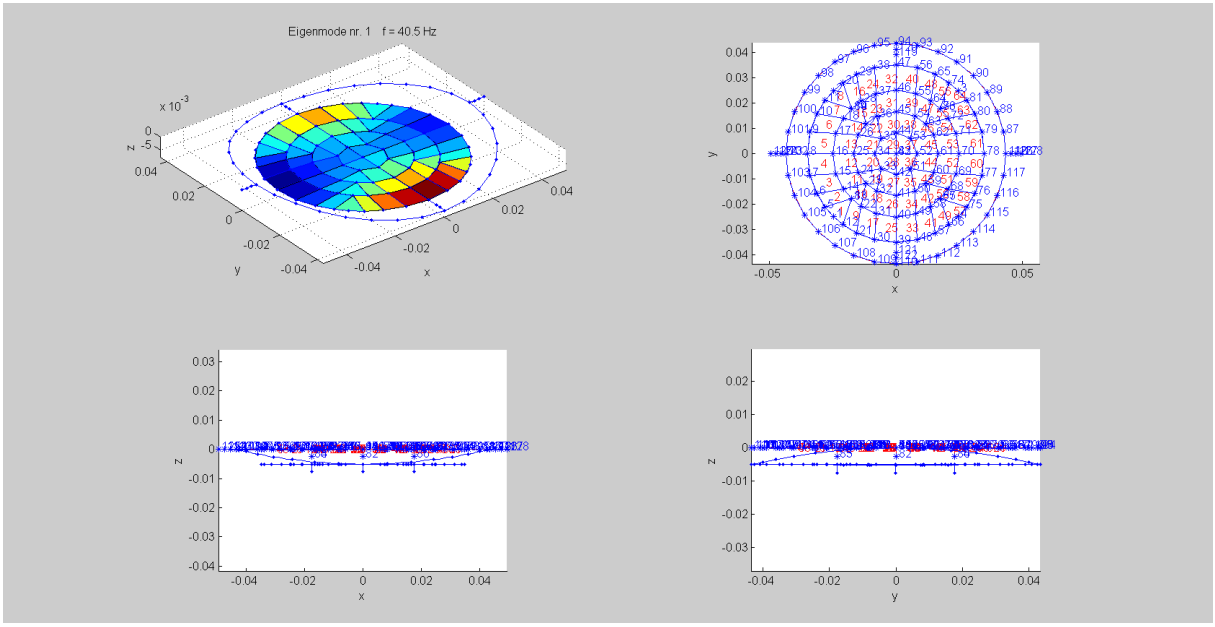
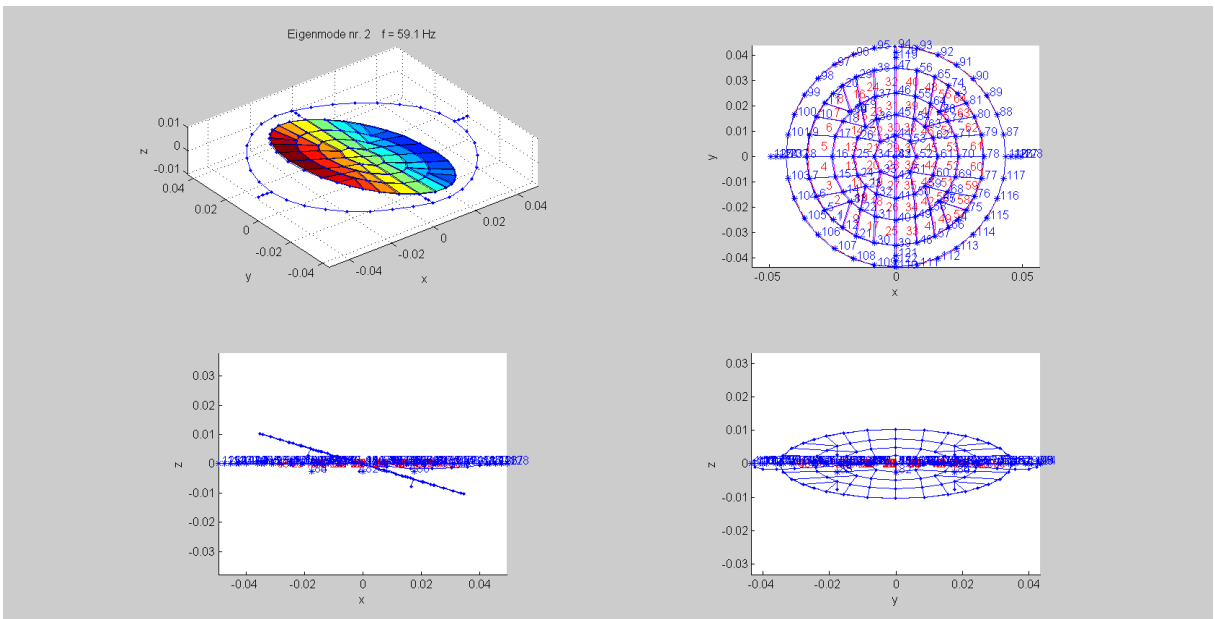


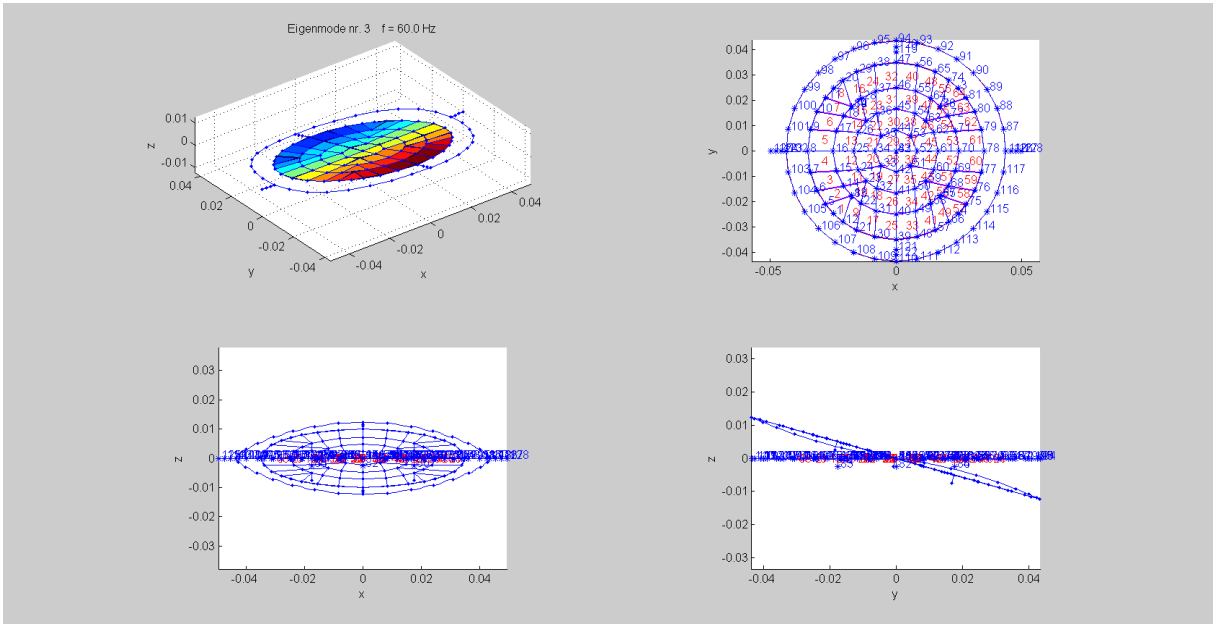
Figure 55 Simulation SolidWorks de l'effet des aimants dans le cas horizontal

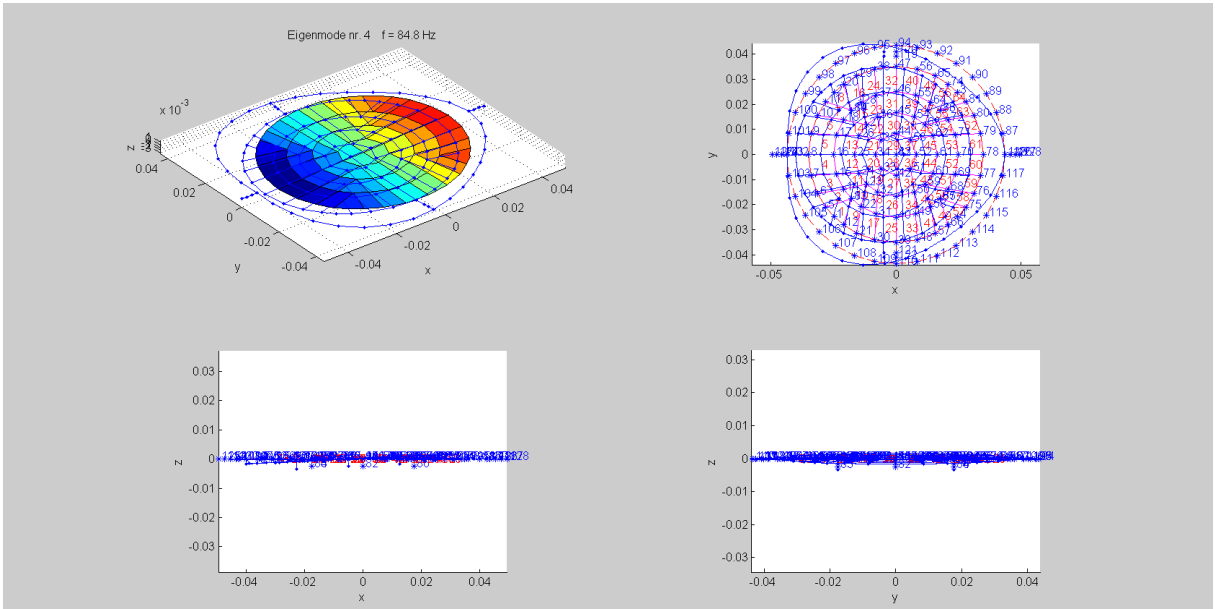
10 Calcul des modes propres

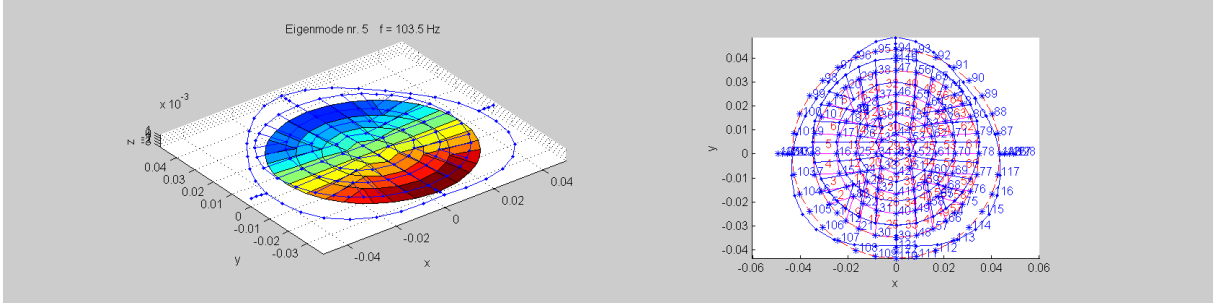
Les modes propres se calculent lors du lancement de la fonction heads_eigen. Pour son fonctionnement il est nécessaire de lui fournir la liste des nœuds ainsi que leur degré de liberté. Ces informations sont stockées dans mdof et adof. Le premier représente l'ensemble des nœuds pour la partie entière et le degré de liberté est placé après la virgule. Le second est identique pour une grande partie, la seule différence est la suppression des nœuds et des degrés de liberté qui sont fixés par les conditions aux limites. Comme dans l'analyse statique, les extrémités de la partie ressort sont figées par rapport aux six degrés de liberté. Les valeurs des modes propres trouvés sont associées à une série de graphes qui permet de contrôler la validité du modèle. Les résultats sont les suivants.






Eigenmode nr. 3 f = 60.0 Hz


Eigenmode nr. 4 f = 84.8 Hz


Eigenmode nr. 5 f = 103.5 Hz

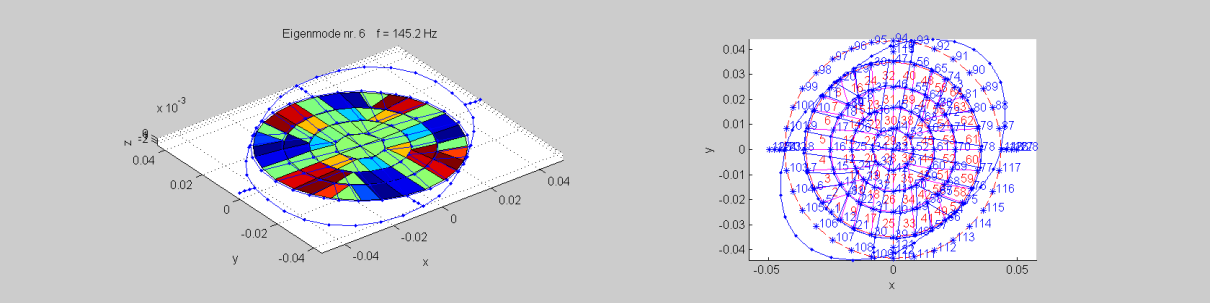


Figure 56 Illustration des déformées modales pour chaque fréquence propre

Sur la première figure du subplot, la couleur représente la position en z de l'élément. Les couleurs chaudes sont équivalentes à des z positifs tandis que les couleurs froides sont les z négatifs. Pour les deux derniers modes analysés les plans xz et yz ne sont pas présentés car ils n'apportent rien, ils étaient utile lors de la mise en place du modèle pour contrôler le bon fonctionnement des calculs.

10.1 Discussion des résultats

Les valeurs des fréquences propres sont différentes que celles calculer par le solver de SolidWorks. Mais ceci s'explique par le fait que l'anneau extérieur n'est pas représenté dans le modèle Matlab. Dans SolidWorks, les conditions aux limites étaient placées dans le trou de passage de vis. Mais le centimètre de tôles qui est pincé entre le baffle et la structure n'a pas de possibilité de se mouvoir, ceci explique pourquoi nos valeurs sont plus petites. Une autre simulation a été faite en supprimant l'anneau externe mais les résultats sont très proches de la première simulation. La validation de ses fréquences propres est importante car les valeurs propres sont liées aux fréquences de résonnance et anti-résonnance du système. Ces valeurs sont utilisées par la suite pour obtenir une fonction de transfert du système. Cependant la fonction de transfert est ensuite lue sur un diagramme de Bode ou les échelles sont logarithmiques. Par conséquent l'important est que les ordres de grandeur soit correct. Un moyen pour valider le modèle serait de faire une excitation du système avec un SBPA afin de valider la fonction de transfert.

Valeur propre du système :

	Matlab	SolidWorks
Première valeur propre	40.5	27.5
Deuxième valeur propre	59.1	45.3
Troisième valeur propre	60	48
Quatrième valeur propre	84.8	139.9
Cinquième valeur propre	103.5	159.7
Sixième valeur propre	145.2	

Etant donne la grande différence entre les deux simulations, une tentative a été faite en ajustant les valeurs de la masse volumique, du coefficient de Poisson pour le verre qui était laissé identique à ceux de l'aluminium. Cependant cette modification n'entraîne pas de changement significatif, l'effet est de diminuer de moins de 2 Hz les fréquences.

Dans la suite du programme, le fichier heads_lti utilise ces valeurs pour l'obtention de la fonction de transfert. Alors des tentatives ont été faites pour créer un diagramme de Bode à partir de ces valeurs, mais il ne suffit pas d'avoir les valeurs propres. Il est également nécessaire d'acquérir les vecteurs propres associés à chaque degré de liberté et ceci s'avère être compliqué. Par conséquent, l'idée a été abandonnée. De plus, SolidWorks ne permet pas d'obtenir plus que les 5 premières valeurs propres et par conséquent il ne serait pas possible d'obtenir le comportement du système pour les fréquences élevées. Cependant les valeurs Matlab étant supérieures pour les premières fréquences et inférieures pour les dernières, on peut remarquer que pour SolidWorks, les premières «dents» du diagramme de Bode arriveraient légèrement plus tôt. Mais à part cela, il est difficile de prévoir les changements dans le comportement.

Il est probable que le défaut sur les fréquences propres provienne du manque de réalisme de la modélisation de l'aimant. Il a simplement été crée avec un élément poutre et par conséquence, il n'influence pas vraiment sur la rigidité du miroir. Dans le cas réel, la surface des aimants représente près de 15% de la surface du miroir. Les endroits où sont collés les aimants sont sensés être presque inflexibles, ce qui n'est pas le cas dans notre modèle.

Il faut également noter que dans notre modèle, la somme des masses de chaque nœud représente un poids inférieur au système réel, par conséquence les masses ajoutées pour les aimants devraient également être pondérées en fonction de ce rapport masse système masse modèle.

Il est intéressant de remarquer que si l'on supprime les aimants sur le modèle SolidWorks les 3 premiers modes sont identiques à quelques pourcents près aux valeurs que nous donne notre modèle. Ceci est peut-être juste une coïncidence, mais il serait intéressant d'approfondir la question.

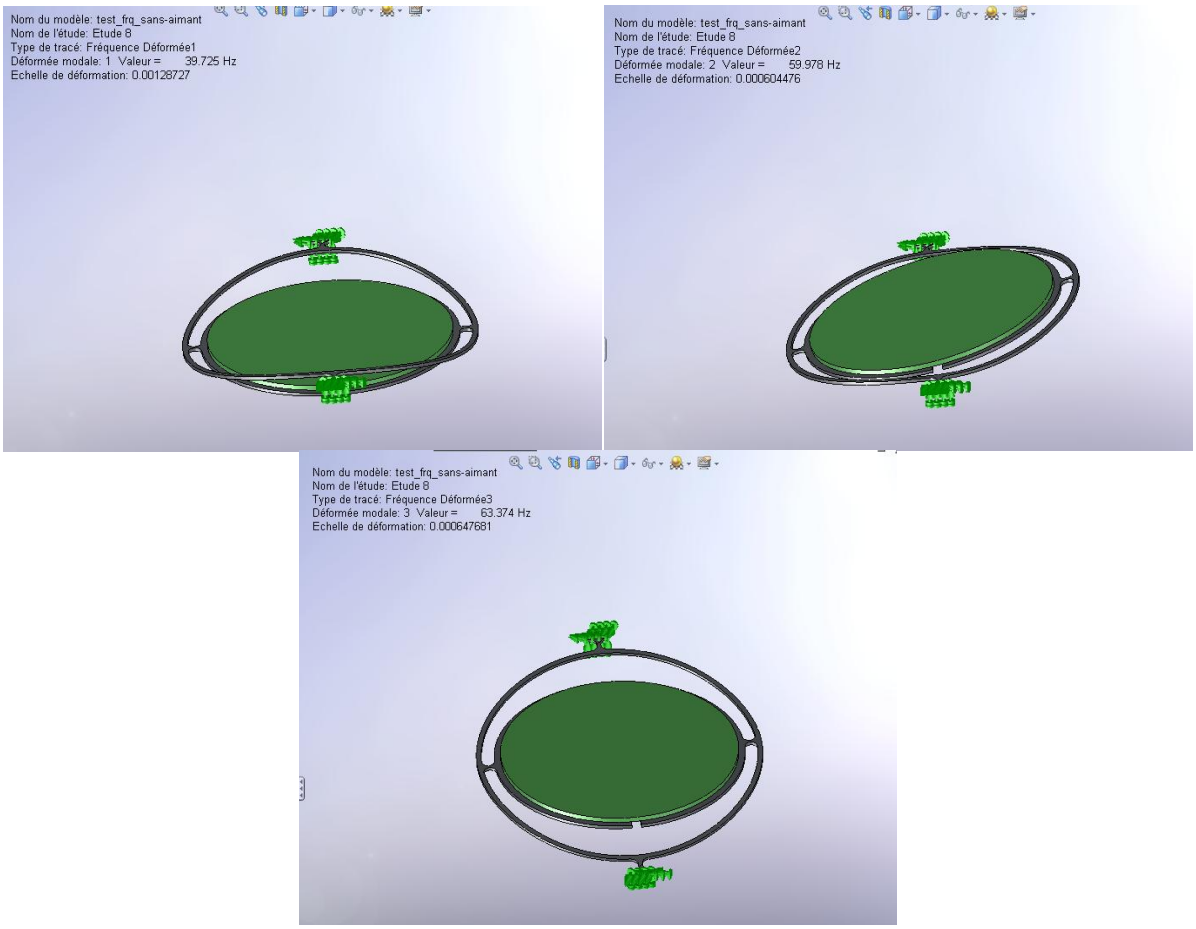


Figure 57 Simulation SolidWorks en l'absence des aimants

Ensuite en l'absence des masses des aimants les fréquences suivantes montent beaucoup plus haut. Afin de donner une rigidité plus grande aux zones où se trouvent les aimants, il faut augmenter le maillage du miroir afin de rigidifier une zone contenant plusieurs nœuds, mais le temps disponible ne le permettra malheureusement pas.

Toutefois, le modèle est tout de même acceptable car si l'on modifie légèrement les valeurs pour se caler soit sur les hautes fréquences, soit sur les basses. On remarque que les fonctions de transfert ne bougent pas énormément. L'effet est de décaler la fréquence de coupure de l'ordre de 100 rad/s et heureusement la zone associée aux fréquences d'utilisation du miroir n'est pas trop touchée. La suite du travail prendra les valeurs présentées auparavant car elles correspondent à une moyenne entre les deux autres cas.

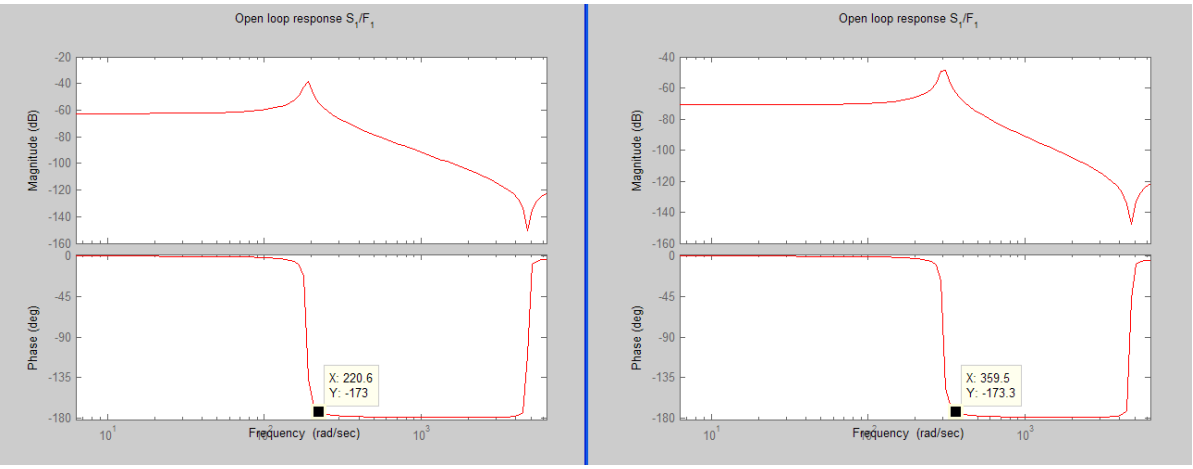


Figure 58 Comparaison actuateur central avec fréquences propres calés sur les premières valeurs SolidWorks (gauche) et sur les dernières (droite)

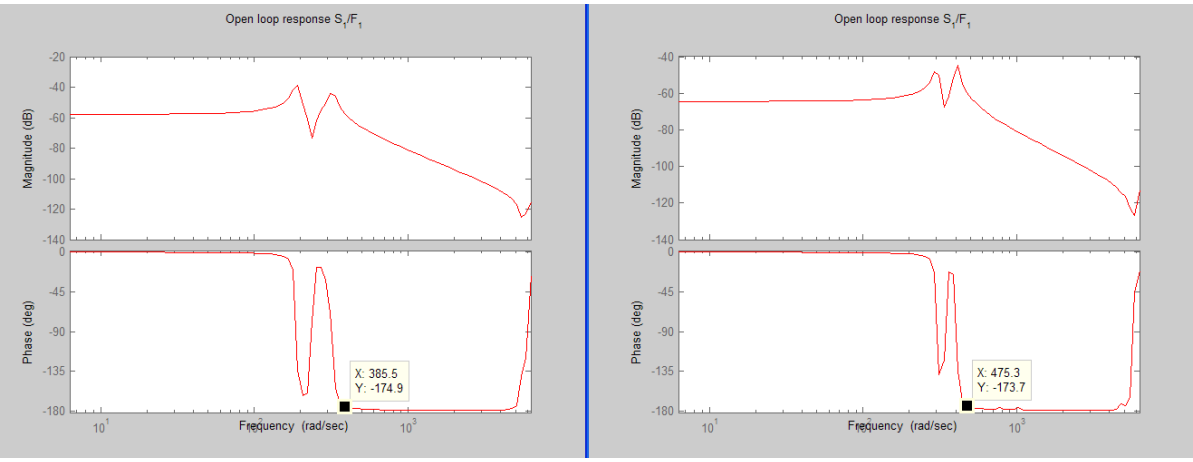


Figure 59 Comparaison actuateurs extérieurs avec fréquences propres calés sur les premières valeurs SolidWorks (gauche) et sur les dernières (droite)

11 Fonction de transfert

Pour obtenir la fonction de transfert le programme utilise des fonctions des toolbox SDT. Le principe consiste à fournir les nœuds ainsi que les degrés de liberté en entrée et en sortie et de les associer au vecteur propre du système. Dans notre cas, il s'agit en entrée et en sortie des nœuds correspondant aux actuateurs. Ensuite une fonction permet de créer une fonction de transfert en espace d'états avec 5 entrées et 5 sorties. Pour cette fonction, il faut fournir en argument l'amortissement du système. Comme le miroir est collé sur une structure ressort, l'amortissement à été fixé à 0.02.

Etant donné la multiplicité des entrées et sorties, il y a 5 diagrammes de Bode, cependant comme la position des actionneurs extérieurs présente une symétrie 4 des 5 diagrammes sont identiques. Les fonctions de transfert obtenues pour les actionneurs extérieurs et central sont présentées dans les figures ci-dessous.

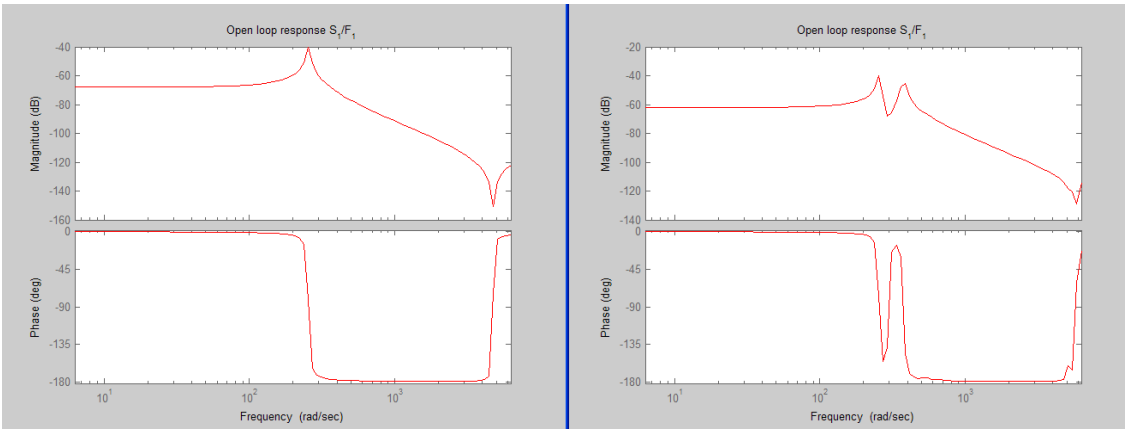


Figure 60 Actuateur central à gauche et actuateurs extérieurs à droite

Dans le modèle Matlab, entre la 6ème et la 7ème fréquence propre, il y a un grand écart qui maintient la chute de la phase sur quelques milliers de rad/s. On remarque également que le gain est légèrement différent pour les deux fonctions.

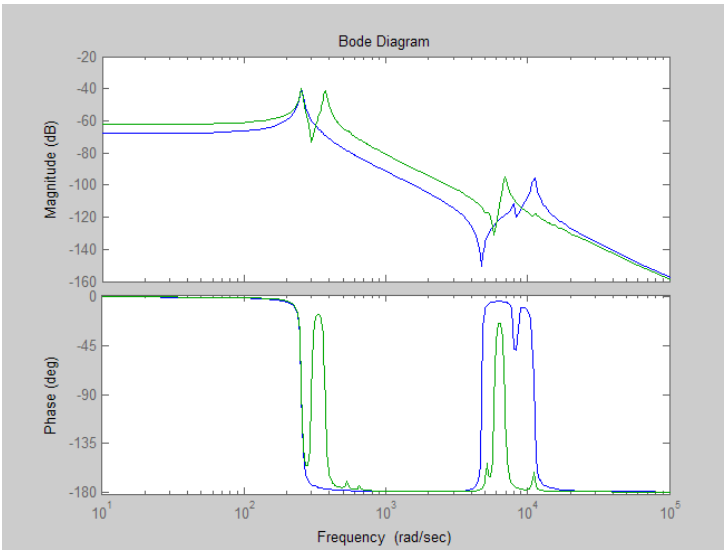


Figure 61 Superposition des deux fonctions de transfert

Etant donné que notre système sera finalement de type numérique, il est encore nécessaire de le convertir du continu (modèle en s) vers un modèle en z. la commande Matlab c2d

permet de le faire très simplement en précisant juste le temps d'échantillonnage, dans notre cas il a été fixé à 1 µs. Le diagramme de Bode du système numérique est le suivant :

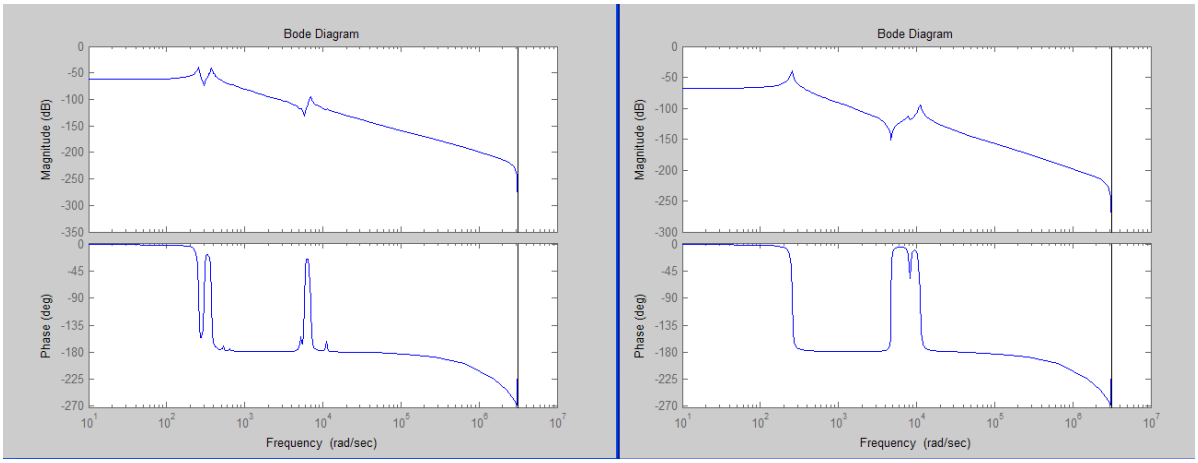


Figure 62 Fonction de transfert du système discret (actuateurs extérieur à gauche, central à droite)

Comme le système est échantillonné rapidement, on ne remarque pas de grandes différences avec le système continu. Il y a juste un petit décalage de l'ensemble vers la droite, mais concernant le régulateur les valeurs peuvent probablement rester les mêmes.

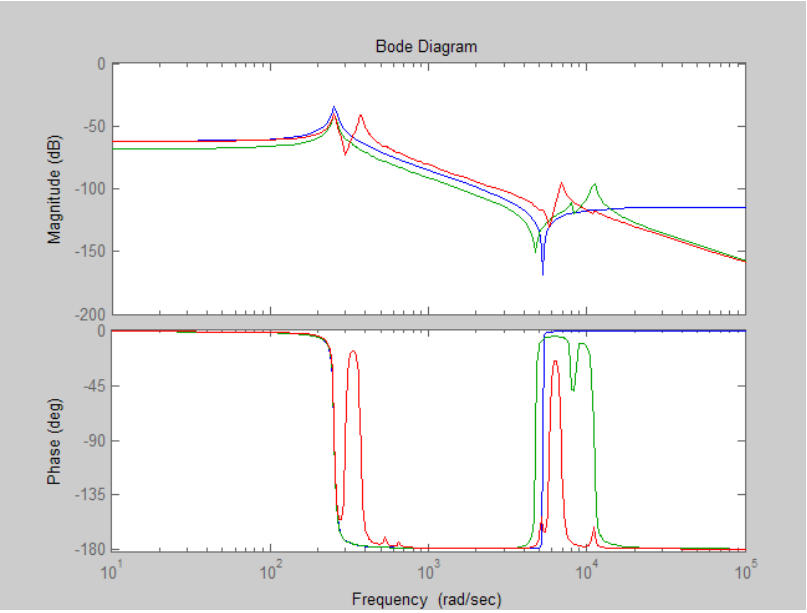
Un dernier détail à propos des fonctions de transfert est le fait que le système contient trop d'états pour que Matlab puisse donner une fonction de transfert en s global. En tenant compte uniquement des coefficients les plus importants, on peut obtenir une fonction du deuxième degrés à l'aide des fonctions Matlab balreal et modred. La fonction ressemble à ceci :

$$\frac{9.3315 \cdot 10^{-7} \cdot (s^2 + 10.2 \cdot s + 2.802 \cdot 10^7)}{s^2 + 10.18 \cdot s + 6.476 \cdot 10^4}$$

où les zéros et les pôles sont:

Zéros	Pôles
-5.1 $\pm$ 5293.3i	-5.1 $\pm$ 254.4i

Le diagramme de Bode de cette fonction est le suivant :



La trace bleu est la fonction de transfert en question, la rouge celle des actuateurs extérieurs et la verte celle de l'actuateur central.

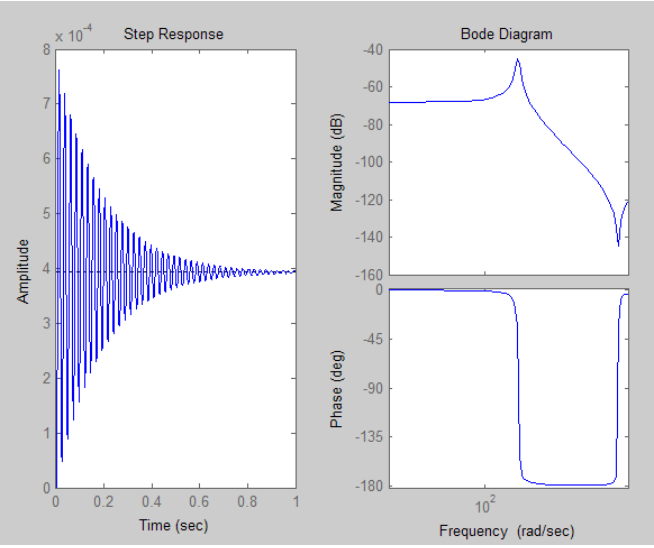
Figure 63

On obtient par ce biais une fonction de transfert proche dans les fréquences où le système va fonctionner. A présent, les fonctions de transfert sont bien établies. On peut donc passer à la régulation.

12 Régulation

Si l'on observe la fonction de transfert obtenu pour le système, on remarque que la marge de phase est faible mais positive, par conséquent le système se stabilise en boucle ouverte et fermé si l'on le soumet à un saut indiciel. En l'absence de régulateur le temps nécessaire à la stabilisation est de l'ordre d'une seconde dans les 2 cas, un régulateur PID permet grâce à l'action de la dérivée de renforcer la marge de phase afin d'accélérer la stabilisation et obtenir des temps de réponse inférieurs.

Les marges de phase sont importantes car ils permettent de modifier le processus, dans certaines limites. Dans notre cas, cela est significatif au moment de prendre en compte les retards du modèle. Un retard a pour conséquence de provoquer une chute du gain ce qui n'est pas très grave. Mais surtout, il occasionne également une chute de la phase qui commence une décade avant la pulsation correspondant au pôle, ce qui est beaucoup plus gênant. Comme le système est déjà à la limite de la stabilité si l'on ajoute un retard, il y a très peu de chances que le système reste stable.



Réponse indicielle de l'actuateur centrale en boucle ouverte

Figure 64

Sans les retards, le système est lent, mais stable. Les marges sont aussi des limites à l'exercice de la boucle de contrôle. Une trop grande stabilité des marges induit une limite à la rapidité du contrôle. Une marge de phase standard dans la région de 45° à 60° est une règle de base pour un bon contrôle.

12.1 Réglage PID

La méthode régulation PID standard consiste à compenser le pôle dominant du système à régler. Cependant, on obtient de meilleurs résultats en utilisant un multiple de la somme des petites constantes de temps correspondant au retard. Les constantes de temps correspondent au coefficient multipliant les s du dénominateur en modélisant les retards de la façon suivante : $G_{ret}(s) = \frac{1}{(1+s\cdot\tau_{ret})}$. Cependant le système perd du gain à mesure que le multiple augmente.

Dans le cas de la compensation des pôles, si l'on prend la fonction simplifiée, les pôles sont : -5.23 $\pm$ 261.64i. Etant donné que les pôles sont complexes, si l'on prend le module on obtient une valeur légèrement supérieure à la partie imaginaire, soit 261.8.

Dans le cas d'un dimensionnement en prenant un multiple de la somme des retards, le gain de la fonction de transfert est déjà à -80dB, il n'y a pas à avoir de remord à prendre un multiple élevé.

L'efficacité de cette méthode s'explique par le fait qu'une plus grande valeur permet de repousser vers la droite la chute de gain et de phase due au comportement intégrateur du système régler. La conséquence est de d'augmenter la marge de phase ainsi que la bande passante du système, c'est-à-dire maintenir une erreur statique minimum aussi longtemps que possible. Mais pour notre système le gain est tellement bas qu'une hausse de 20 dB ne l'influence pas énormément saut si l'effet du dérivateur arrive pour des fréquences très basse. Malheureusement, en contrepartie l'effet dérivateur a pour conséquence de d'augmenter la sensibilité au bruit.

Par conséquent, pour commencer par dimensionner un régulateur PD. Sa fonction de transfert est la suivante : $G_{PD}(s) = K_p \cdot (1 + s \cdot T_d)$

Il reste donc à tester différent multiple de Td qui est la somme des retards, fixée à une 0.1ms. Cette somme est constituée du retard de la mesure de la position et des retards liés au traitement numérique. Il est nécessaire de préciser que la consigne est elle-même entaché d'un retard dû au calcul du Shark-Hartmann, mais ça n'a pas de sens de l'intégrer ici car ce retard n'est pas dans la boucle du miroir.

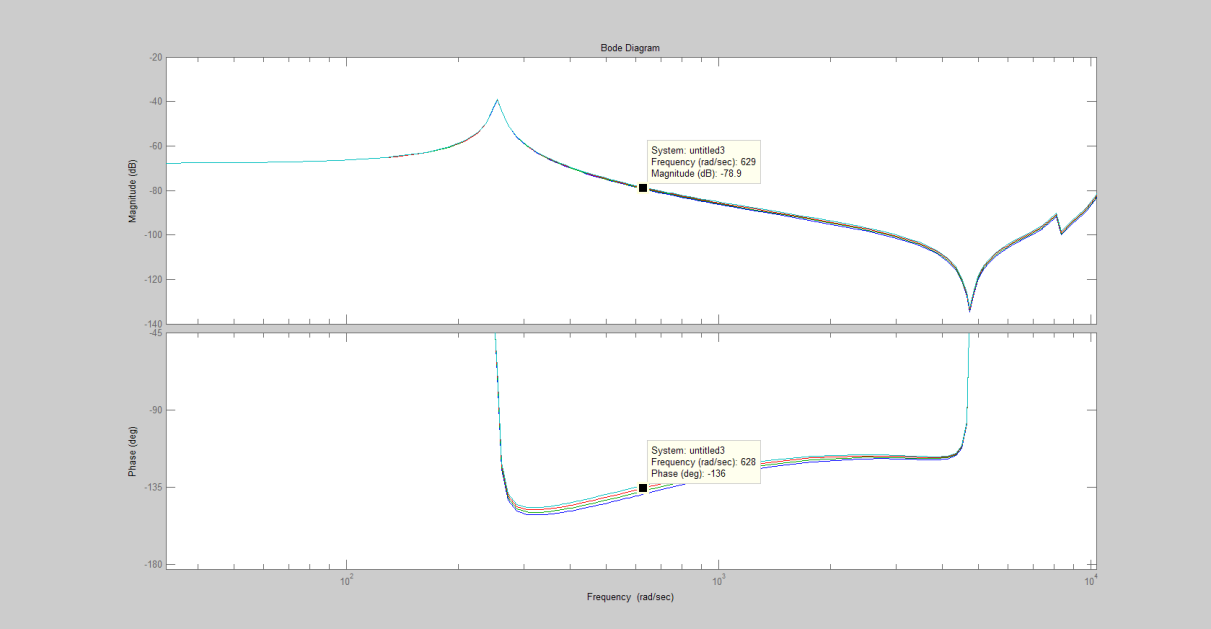


Figure 65 Dimensionnement PD pour 100Hz actuateur central

On remarque donc qu'il faut au minimum un Td de 1.7e-3 pour avoir une marge de 45° pour fonctionner à une fréquence de 100 Hz. Ensuite, il reste à fixer le Kp pour avoir le gain positif, comme on se trouve à -78.9 dB, il faut un Kp minimum de 8810. Il est déconseillé de mettre un gain trop élevé afin d'éviter les risques d'oscillation du système en boucle fermée.

Si l'on veut fonctionner à 300 Hz les valeurs deviennent : Td= 8e-4 et Kp = 87100

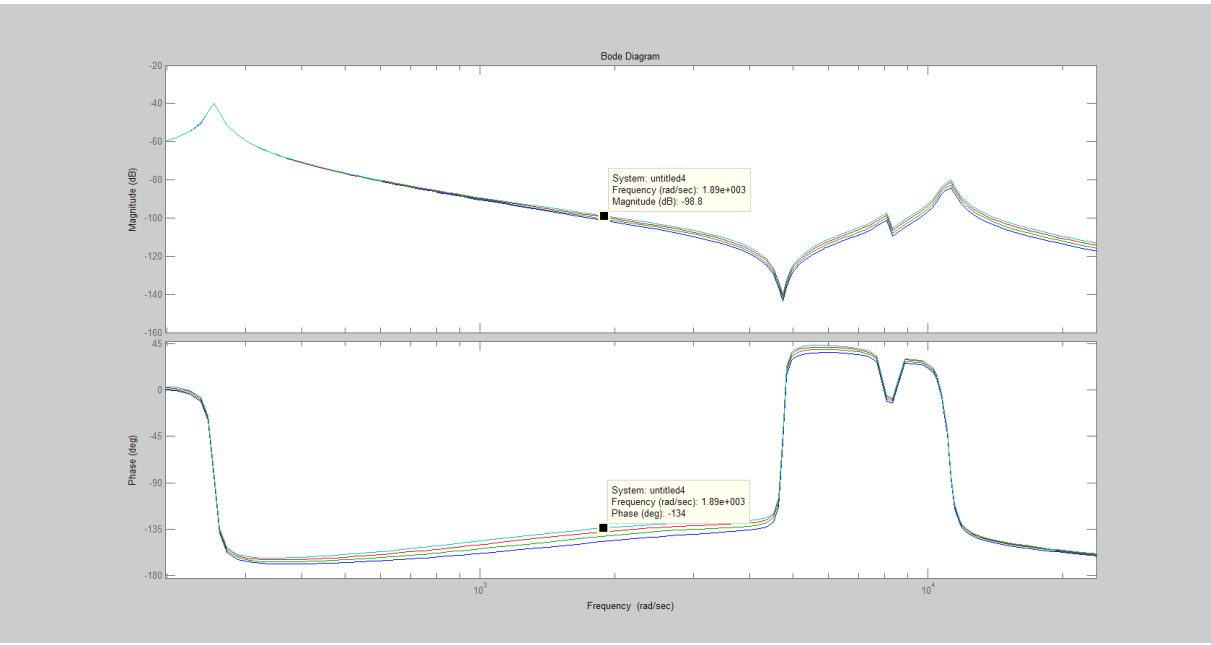


Figure 66 Dimensionnement PD pour 300Hz

Ensuite la valeur du Ti est fixée en fonction de l'erreur statique qui caractérise le système. Théoriquement, on peut lire sur la fonction de transfert le gain en boucle ouverte et l'erreur statique représente le gain du régulateur fois celui du système sur un plus le résultat. Par

conséquent plus le gain du système complet en boucle ouverte est grand moins importante devient l'erreur statique. De plus, puisque la composante intégrale crée une chute de la phase, il faut prendre garde à ce que cette valeur ne soit pas trop élevée afin de ne pas détruire la marge de phase crée par le dérivateur.

Par conséquent si on veut une erreur statique inférieure à 5%, il faudrait multiplier le Kp par un facteur supérieur à 19 et pour maintenir la marge de phase, il ne faudrait pas prendre un Ti supérieur à 1e-4 pour le cas à 100 Hz et 1e-5 pour le cas à 300 Hz. La figure ci-dessous permet de mettre en évidence la l'influence de la constante Ti de l'intégrateur.

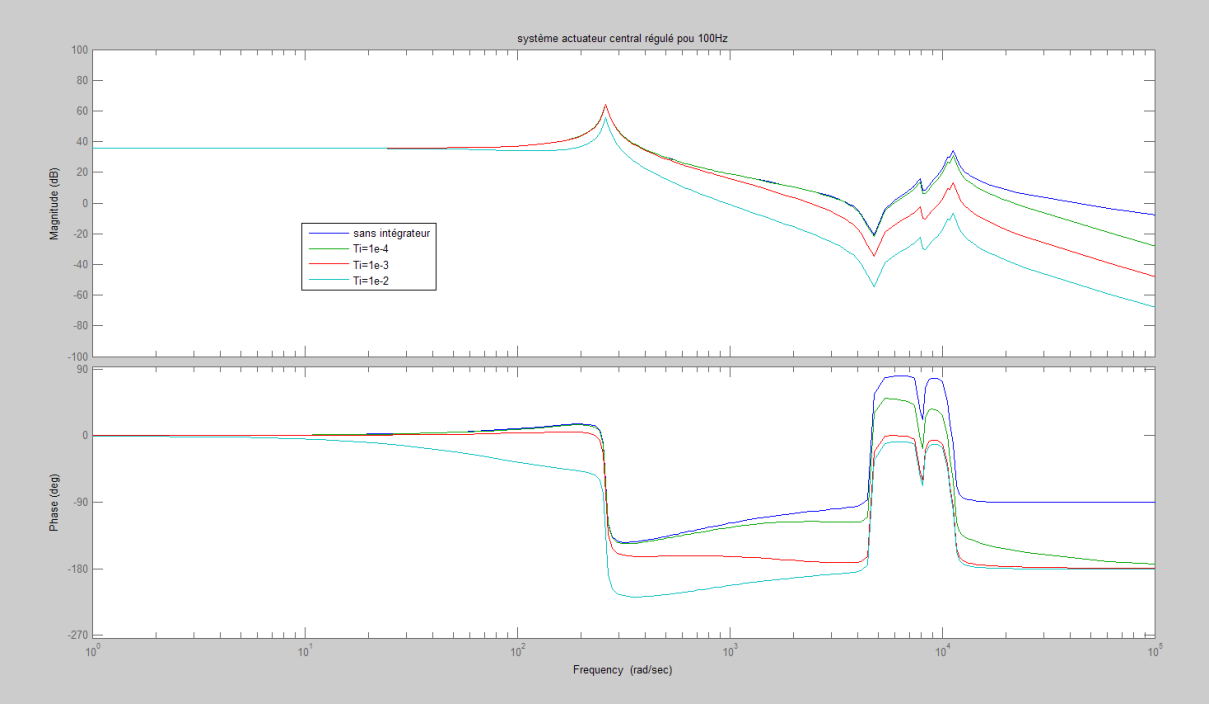


Figure 67 Influence de la valeur du Ti de l'intégrateur

Il reste encore à effectuer la même démarche pour les autres actuateurs. Les résultats sont les suivants : à 100 Hz Td=1.7e-3 Kp = 2430

à 300 Hz Td=8e-4 Kp= 2483

Au niveau du Ti, étant donné que l'on fixe la même marge de phase les valeurs sont identiques. Il en va de même pour la multiplication du Kp car il s'agit également de la même erreur statique.

A présent, on peut contrôler la validité des résultats en testant le système en boucle fermé en visant une erreur statique de 5%.

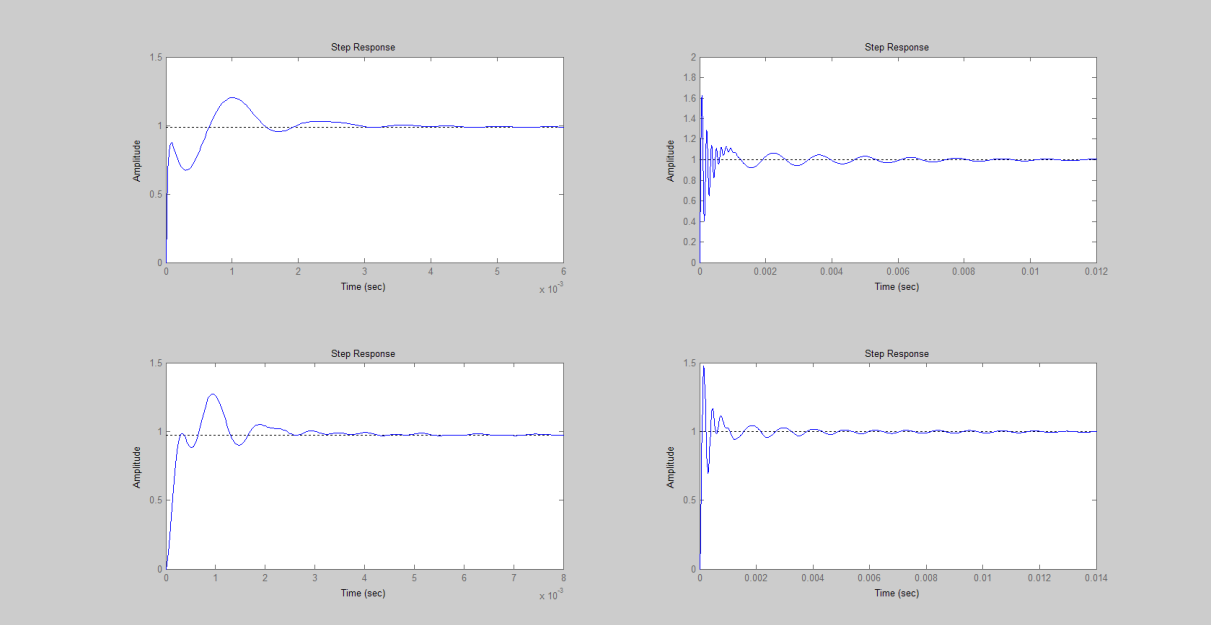


Figure 68 Les graphes de gauche représentent la réponse du système à une fréquence de 100 Hz tandis que ceux de droite à 300 Hz ; les graphes du haut sont associés à l'actuateur central et ceux du bas aux actuateurs extérieurs

12.2 Influence du retard

Cependant cette méthode montre que lorsque le retard devient trop important il n'y a rien à faire même des multiples très élevés il n'est pas possible de récupérer une marge de phase de l'ordre de 45°. Les figures suivantes montrent ceci pour des retards de plus en plus grand.

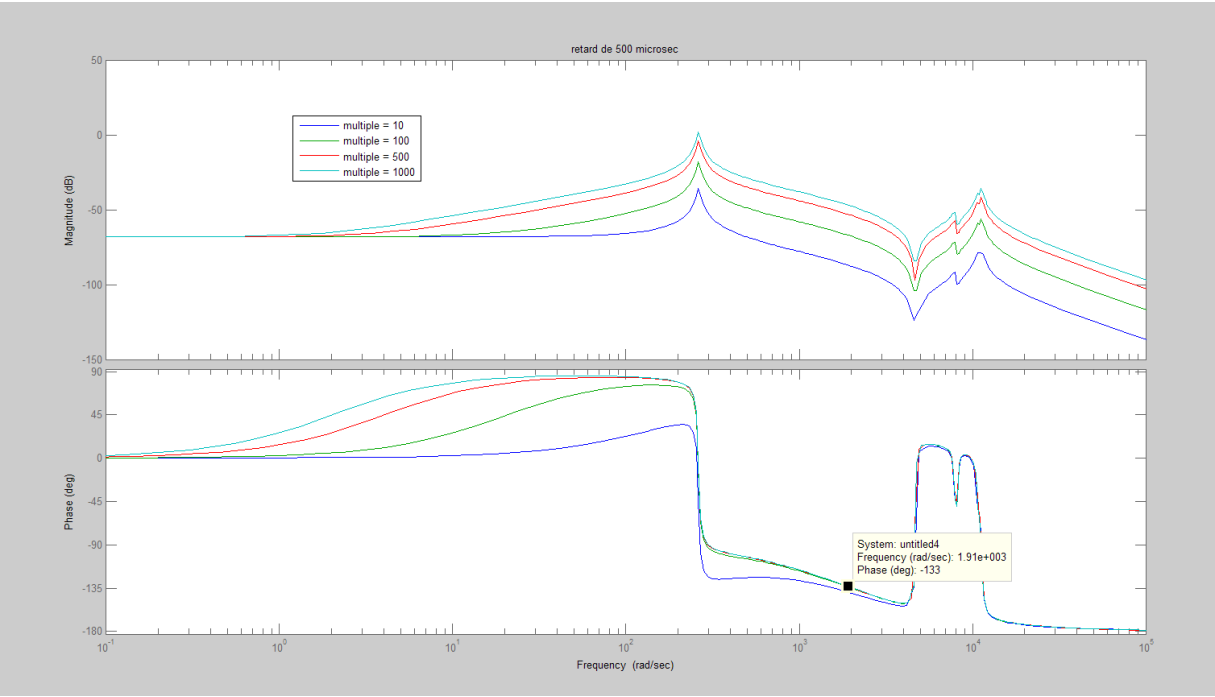


Figure 69 Effet de la multiplication de la somme des retards

Dans le cas de 500 µs, on remarque bien que les grands multiples ne permettent pas de récupérer plus de phase que la limite est de l'ordre d'une trentaine comme le montre la figure suivante.

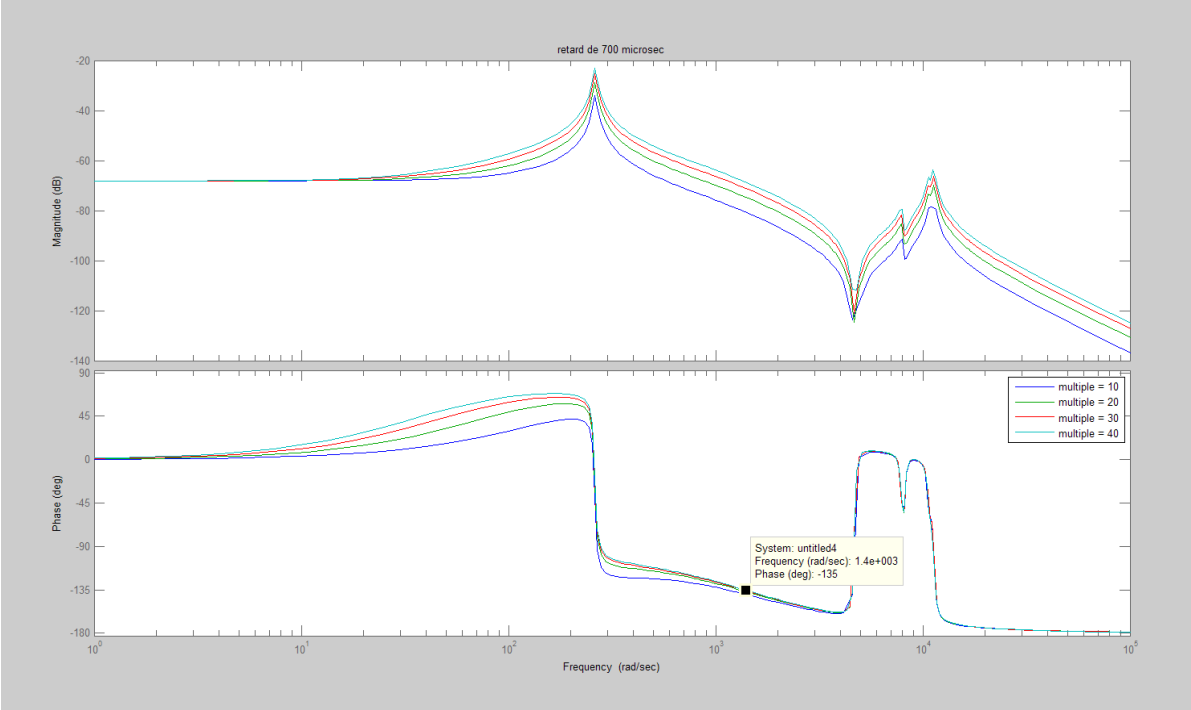


Figure 70 Limitation en cas de retard trop important

On remarque également que dans le cas d'un retard de 700 µs le PID n'arrive déjà plus à remonter la phase pour une fréquence de 300 Hz.

12.3 Régulation avec filtres de compensation

Une alternative au PID serait d'utiliser une méthode avec des filtres de compensation. L'idée est de modifier la fonction de transfert en la multipliant avec des filtres un peu comme le ferait un PID. La seule différence est qu'il est possible d'en mettre autant que nécessaire jusqu'à ce que l'on obtienne la forme désiré de la fonction de transfert. L'intérêt est de pouvoir contrôler les turbulences indépendamment de leur fréquence. Ceci se fait en utilisant trois différents filtres qui sont décrit dans les paragraphes qui suivent. Ils manipulent le système soit en lui donnant une plus grande bande passante, moins d'erreur statique ou améliorant les marges de phase. Cette méthode est inspirée par le contrôle effectué sur le télescope Euro50 présenté dans la thèse de Fredrik Bjöörn et Olof Garpinger.

Les premiers sont conçus dans le but d'augmenter le gain à basse fréquence et sont appelé lag filter. La phase est cependant diminuée dans une certaine gamme de fréquences. Ces deux effets sont illustres sur la figure ci-dessous. Les principaux avantages de ces filtres sont l'augmentation du gain à basses fréquences ce qui permet d'obtenir une plus petite erreur statique. L'inconvénient est que la diminution de la phase pourrait conduire à une plus petite bande passante. Le filtre a la fonction de transfert suivante :

$$G(s) = \frac{s+a}{s+\frac{a}{M}} \qquad \text{où} \qquad M > 1$$

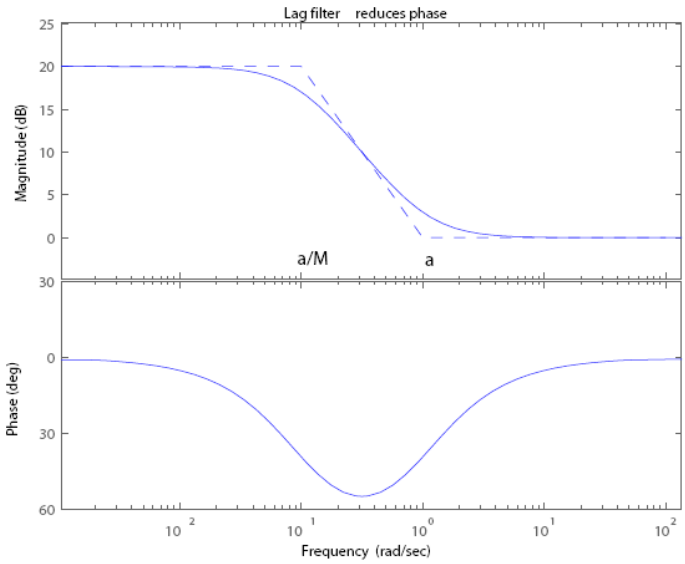


Figure 71 Effet Lag filter

Dès que le paramètre M est supérieur à un, la première fréquence de coupure apparaît à une pulsation égale à a/M et la seconde à a rad/s. La valeur a est choisie de telle sorte que la phase à la fréquence ω ne soit pas trop diminuée. En général, la ω est la fréquence de coupure, mais si le diagramme de Bode contient plusieurs fréquences de coupure comme dans le cas du système heads il a été choisi avec un grand soin tout au long de cette thèse. Une règle de base est de choisir a = 0.1ω, ce qui crée une diminution de la phase maximum

de 6 degrés à ω. Un facteur M élevé donne une faible erreur statique, car il s'agit en même temps du gain statique du filtre.

Le second type de filtre est conçu pour augmenter à la fois la phase et l'amplitude à la fréquence de coupure (voir figure ci-dessous). Ils sont appelés lead filter. La fonction de transfert pour ces filtres est de la forme :

$$G(s) = K_p \cdot N \cdot \frac{s + b}{s + b \cdot N}$$

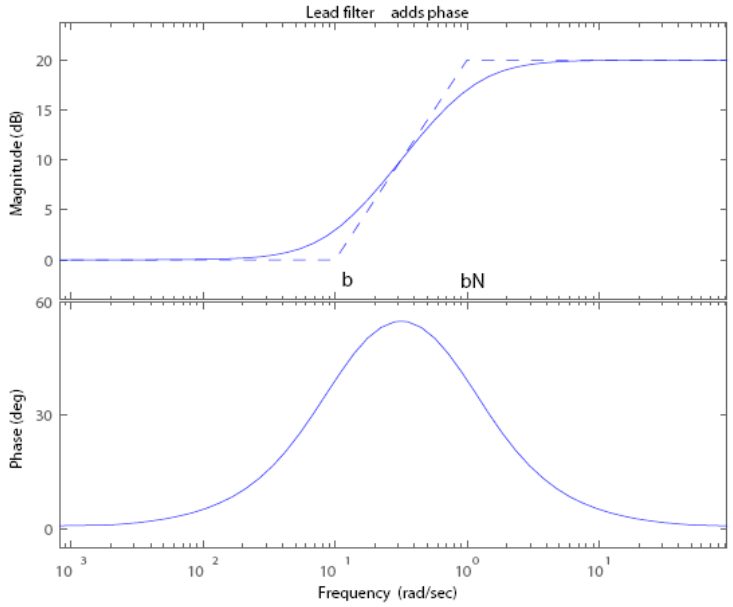


Figure 72 Effet Lead filter

Un zéro à la fréquence b rad/s force la phase à augmenter et un pôle à bN rad/s (N> 1) la fait redescendre. Le gain maximum de phase qui peut être atteint est 90°. Comme on l'a dit, ces filtres sont souvent utilisés afin d'augmenter la phase lors de fréquence de coupure, mais en introduisant un tel filtre on augmente aussi le gain à des fréquences plus élevées. Ceci est une qualité qui est parfois difficile à traiter s'il y a du bruit à haute fréquence dans le processus.

Finalement, un filtre passe-bande est utilisé pour augmenter le gain de certaines fréquences. Comme les modèles et la réalité ne correspondent forcément, il peut être dangereux d'annuler des pôles à des fréquences spécifiques et donc il est déconseiller d'utiliser une large bande passante. En général il est recommander d'utiliser de multiples filtres passe bande située à côté de l'autre. La fonction de transfert d'un tel filtre est :

$$G(s) = \frac{s + \omega^2}{s^2 + 2 \cdot \zeta \cdot \omega \cdot s + \omega^2}$$

La figure suivante montre le tracé du diagramme de Bode d'un tel filtre. Afin de réaliser un passe-bande efficace, le facteur d'amortissement ζ, ne doit pas être choisi trop petit. Cela devrait, toutefois être mis en balance avec le fait qu'un coefficient d'amortissement proche de 1 donne un faible gain et que l'effet positive du filtre vont par conséquent disparaître.

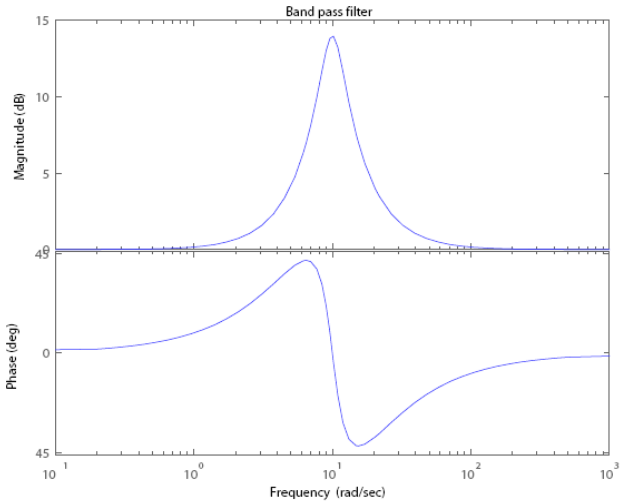


Figure 73 Effet passe-bande

L'avantage de cette méthode est de pouvoir rendre le système stable sur une grande gamme de fréquence. De plus si le système contient plusieurs grands retards elle permet théoriquement en superposant les filtres au même endroit. En l'appliquant à notre cas, on obtient les résultats suivants.

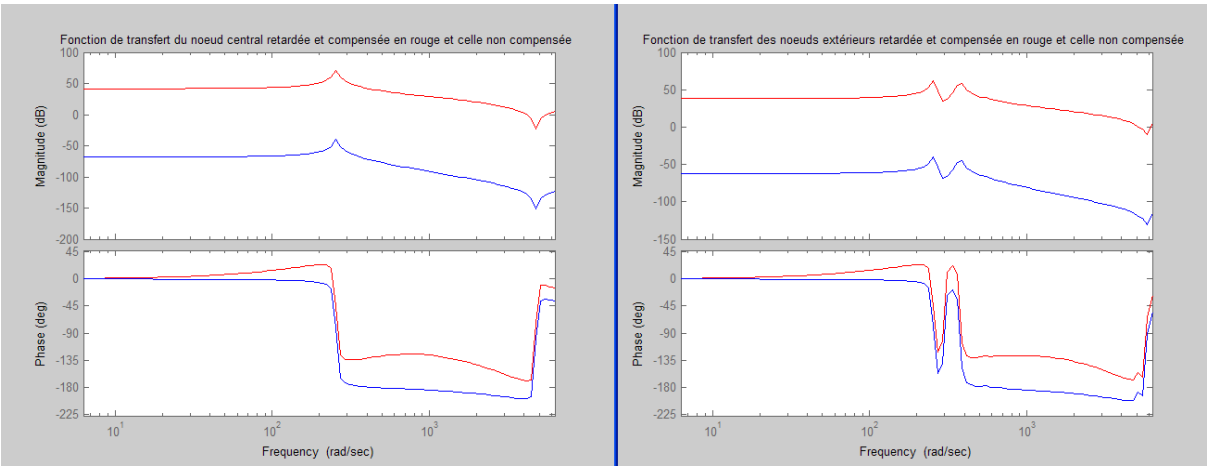


Figure 74 Modification de la fonction de transfert avec les filtres de compensation

Le principal avantage par rapport au dimensionnement PID fait précédemment est que la pente du gain sur la zone utile a été grandement diminuée. En prenant un peu plus de temps il serait possible diminuer encore plus les pic présent sur le diagramme de Bode. Cependant, avec une telle fonction de transfert le résultat sont déjà très bon.

Les filtres utilisés sont les suivants :

Pour l'actuateur central $\frac{500000 \cdot s + 2.5 \cdot 10^8}{s + 2500}$ et $\frac{6 \cdot s + 2400}{s + 800}$

Pour les actuateurs extérieurs $\frac{30 \cdot s + 18000}{s + 1800}$, $\frac{11.92 \cdot s + 3100}{s + 310}$, $\frac{1400 \cdot s + 490000}{s + 490}$,

$\frac{1.5 \cdot s + 2700}{s + 2700}$ et $\frac{1.5 \cdot s + 3000}{s + 3000}$

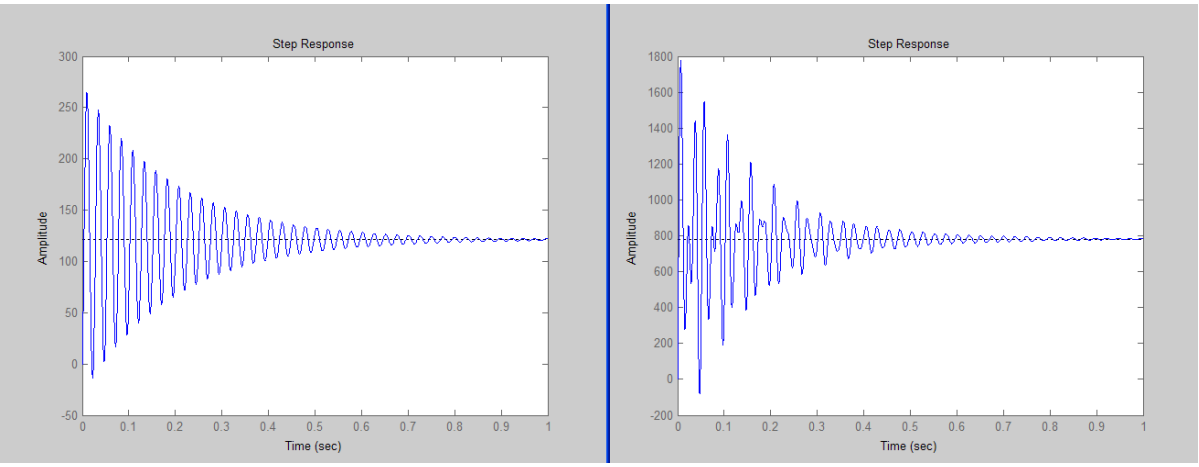


Figure 75 Réponse à un saut indiciel sans retard système en boucle ouverte

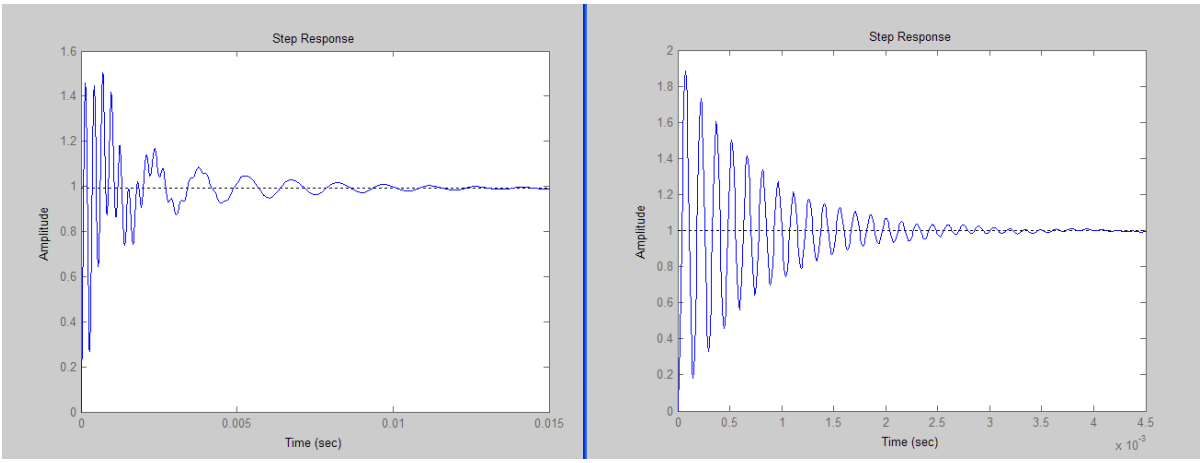


Figure 76 Réponse à un saut indiciel sans retard système en boucle fermée

Les tests en tenant compte des retards se feront dans la partie suivante : simulation.

13 Simulation dynamique

Pour la simulation, nous travaillons sous l'environnement Matlab Simulink qui permet de dissocier dans le simulateur des entités indépendantes. Chaque entité est définie graphiquement par un objet, elle est reliée aux autres entités par des relations d'entées-sorites. Ce mode de programmation très visuel est parfaitement adapté à l'objectif de modularité recherché, le but étant de disposer d'un outil qui puisse intégrer les différents modèles obtenus au fur et à mesure de leurs évolutions.

La réponse dynamique correspond à la réaction du système face à une excitation. Le but étant d'avoir un système stable qui réagit très rapidement (de l'ordre de la dizaine de milliseconde).

L'analyse dynamique calcule la réponse de la structure en cumulant les contributions des différents modes.

Dans notre cas, la déformation est divisée en différente contribution due à chaque mode propre. Cette décomposition est appelée décomposition en mode de Zernike. Par conséquent la déformation du front d'onde est donc décomposée, puis chaque contribution arrive sur son régulateur attitré.

Le résultat obtenu sur Matlab sont donc traité avec Simulink. Dans un premier temps, la régulation se fait à l'aide de simples PID associé à une commande à priori du genre K* u_consigne, où K est la matrice de rigidité et u le déplacement de consigne. Ensuite, la version avec les filtres de compensation va être mise en place.

13.1 Simulation PID

Dans un premier temps il modèle se fait à l'aide d'un système en s ce qui signifie que le temps est continue. Cependant dans le modèle réel le traitement des données se fait à l'aide d'un DSP qui fonctionne de façon numérique. Par conséquent, un premier modèle était continue et une fois que les résultats était jugé suffisant il fut compliqué en y ajoutant les retard lié au traitement de l'information. Le but étant de garder une poursuite de la consigne la plus rapide possible tout en incluant les retards du système. La consigne est un sinus il a été estimé que ce signal était plus proche de la consigne réelle.

13.1.1 Dimensionnement Matlab

Il faut noter que le PID est implémenté de la façon suivante dans Matlab

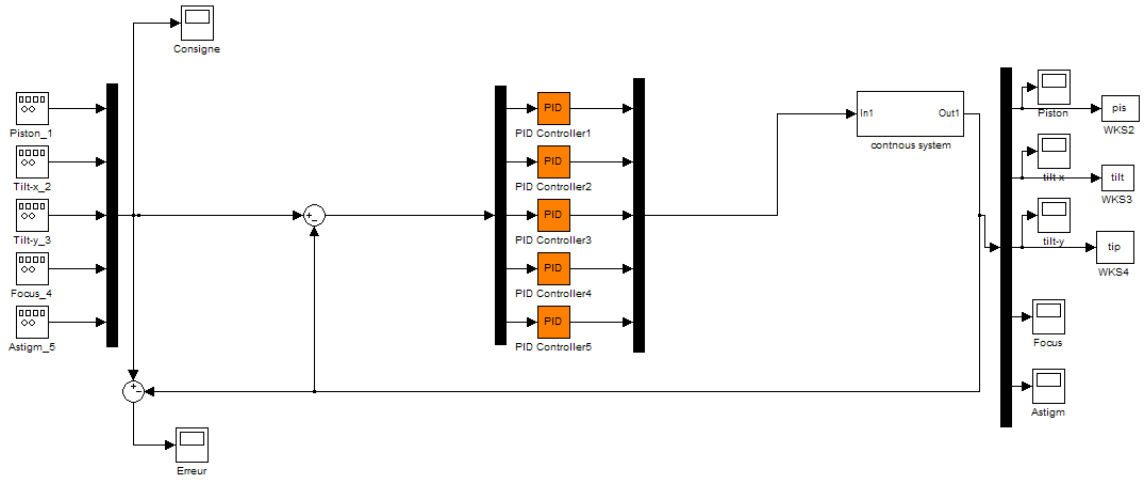
$$U(s) = Kp \cdot (1 + \frac{1}{s \cdot T_i} + s \cdot T_d) \cdot E(s)$$

Ceci dans le but pouvoir régler d'abord la phase avec une Kp de 1 et d'ajuster ensuite le gain du diagramme de Bode en modifiant ce Kp. Cependant dans Simulink les régulateurs sont organisés de façon légèrement différente :

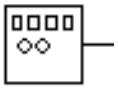
$U(s) = (Kp_2 + \frac{1}{s} \cdot T_{i_2} + s \cdot T_{d_2}) \cdot E(s)$

Par conséquent : $K_{p_2} = K_p$ $\quad T_{i_2} = \frac{K_p}{T_i}$ $\quad T_{d_2} = K_p \cdot T_d$

Le modèle de base sur Simulink est le suivant :



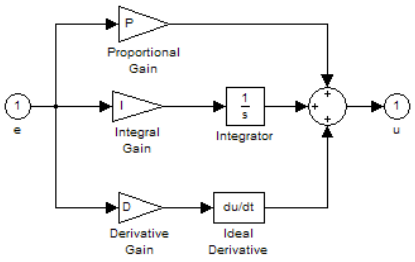
Les consignes sont données par les bloques suivant :



Ils permettent de choisir un signal d'entrée et le fixé la fréquence voulue

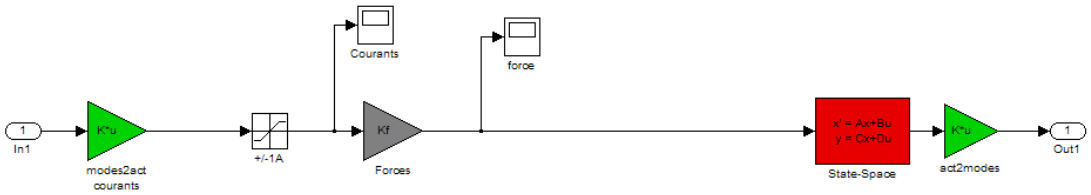
Les scopes permettent de contrôler les résultats sans avoir à passer par Matlab, toutefois certains sont tout de même envoyés vers le workspace, par le biais des bloques dont le nom commence par WKS.

Les PID contiennent l'implémentation décrite auparavant, le schéma est le suivant :



Finalement l'emploi des bloques Mux et Demux permettent de faire passer plusieurs signal sur le même « câble ». Ils correspondent à des multiplexeurs. Dans le modèle, ils sont nécessaires car la fonction de transfert doit recevoir les 5 signaux à la fois.

La fonction de transfert est contenu dans le sous-système « continous system ». La figure suivante décrit ce qu'elle contient.



Les bloques verts correspondent aux matrices de passage des modes vers les actuateurs et inversement. La matrice modes2act a été présentée précédemment et act2modes est son inverse.

Le bloque gris représente le coefficient de transfert entre le courant et les forces. Il a été fixé à 0.5.

Il reste un bloque de saturation qui limite de courant à 1 A d'amplitude, par conséquent la force est limité à 0.5N d'amplitude.

Finalement, le bloque rouge contient la fonction de transfert calculé par heads_lti sous forme d'espace d'état.

Il est important de noter que la saturation a pour but de mettre en évidence si les courants demandé sont trop important, normalement le but est d'éviter d'entrer en saturation pour ne pas devenir non-linéaire.

La simulation donne les résultats suivants sans la saturation:

Signal d'entrée : sinus de 100 Hz avec amplitude de 100 microns pour les trois premiers modes ; même fréquence pour le focus mais 0.6 micron d'amplitude, idem pour l'astigmatisme mais 7 microns d'amplitude.

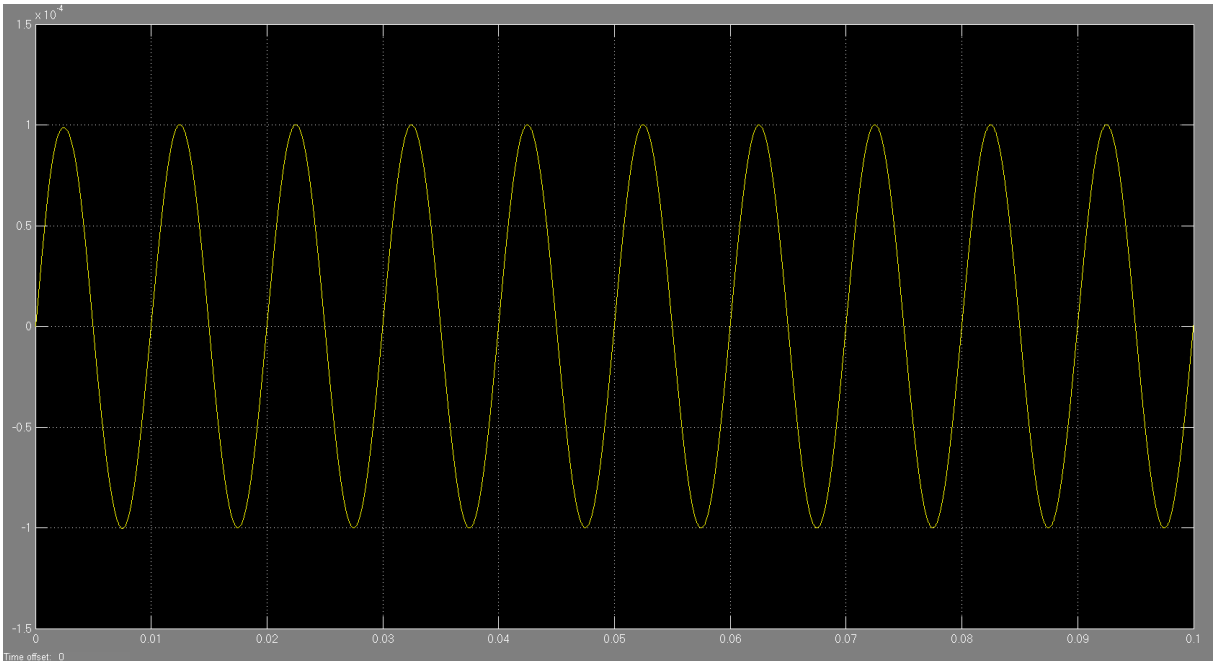


Figure 77 Résultat parfait pour le piston les tilts et l'astigmatisme

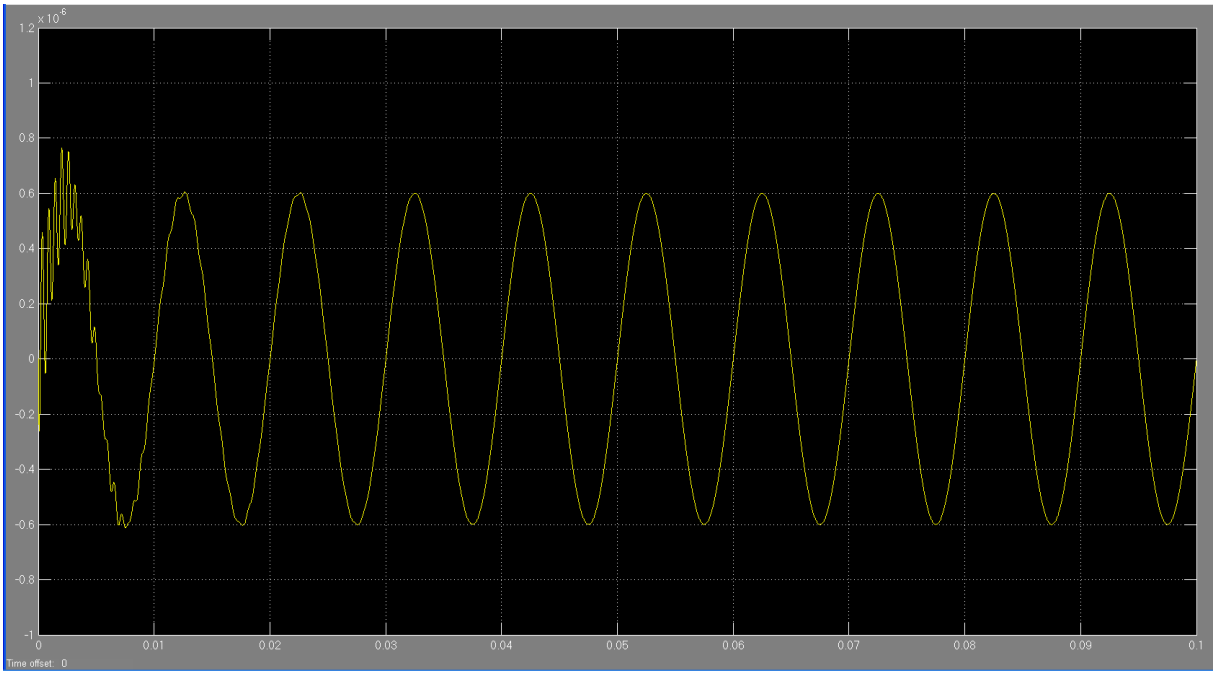


Figure 78 Défaut au départ sur le focus mais fini par suivre

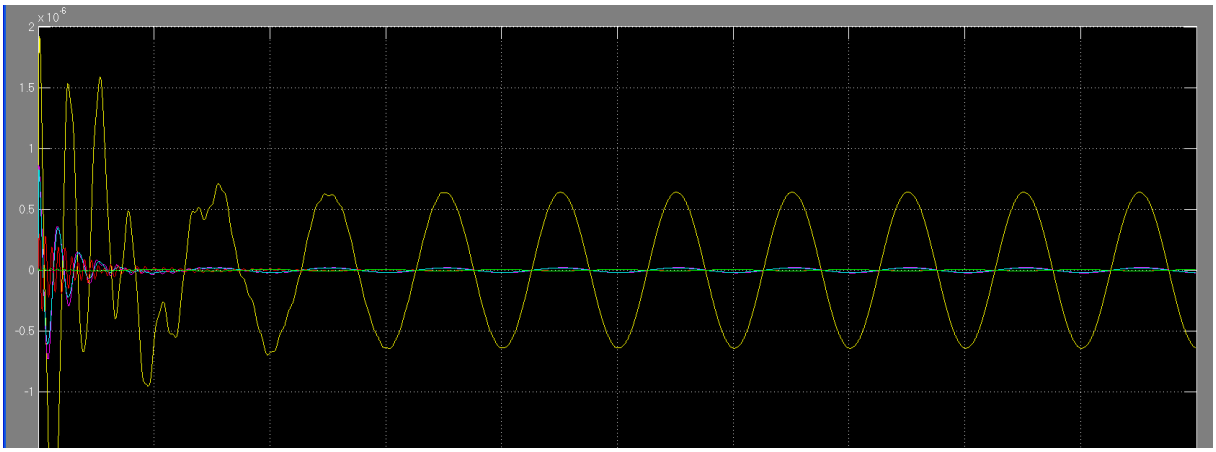


Figure 79 Erreur des différents modes

Sur la figure, on remarque le l'erreur est inférieur à 1e-6 pour le piston sur une consigne de 1e-4. Par conséquent, on est à moins 1% d'erreur statique pour les 3 premiers modes.

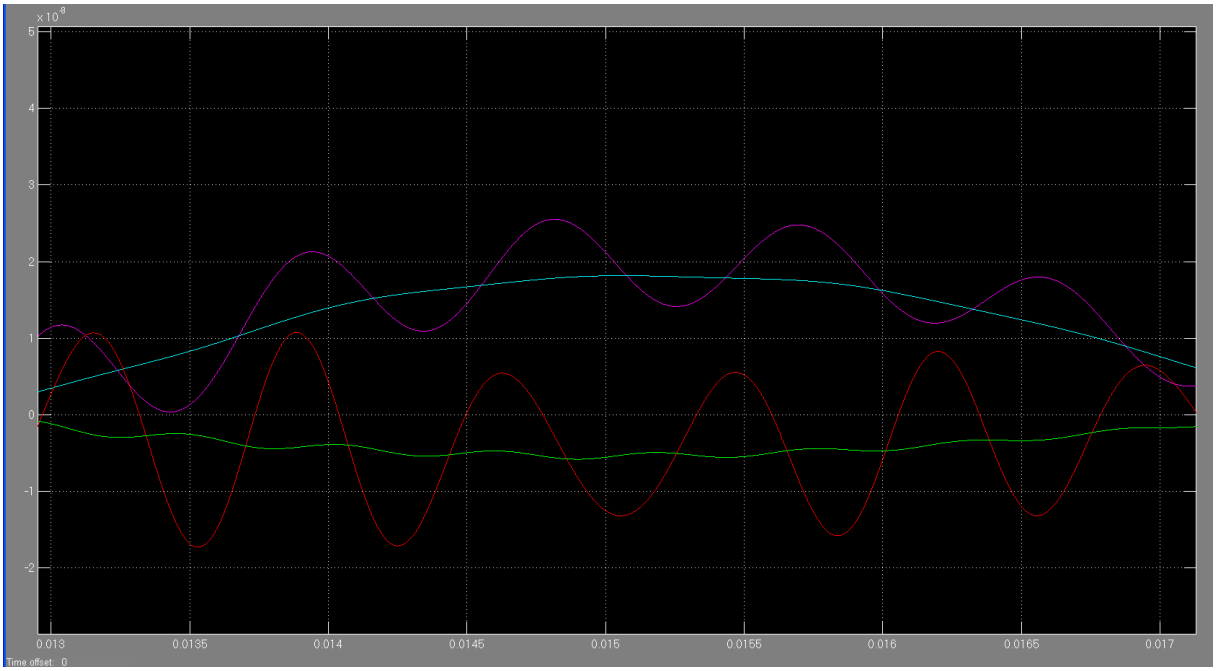


Figure 80 Zoom sur l'erreur des derniers modes

Les traces verte et rouge représentent l'astigmatisme et le focus, les deux autres les tilts. On remarque que les erreurs statiques sont supérieures mais restent tout à fait tolérable. Pour le focus, elle est inférieur à 2e-8 sur une consigne de 6e-7, soit 3.3% d'erreur. Pour l'astigmatisme, la consigne est supérieure et l'erreur inférieure, donc l'erreur max est sur le focus. Cependant ces résultats ne tiennent pas compte de la saturation, par conséquent si l'on refait la simulation en en tenant compte. On obtient :

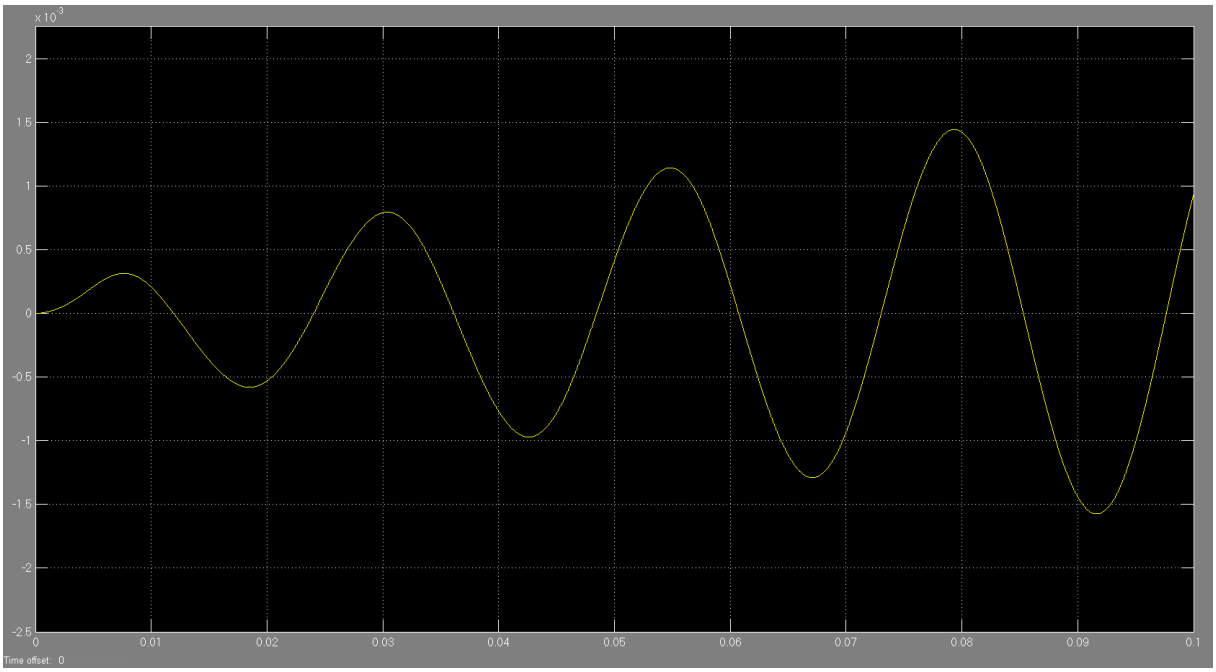


Figure 81 Type de résultat obtenu avec la saturation (exemple du piston)

Ces défauts s'expliquent en raison de l'incapacité de fournir la force nécessaire. La figure suivante met en évidence les forces appliquées après la stabilisation avec en sans saturation.

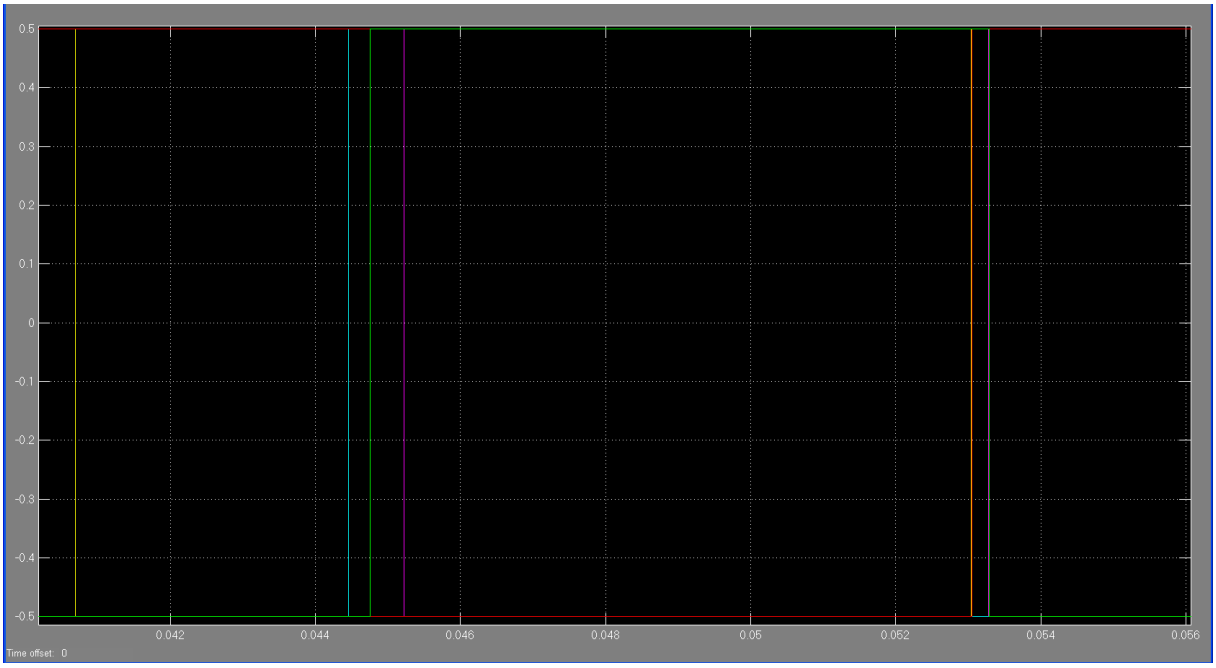


Figure 82 Etat des forces avec la saturation

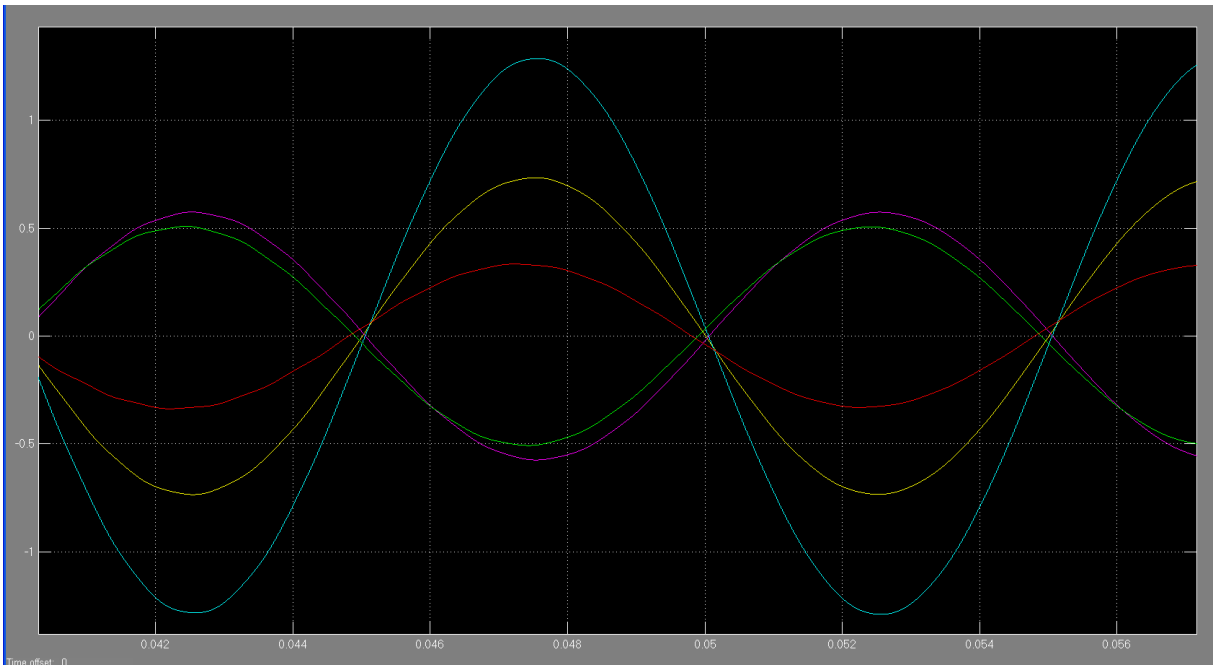


Figure 83 Comportement des force sans la saturation

La saturation entraîne une force limitée à 0.5 N d'amplitude. Par conséquent, il faut diminuer l'amplitude des signaux afin d'éviter la saturation. On remarque que si l'on diminue d'un facteur 10 les trois premiers modes soit un passage de 100 à 10 microns et l'on diminue de moitié l'amplitude du défocus le système n'entre plus en saturation.

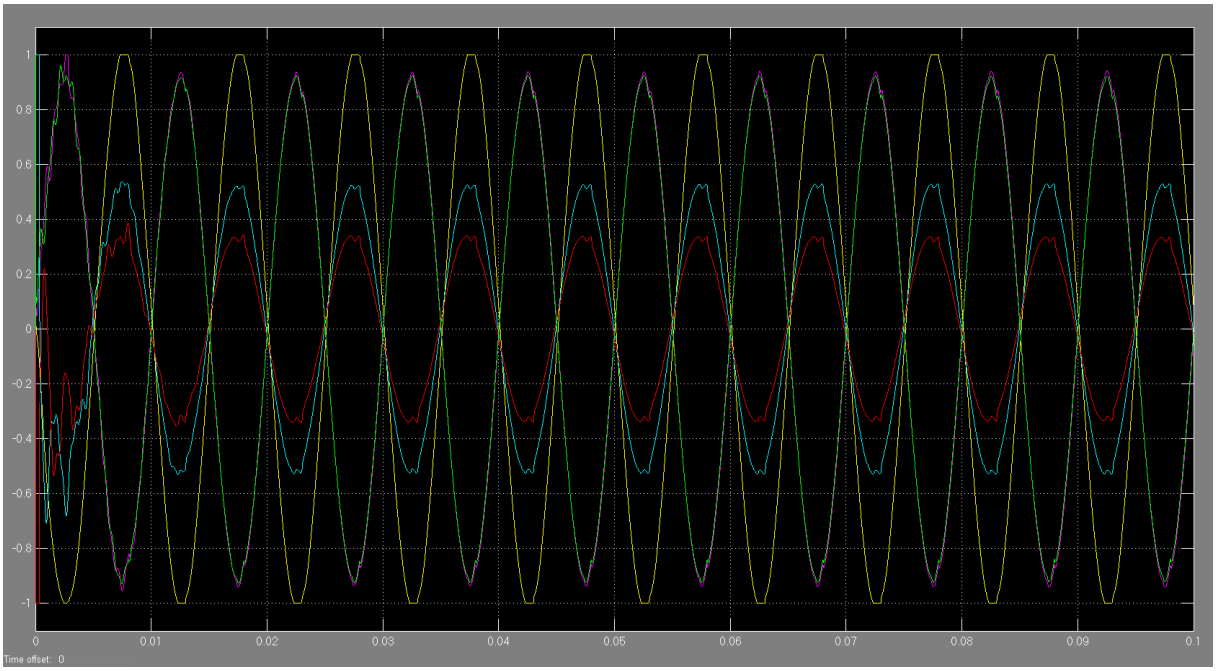


Figure 84 Diminution des amplitudes pour avoir des forces corrects

Avec cette diminution, on remarque que le système n'entre plus en saturation, hors mis le piston. Il est intéressant de noter que si l'on augmente l'amplitude d'un des autres modes et

qu'il entre en saturation, cela entraine une réaction en chaine et tout le système se met à diverger.

Une légère augmentation peut laisser le système stable, les consignes deviennent :

15micron pour le tilt-x et 13 pour le tilt-y pour une fréquence de 100 Hz

Si l'on augmente la fréquence le résultat est pire encore les pentes de la monté et de la descente seront plus important, ce qui nécessitera plus de force et donc une entrée en saturation et aucun résultat probant.

Une alternative serait de diminuer les gains afin d'éviter l'entrée en saturation, mais cela diminue la rapidité du système. Les résultats sont les suivants ne donnent rien d'intéressant à nouveau car de toute façon les forces nécessaires pour obtenir un déplacement restent identique.

A présent si l'on intègre un retard, les forces restent identiques mais la poursuite de la consigne se détériore, comme le montre les résultats suivants :

Retard de 5 µs avec les consignes maximum acceptables sans saturation :

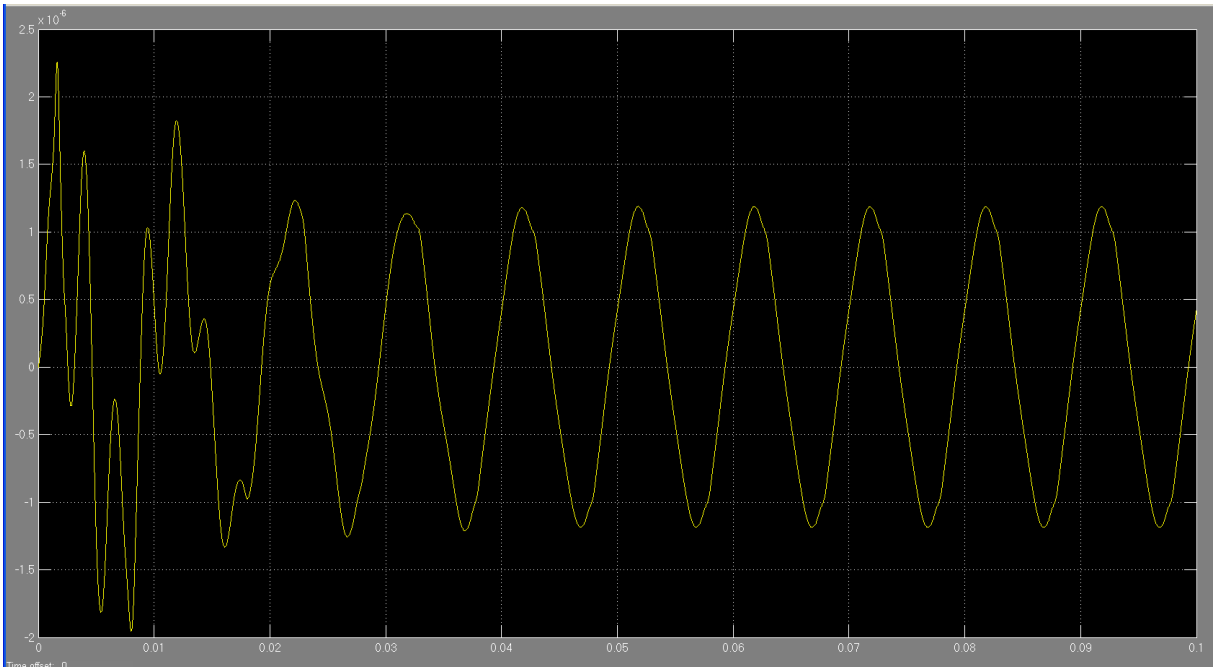


Figure 85 Résultat pour le piston

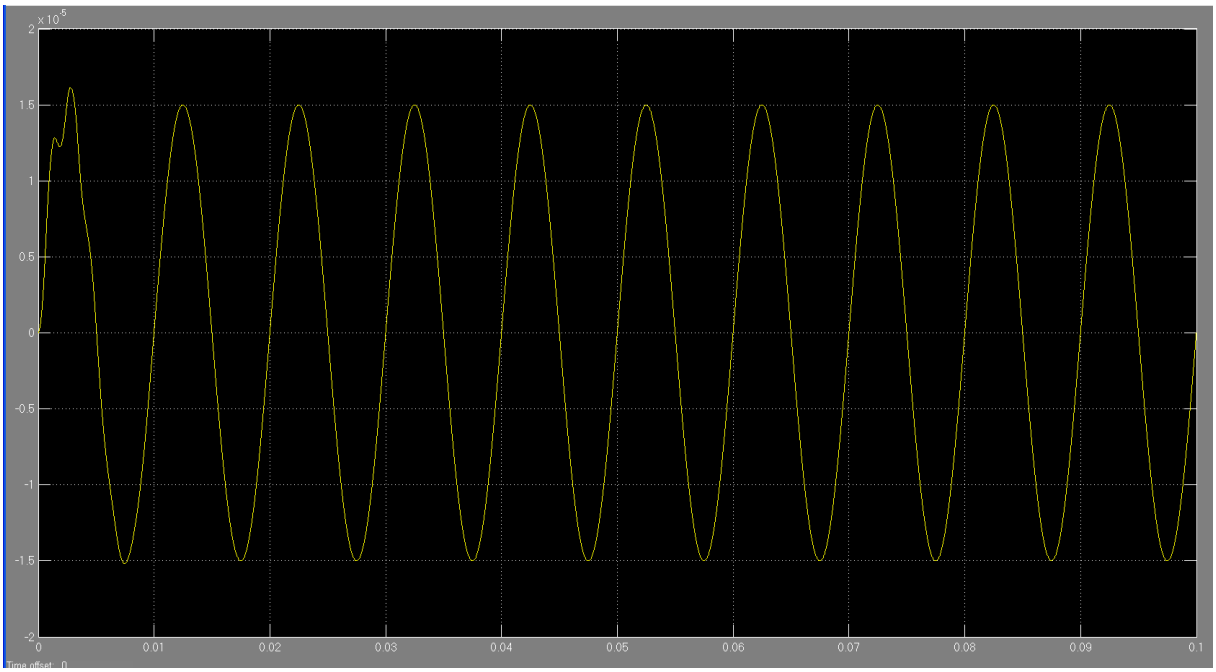


Figure 86 Résultat pour le tilt-x

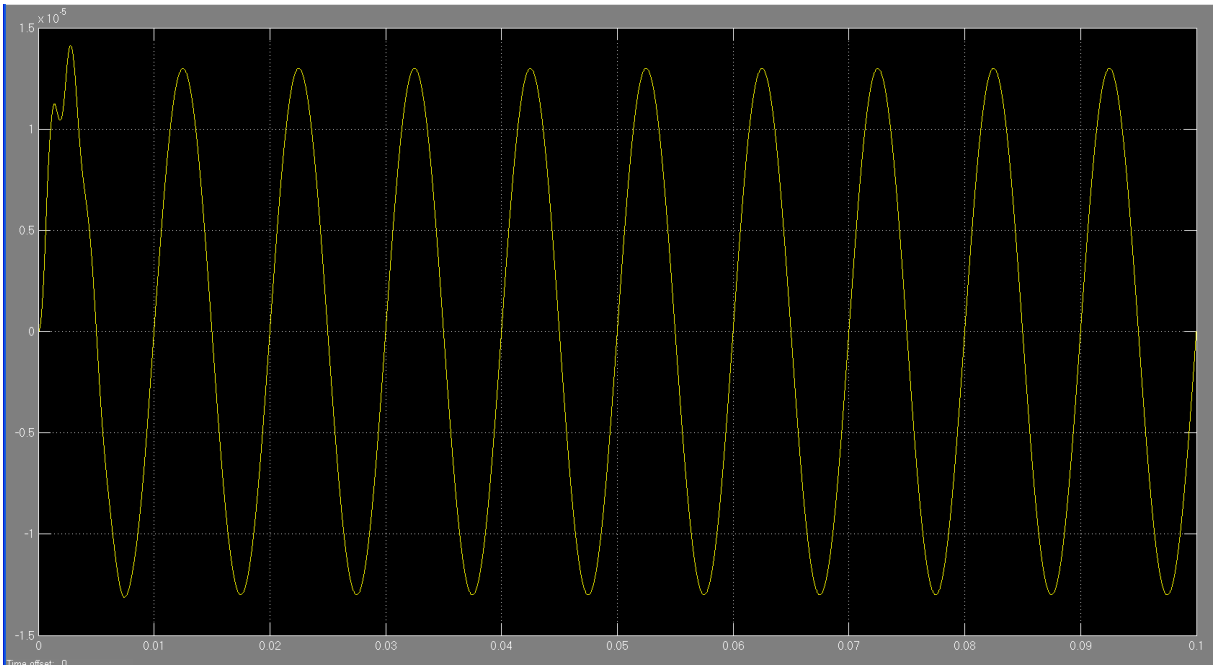


Figure 87 Résultat pour le tilt-y

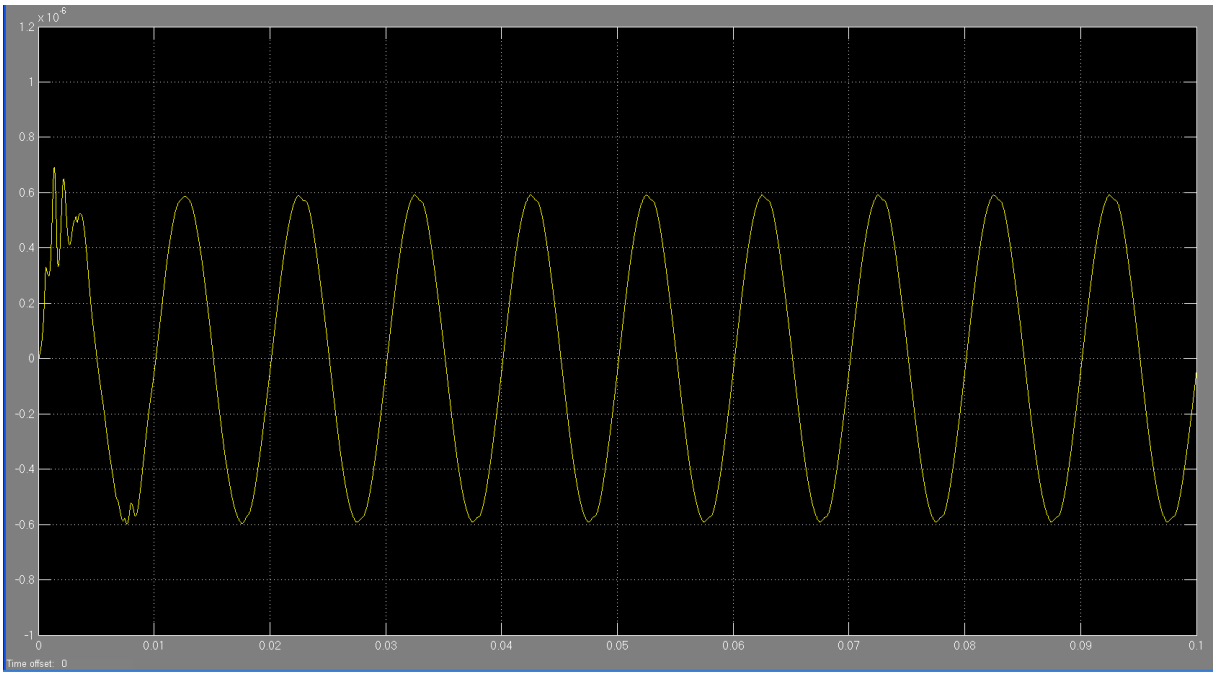


Figure 88 Résultat pour le défocus

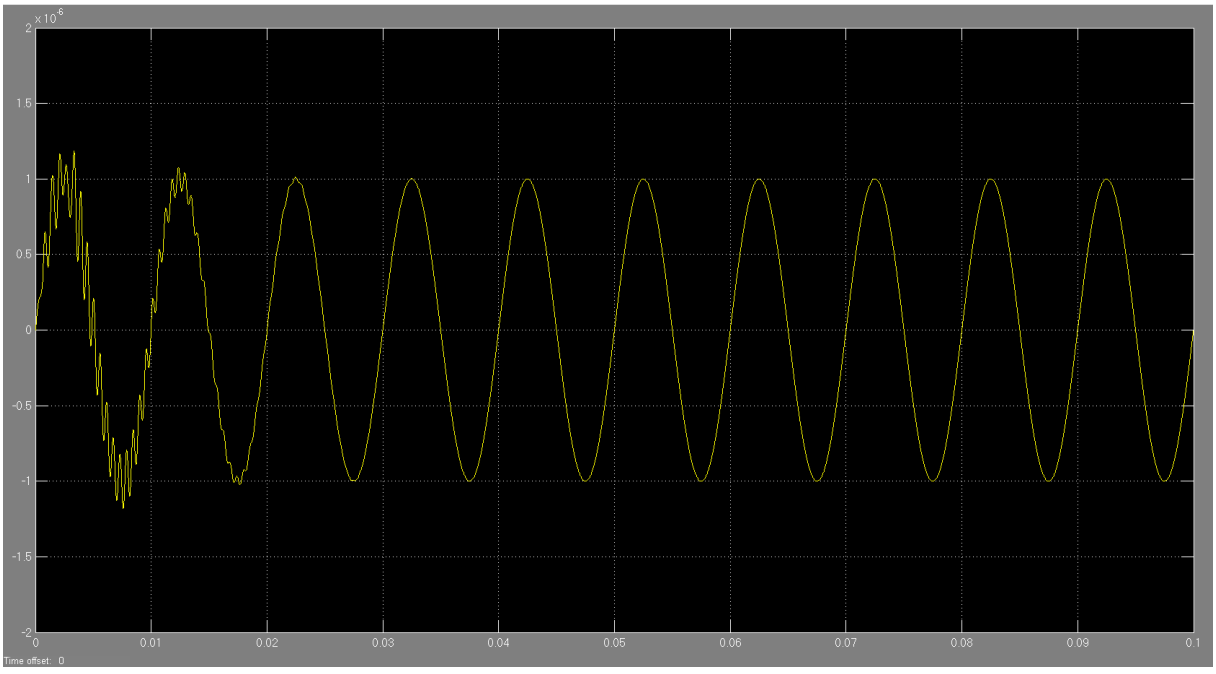
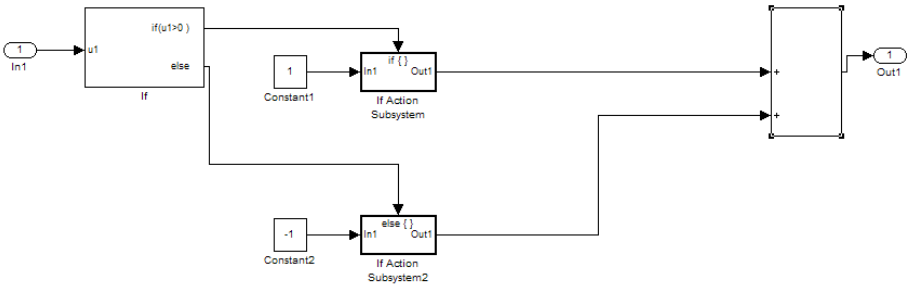


Figure 89 Résultat pour l'astigmatisme

Les résultats restent semblables pour un retard allant jusqu'à 8 µs, ensuite le système diverge.

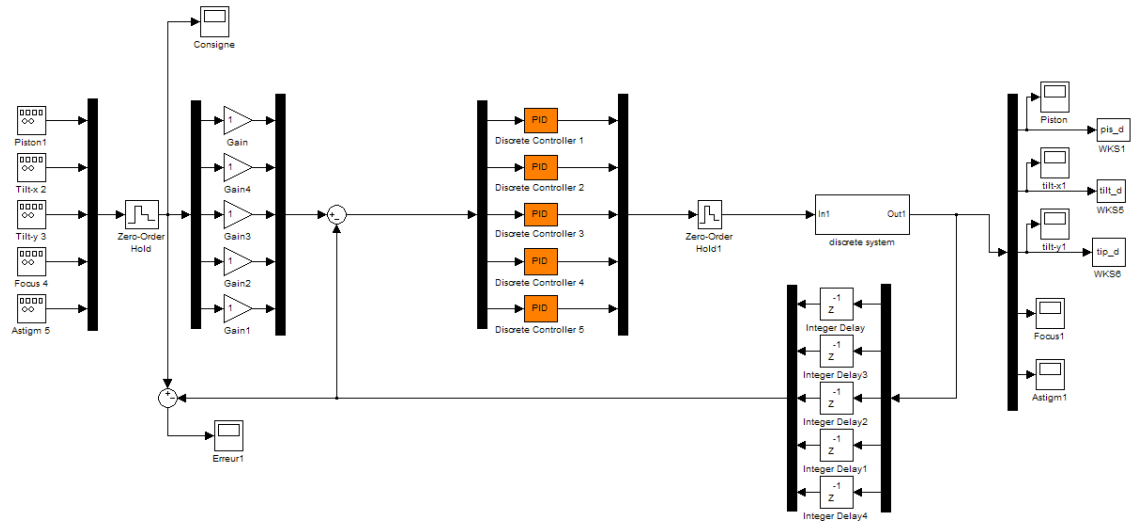
Une alternative afin de limiter les problèmes dus à la saturation serait d'intégrer la dérivée de la consigne dans la commande de la saturation. Ceci afin de faire un changement de la commande en fonction de la pente de la consigne et non attendre de sortir de la saturation.



Si l'on laisse les consignes à 100 microns, ceci apporte une légère amélioration mais les résultats restent mauvais.

13.2 Système discret

Le modèle de base reste le même, mais faut ajouter une discrétisation de la consigne et passer de la fonction de transfert du domaine continu vers celui discret. La période d'échantillonnage est de 1e-6 [s]. Le modèle devient :



Sur ce modèle un gain sur la consigne a été ajouté afin de tenter de corriger les signaux de sortie étant stable mais dont l'amplitude n'était pas parfaite.

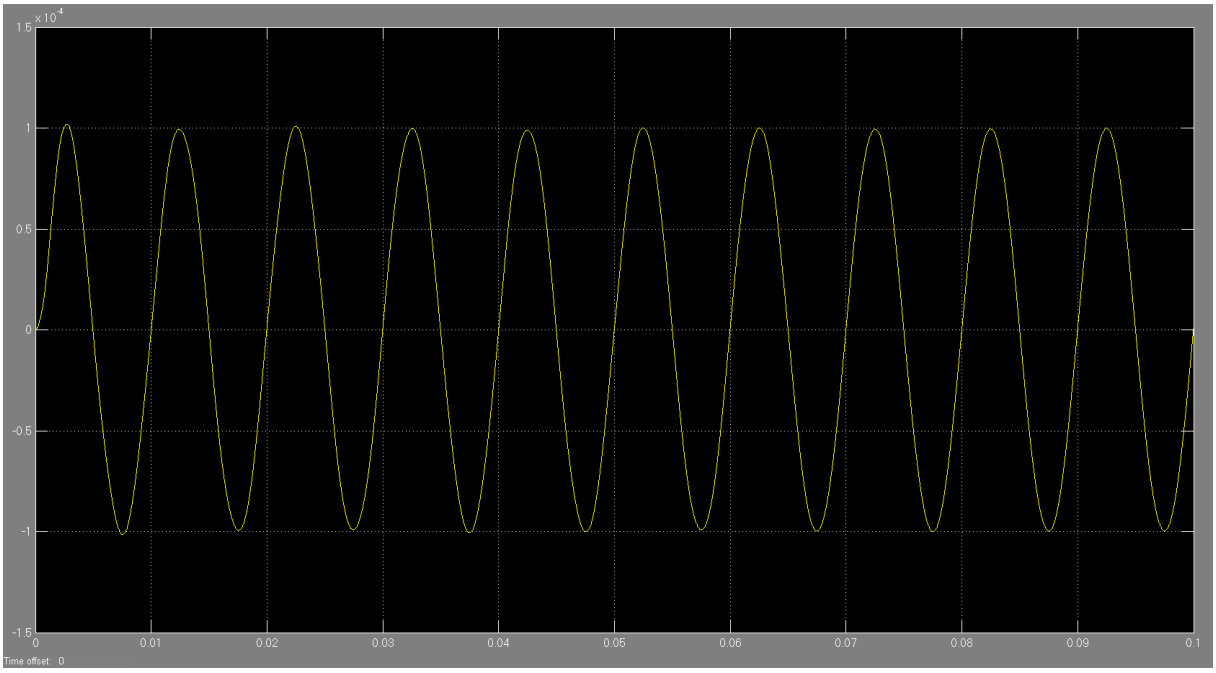


Figure 90 Résultat piston

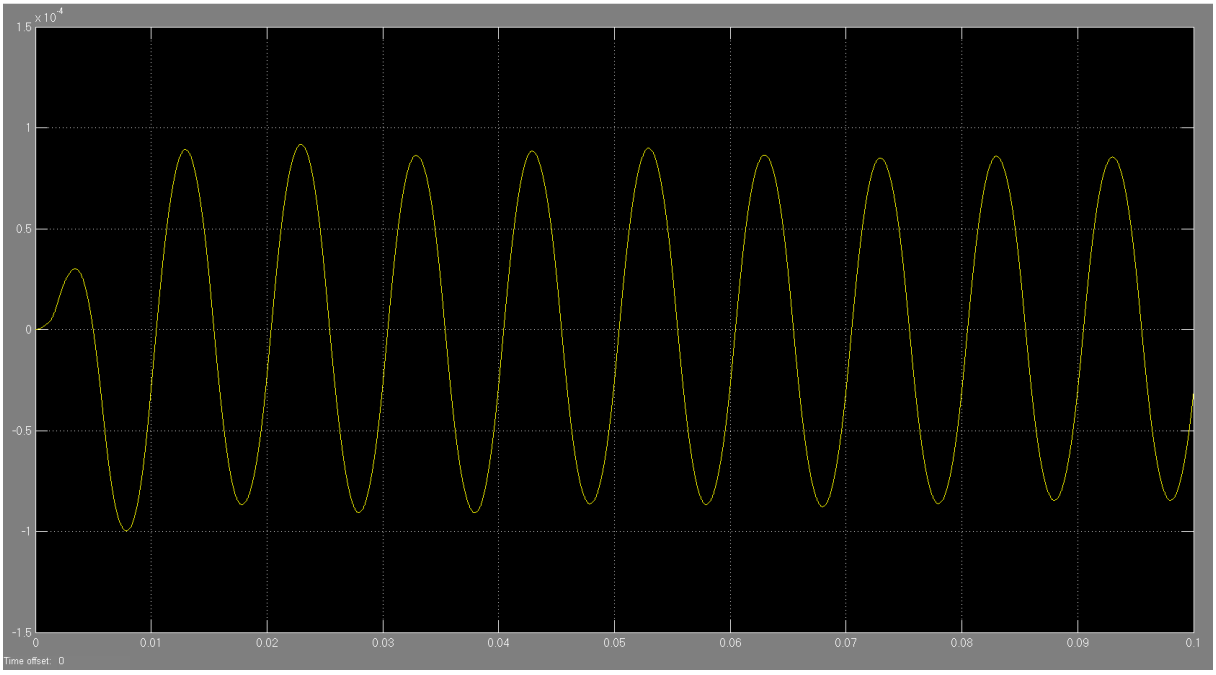


Figure 91 Résultat tilt-x

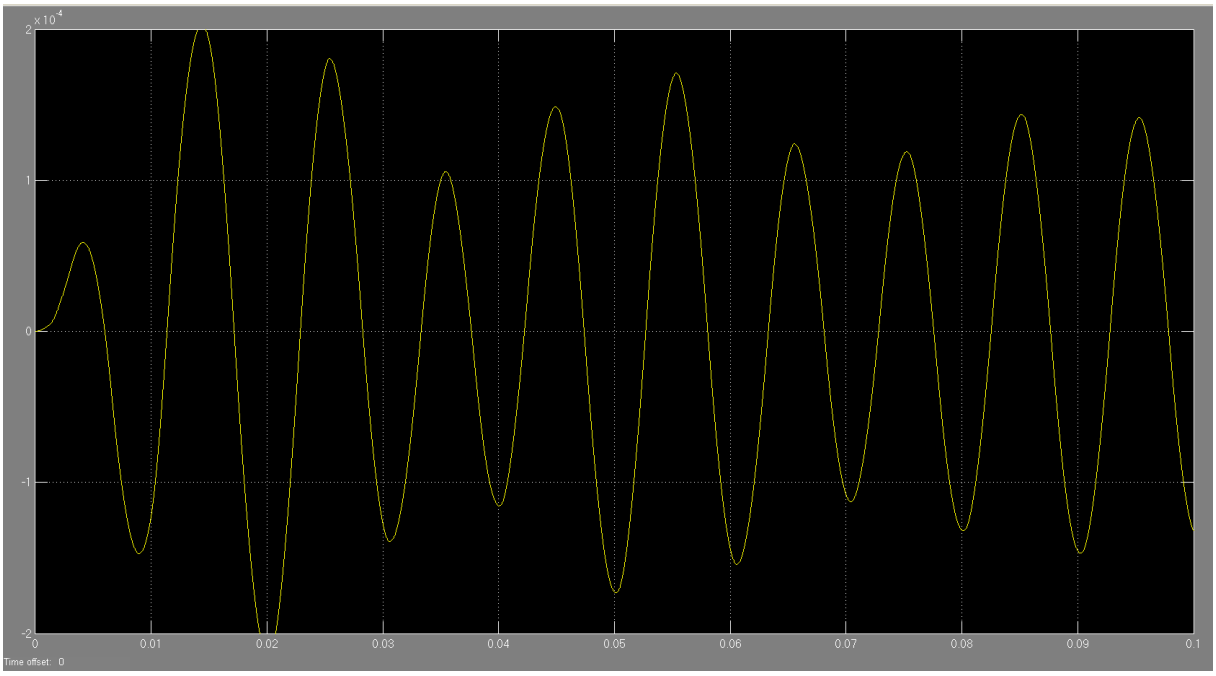


Figure 92 Résultat tilt-y

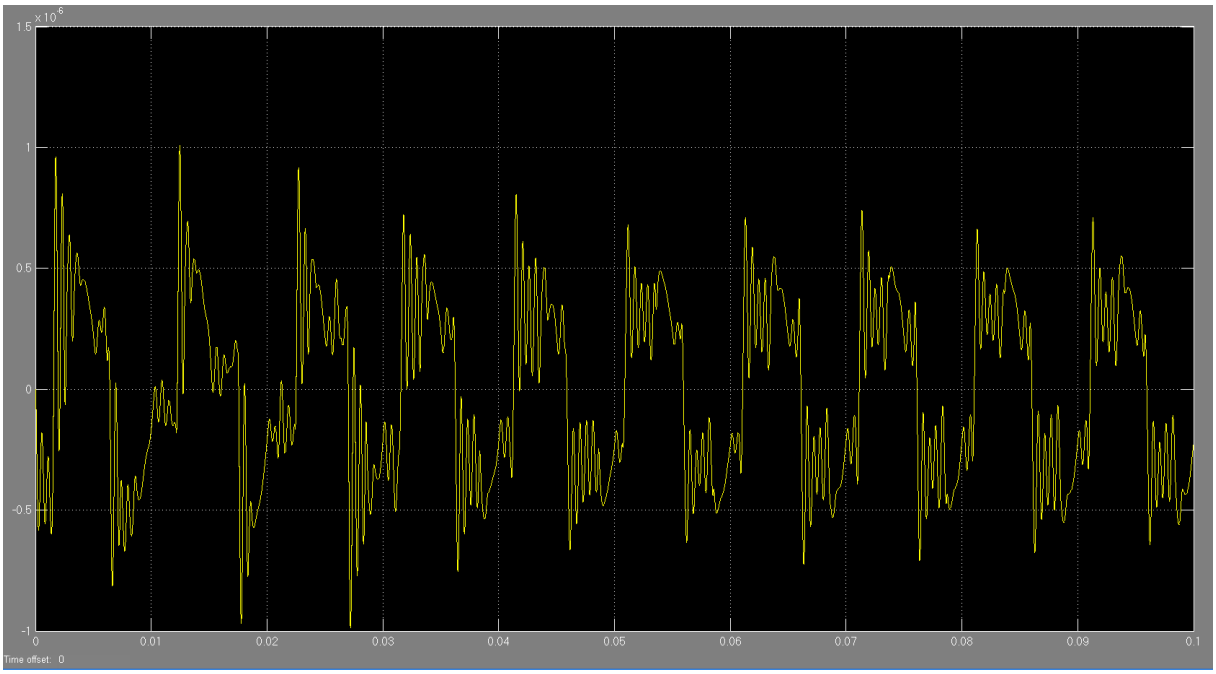


Figure 93 Résultat focus (amplitude consigne 1.5 micron)

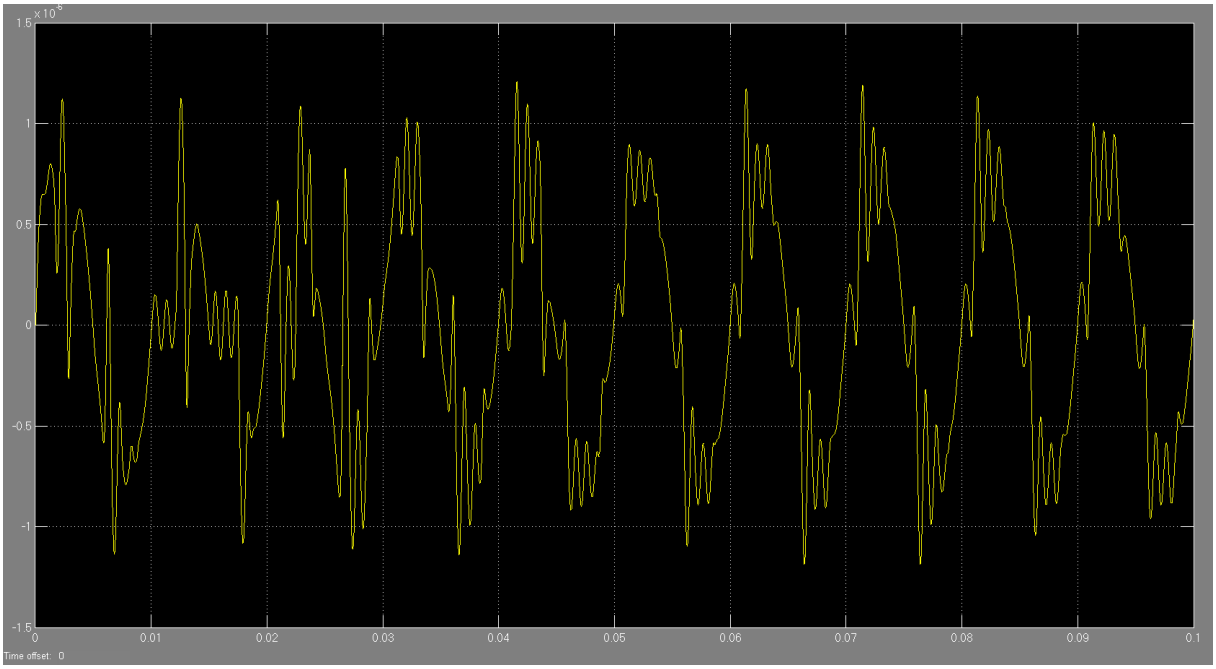


Figure 94 Résultat astigmatisme (amplitude consigne 1.5 micron)

Contrairement au cas continu, les résultats sont relativement bon pour les 3 premiers modes, mais mauvais pour les 2 derniers. On remarque à nouveau qu'en l'absence de saturation les résultats seraient meilleurs.

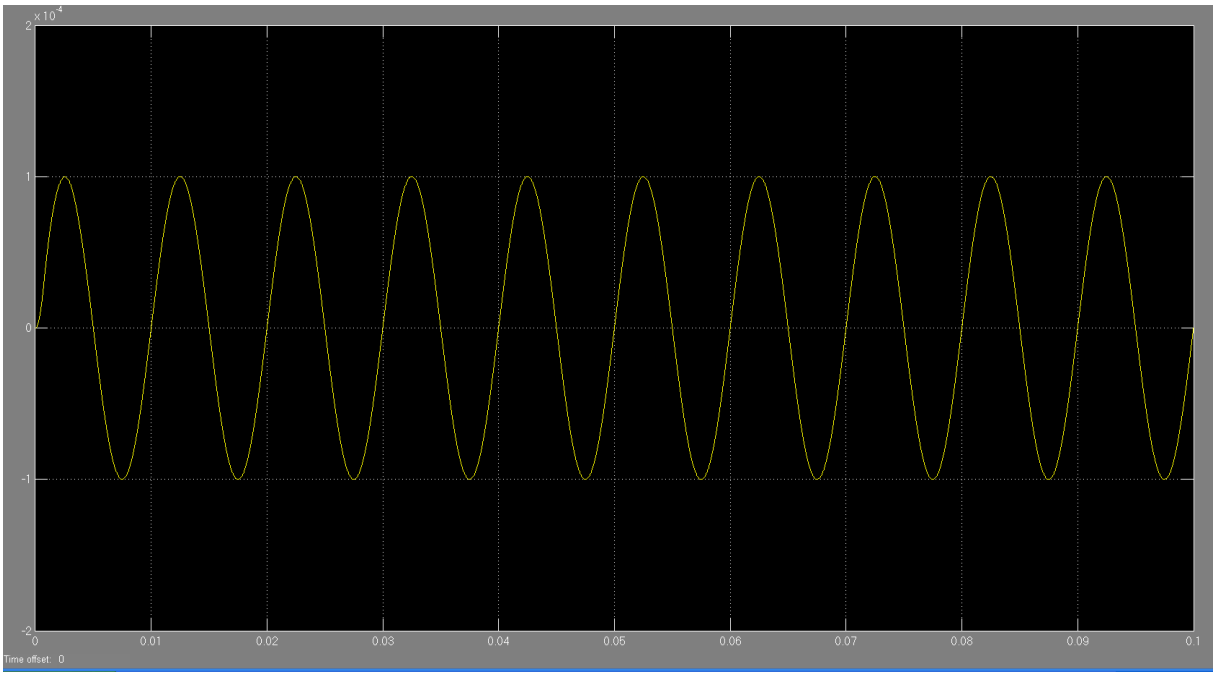


Figure 95 Résultat tilt-y

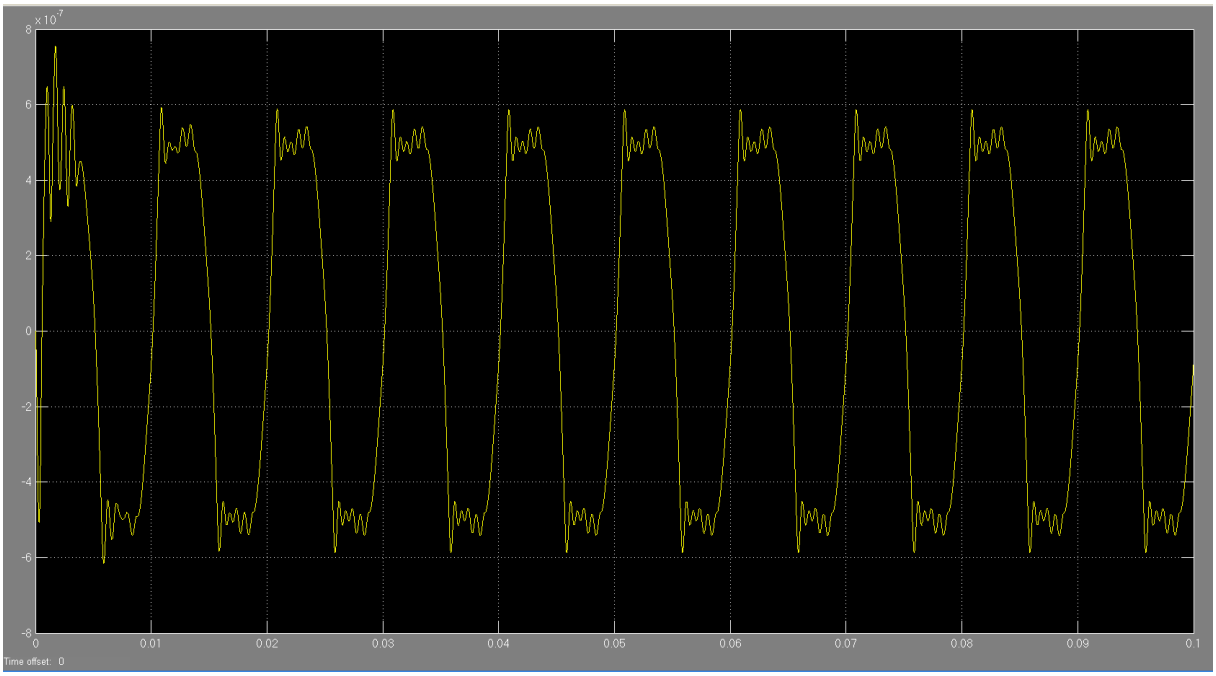


Figure 96 Résultat focus (consigne de 1.5 micron)

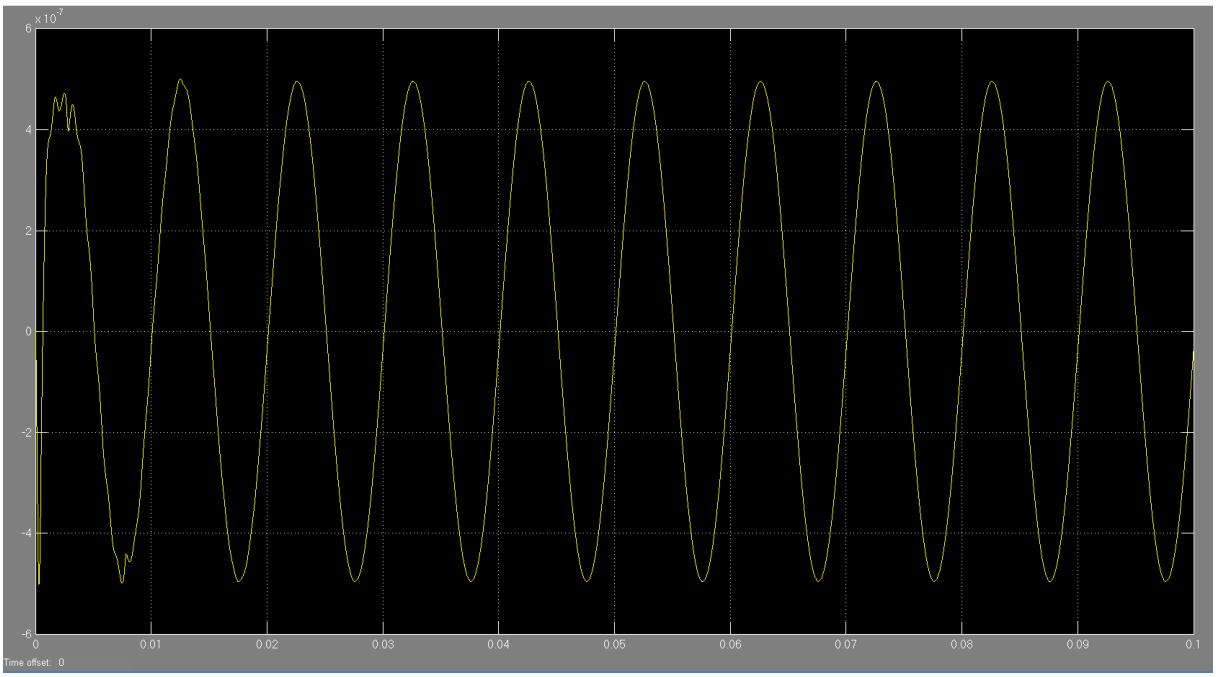


Figure 97 Résultat focus (consigne 0.5 micron)

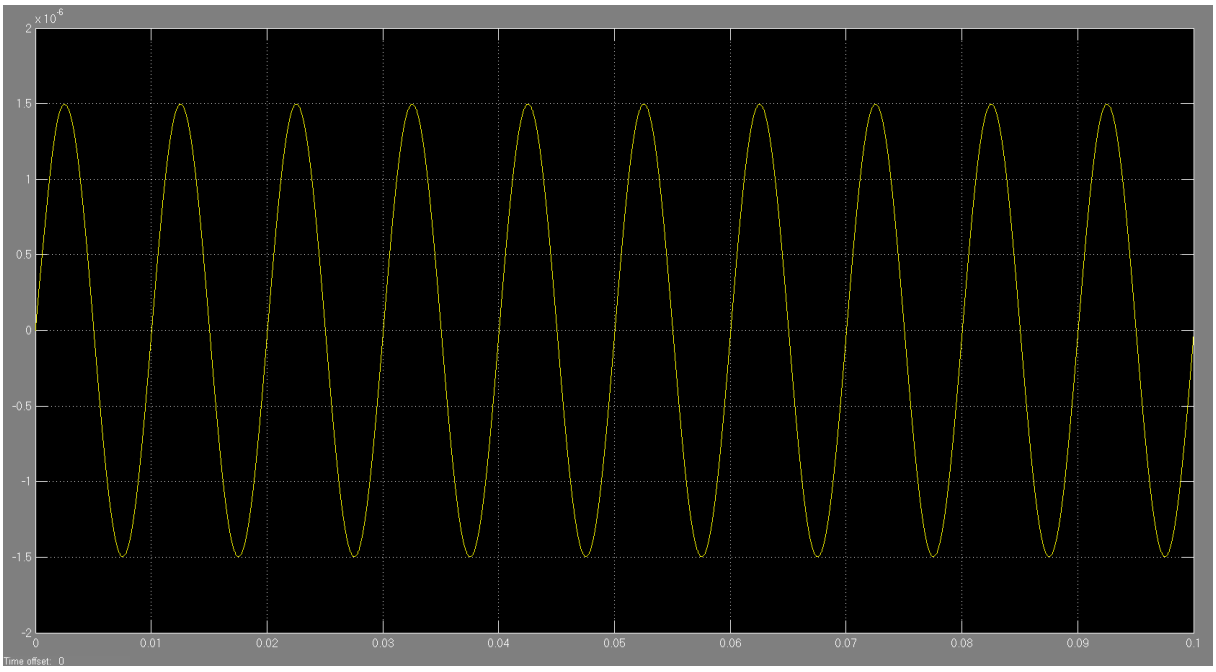


Figure 98 Résultat astigmatisme (consigne 1.5 micron)

Si l'on observe les courant nécessaire pour obtenir ses résultats, on remarque que pour le piston et le tilt-y les courants dépassent largement la saturation.

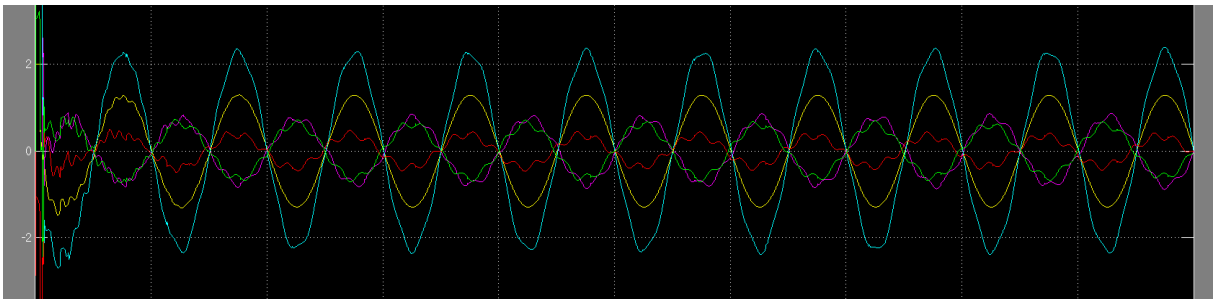
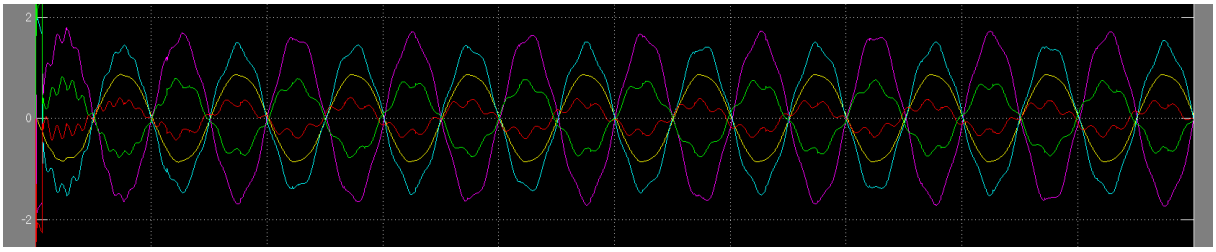


Figure 99 Courant nécessaire

Cependant il est nécessaire de diminuer l'ensemble des amplitudes des consignes afin de ne pas entrer en saturation. Par exemple si l'on diminue l'amplitude du tilt-y et du piston d'un facteur 10, l'effet est d'augmenter le courant sur le tilt-y.



Par conséquent, la diminution des amplitudes n'est pas bonne solution et il faut se satisfaire des résultats obtenus auparavant.

Si l'on ajoute le retard, les résultats deviennent les suivants :

Figure 100 Résultat piston

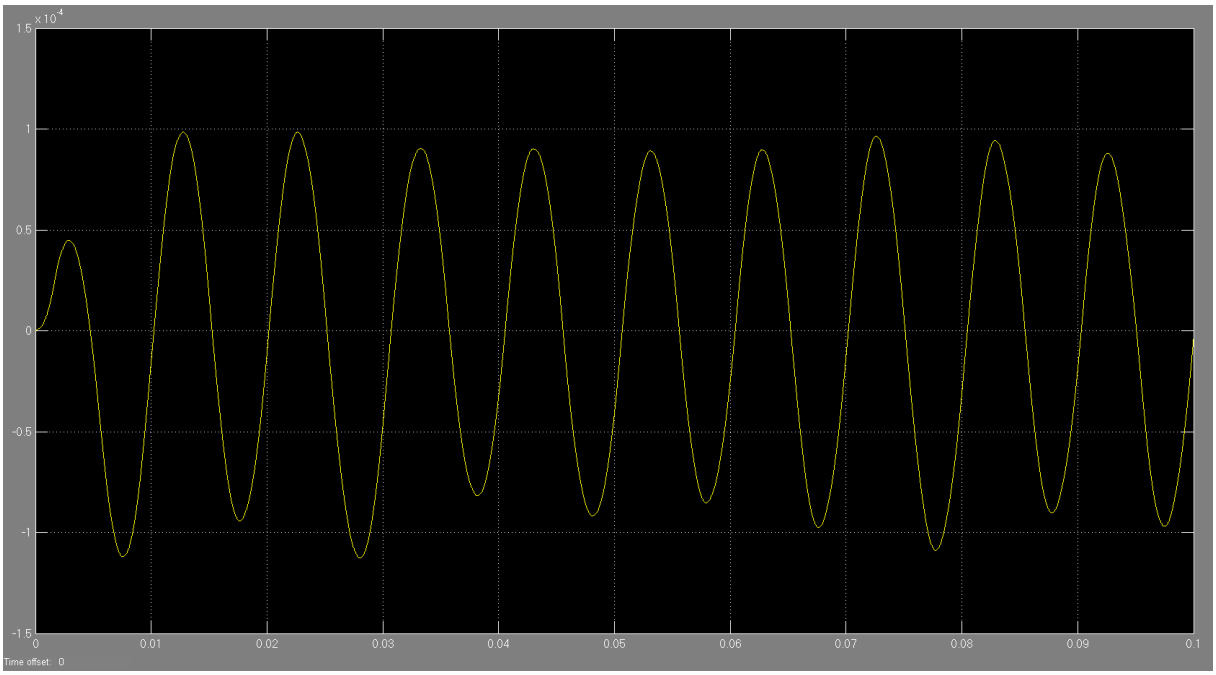


Figure 101 Résultat Tilt-x

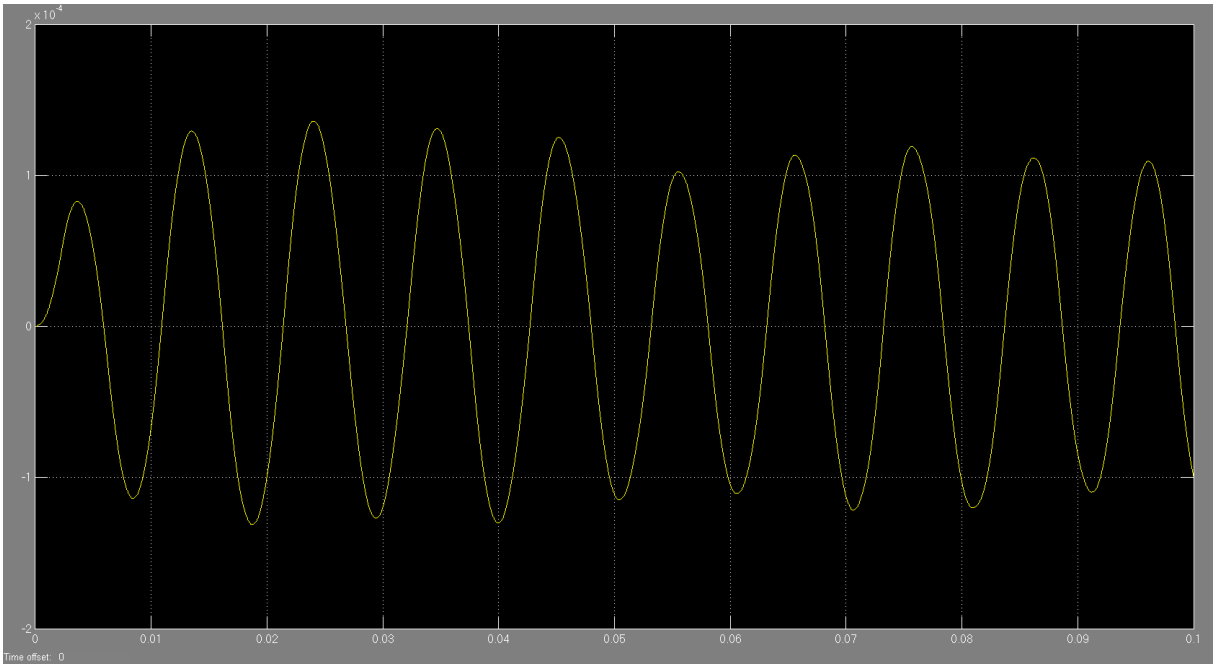


Figure 102 Résultat Tilt-y

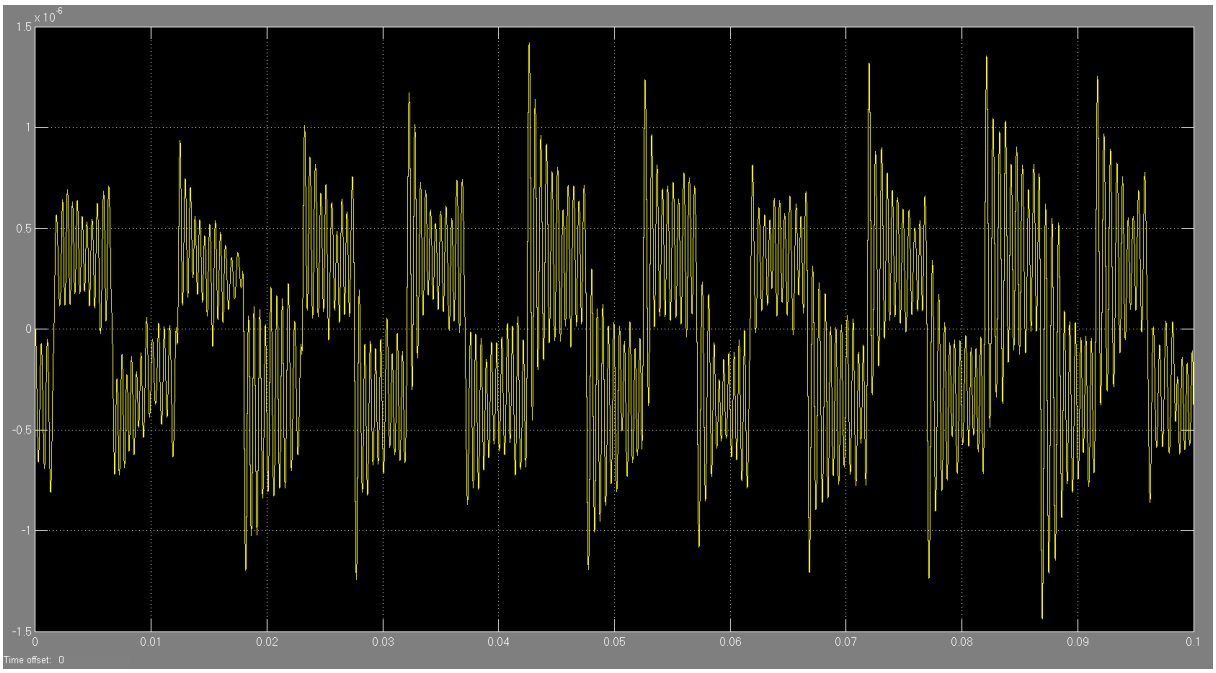


Figure 103 Résultat défocus

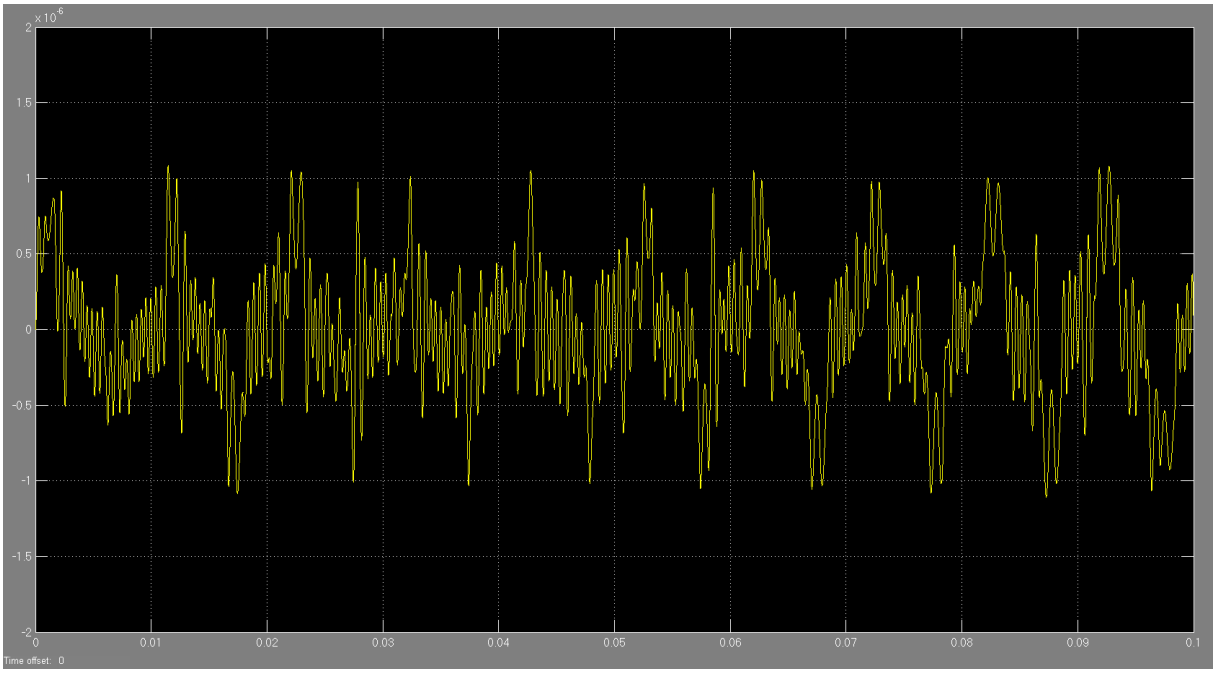
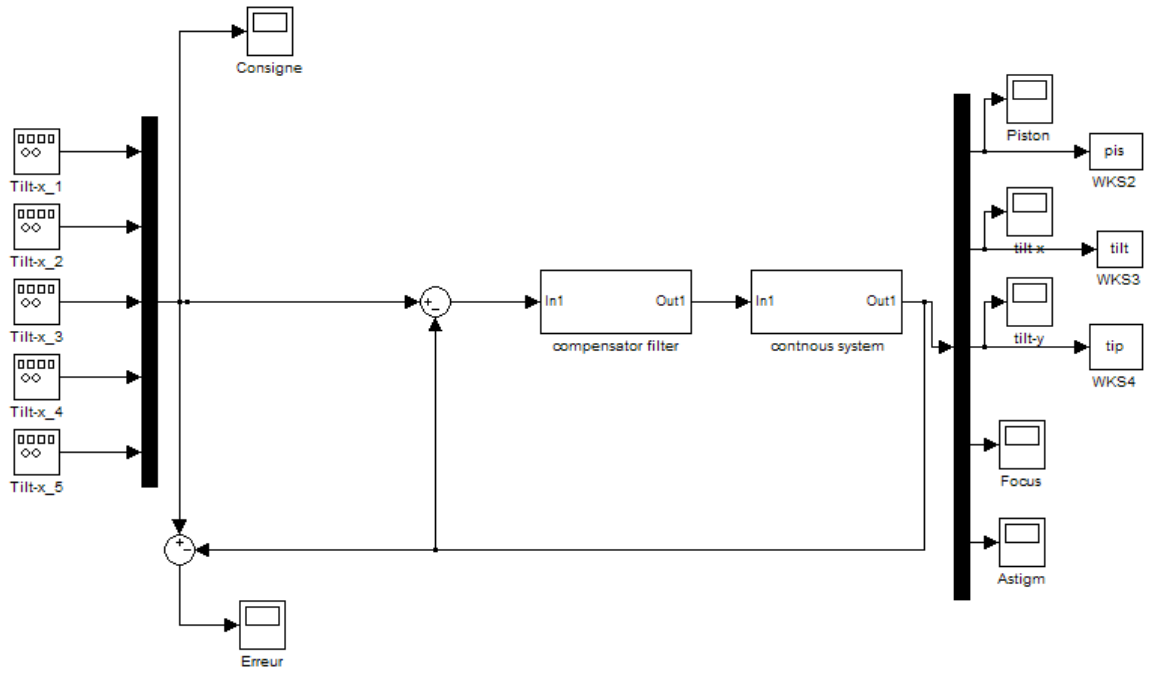


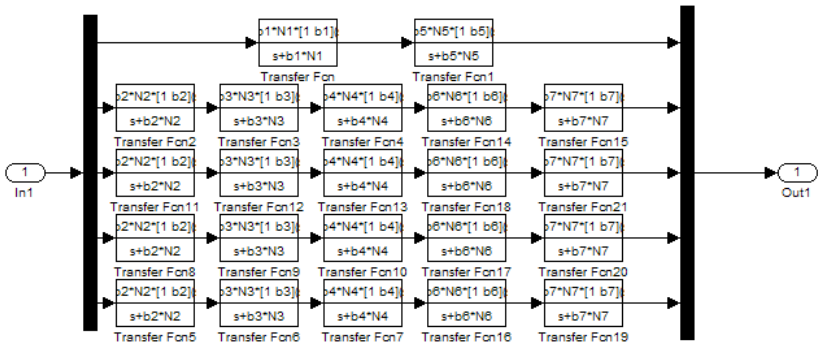
Figure 104 Résultat astigmatisme

13.3 Simulation avec filtre de compensation

Le modèle en question est le suivant :



Où les filtres de compensation sont implémentés dans les fonctions de transfert



Les résultats pour une fréquence de 100 Hz et une amplitude de 100 microns pour les 3 premiers modes et sont les suivants en l'absence de retard :

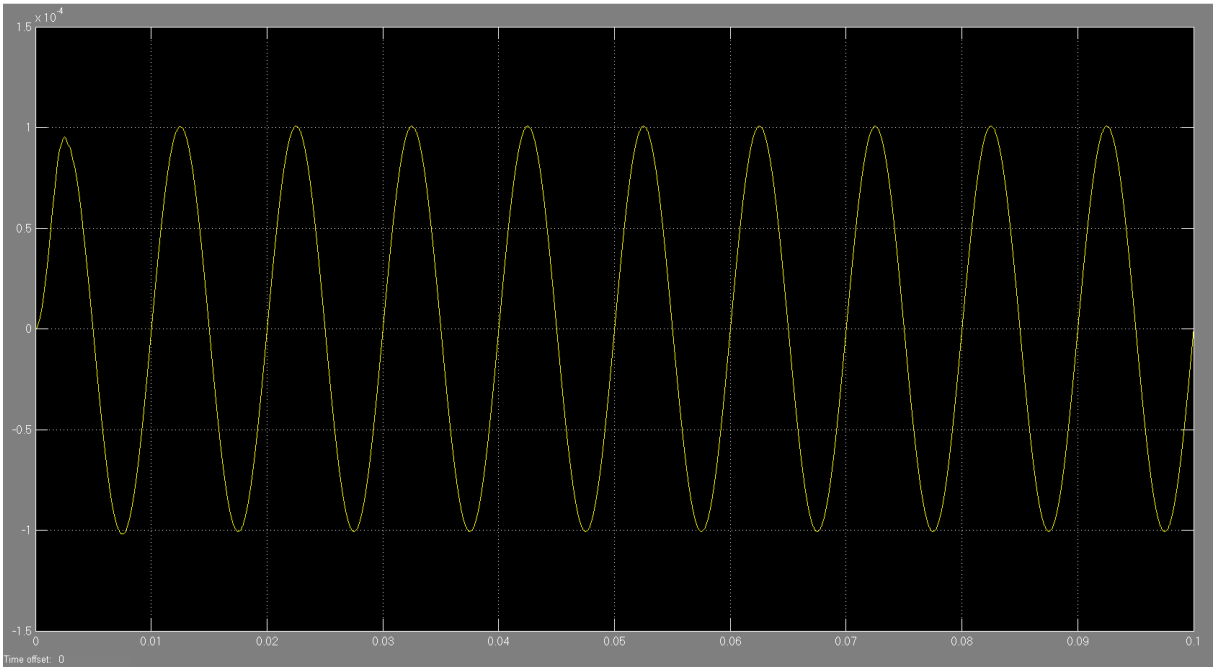


Figure 105 Résultat piston

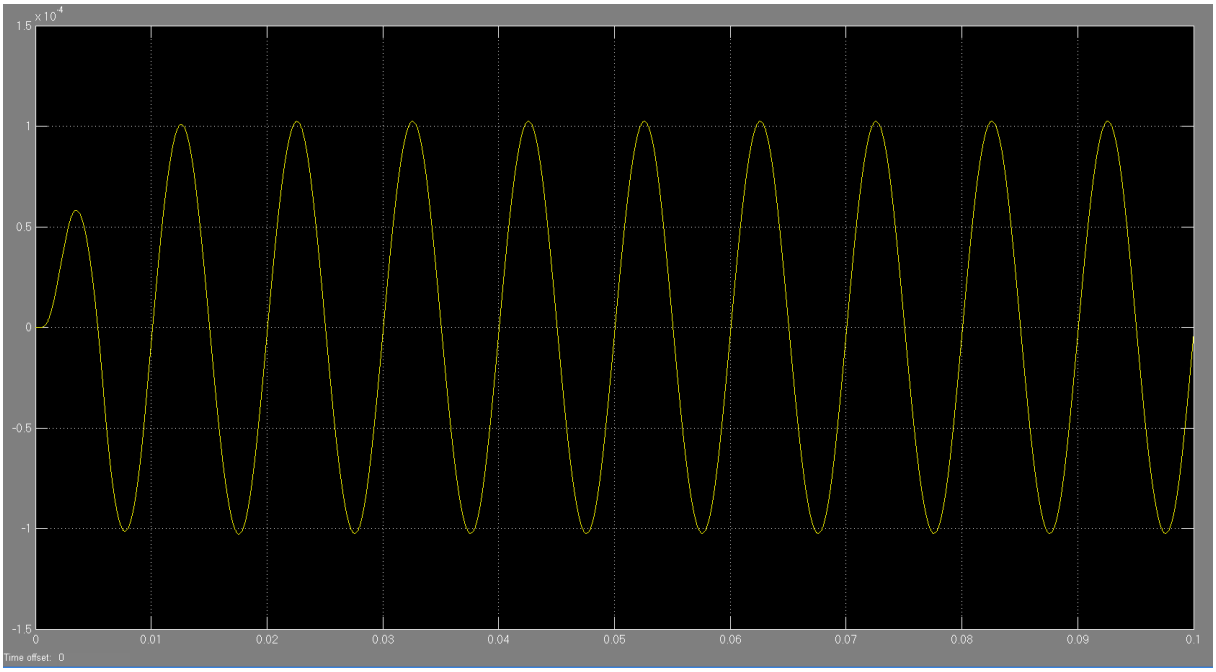


Figure 106 Résultat tilt-x

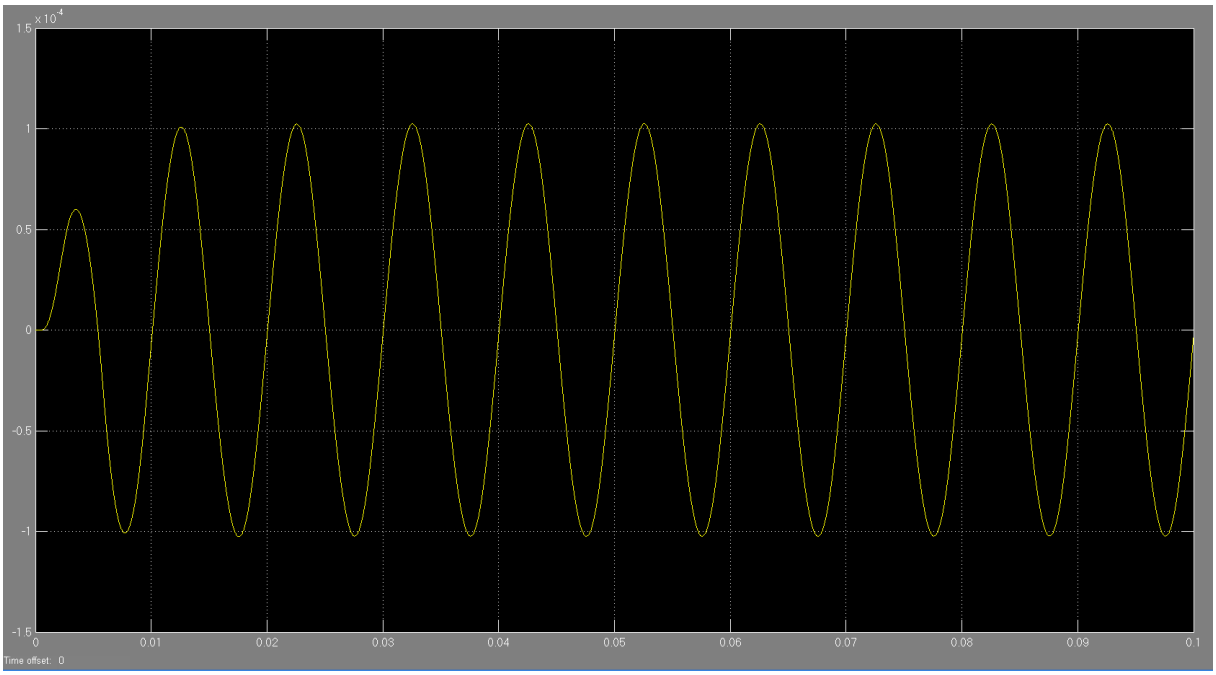


Figure 107 Résultat tilt-y

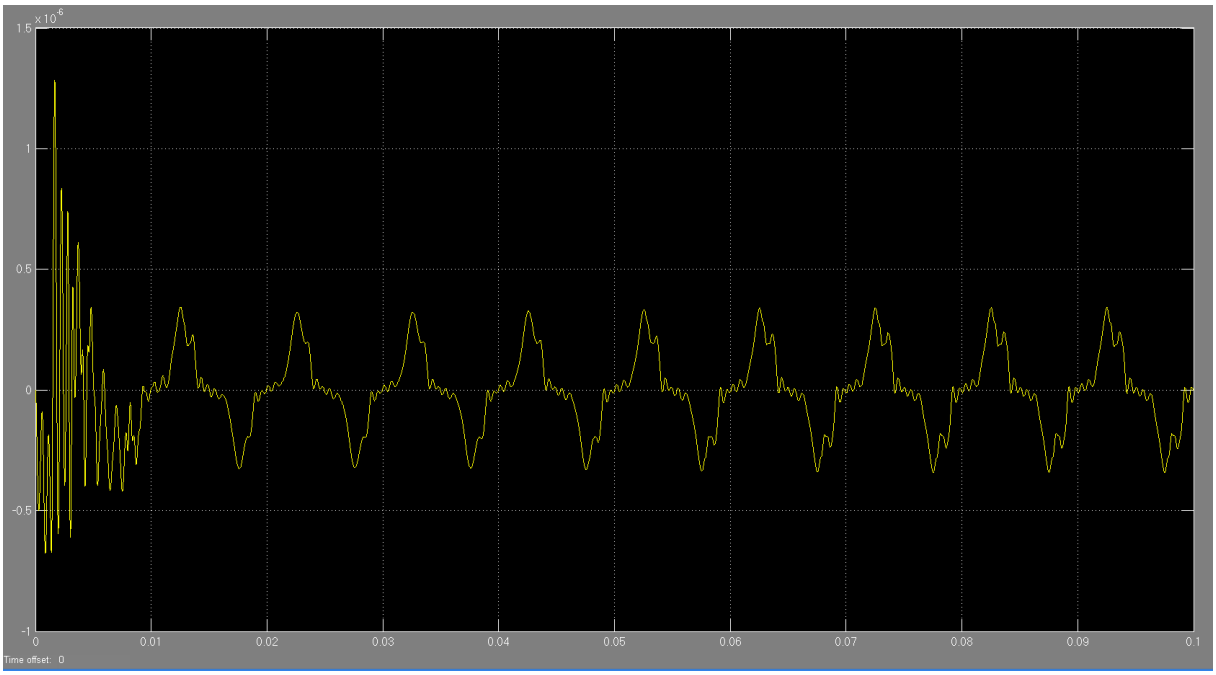


Figure 108 Résultat focus

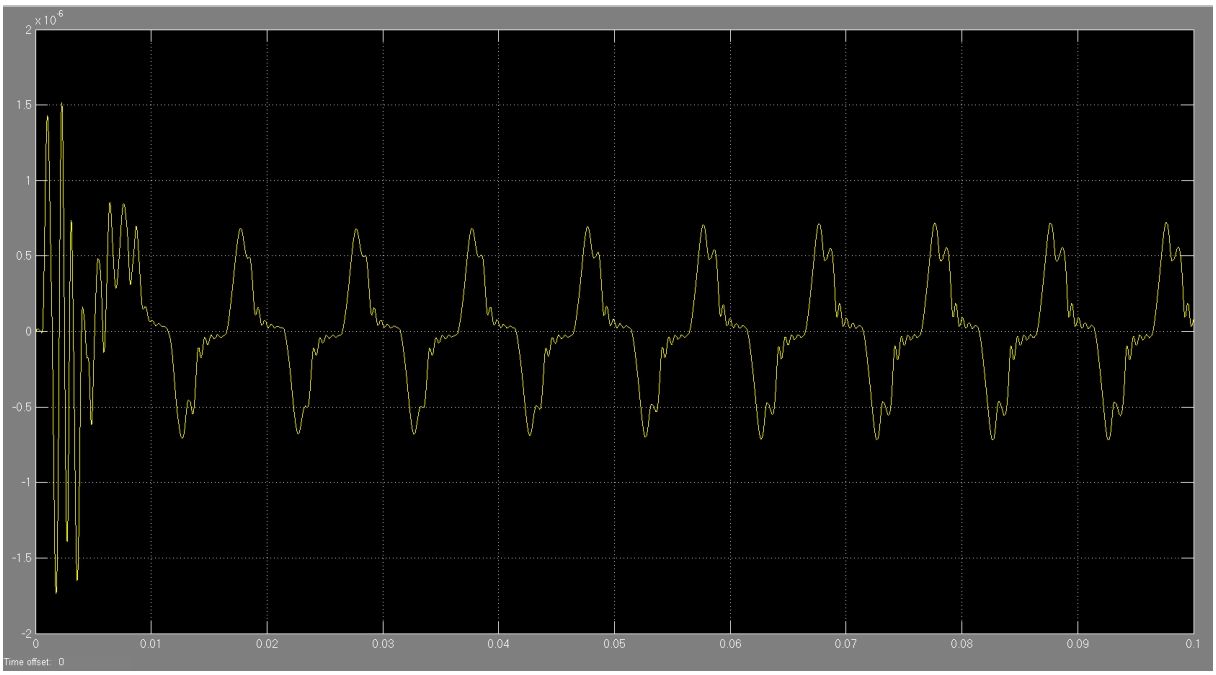
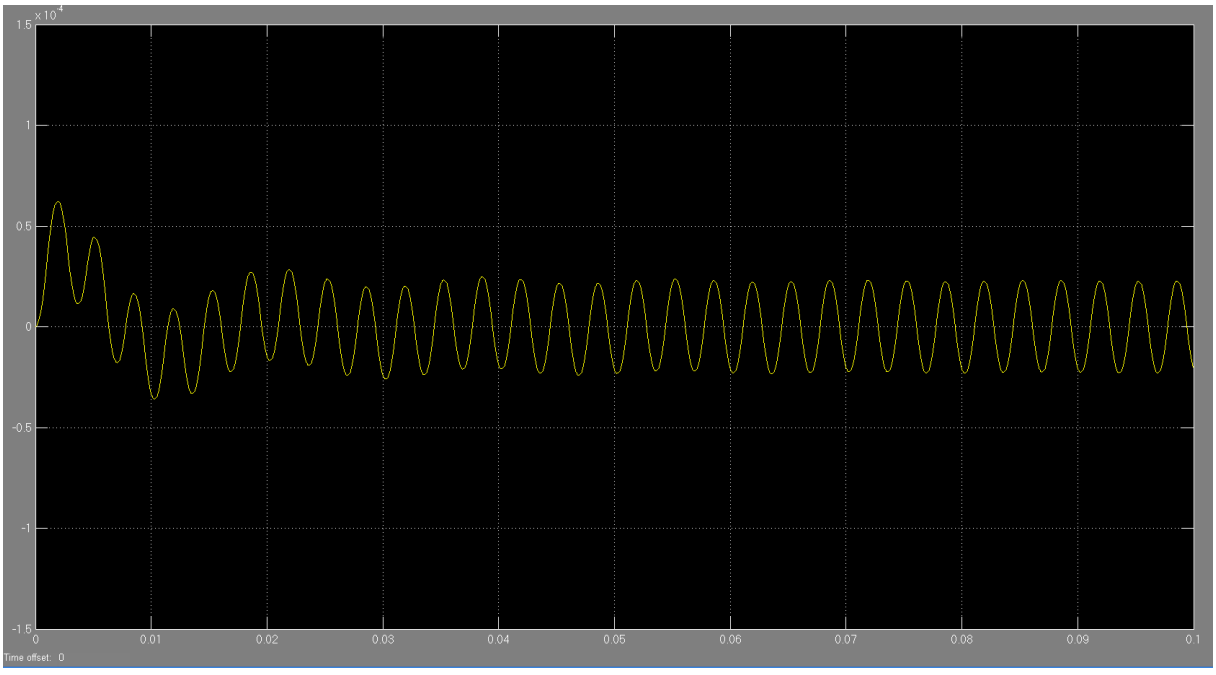


Figure 109 Résultat astigmatisme

Bien entendu si l'on enlevait la saturation, les résultats seraient mieux pour tous les modes, cependant ce sont les meilleurs résultats obtenus avec une saturation. On obtient une erreur max inférieur à 5% pour les 3 premiers modes

Si on augmente la fréquence à 300 Hz, les résultats sont les suivants :



On remarque encore une fois la saturation ne permet pas d'obtenir un temps de monté assez rapide.

Etant donnée que dans les objectifs du projet l'amplitude est de 75 microns pour les 3 premiers modes, il est possible de monter jusqu'à 120 Hz en gardant de bons résultats.

Si l'on intègre un retard, les résultats restent satisfaisants avec un retard allant jusqu'à 100μs pour les 3 premier modes. Il y a un dépassement de la consigne et un léger décalage. Concernant le dépassement une correction sur la consigne est tout à fait praticable, mais pour le décalage il n'y a rien à faire.

Au niveau des derniers modes, malheureusement il ne supporte pas un tel retard. La valeur limite maximale est de l'ordre de 9µs. Déjà avec cette valeur les résultats ne ressemble plus vraiment à la consigne.

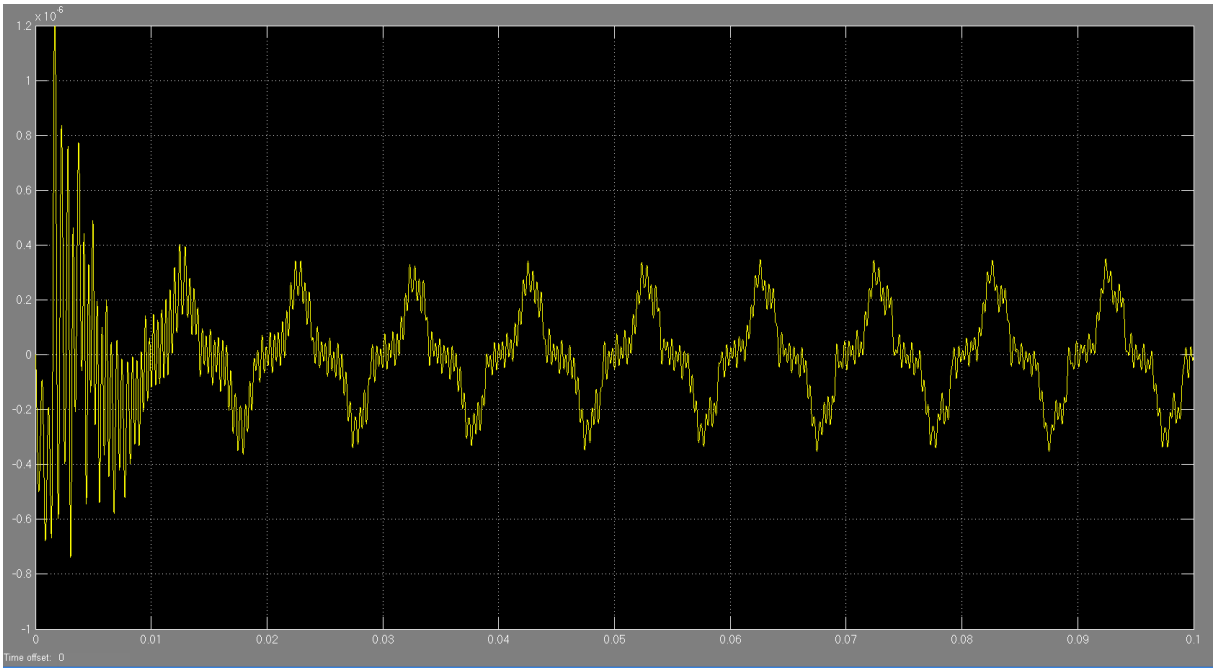


Figure 110 Résultat défocus

13.4 Discussion des résultats

On remarque que le gros problème dans ces simulations est la présence de la saturation. Cependant celle-ci est malheureusement nécessaire pour éviter que le système ne chauffe trop en raison de courants trop importants dans les bobines. Il est également utile de noter que le coefficient Kf de la bobine est probablement trop élevé par conséquent, les résultats obtenus bien que pas fantastique sont probablement trop optimistes.

De plus le choix d'effectuer une régulation à l'aide de PID n'est probablement pas une des meilleures solutions si le but est de faire fonctionner le système à des fréquences élevées. Il ne faut pas oublier que tous les résultats sont obtenus avec une contreréaction de la position qui n'est pas entachée de bruit. Il en va de même pour les sources de signal qui sont idéales.

Le seul point qui laisse entrevoir un espoir que le système puisse être fonctionnel est le fait que la consigne est un sinus qui change donc en continu. En supposant que le système soit en mis en placé avec un capteur de front d'onde qui ne soit pas très rapide le temps de stabilisation sera plus important et il est probable que les consignes soit plus facile à suivre.

Finalement, les objectifs au niveau du focus ne peuvent être atteints si l'on ne veut pas dépasser les limites de courants. Pour les autres modes, les déplacements imposés sont atteignable pour des fréquences de 100 Hz sous la condition de la validité du modèle qui est probablement trop optimiste.

14 Conclusion

Cette étude a permis la mise en évidence de plusieurs des caractéristiques du système. L'obtention de ses résultats a été inévitablement affectée par une importante part d'apprentissage... Dans un premier temps, il fallut découvrir le monde des éléments finis ainsi que leurs implémentations sur Matlab. La discrétisation du système a permis de valider la position verticale selon y comme étant la plus favorable. Cette orientation permet de minimiser les forces nécessaires pour créer les déplacements et provoque les déformations de la structure les plus faibles.

Ensuite l'assimilation des concepts liés à l'analyse modale rendit possible la calculation des valeurs propres. Les résultats obtenus présentent un comportement similaire à ce que donne le solver de SolidWorks. Cependant, ils ne sont pas parfaits, on remarque que l'étalement des fréquences n'est pas autant élevé. Ceci s'explique probablement par le manque de réalisme de la modélisation des aimants qui n'ont pas pour effet de rigidifier la surface du miroir. Toutefois, on obtient, comme Cosmos, une pulsation très proche pour le tilt-x et tilt-y et les ordres de grandeur sont respectés.

A partir de ses valeurs, le calcul de la fonction de transfert montre que de toute façon ces fréquences propres n'influencent pas grandement l'allure du diagramme de Bode. Les courbes en question permettent de réaliser une régulation. Il est utile de remarquer que pour les actuateurs extérieurs qui sont disposés de façon symétrique, les fonctions de transfert sont identiques ce qui confirment la méthode de calcul. A ce moment, on remarque que de simple PID sont susceptible de fonctionner pour effectuer le contrôle du système. Cependant, un réglage PID ne permet pas d'obtenir une grande zone où la marge de phase est bien établie.

Pour améliorer cette caractéristique, un réglage à l'aide de filtre de compensation a été dimensionné avec succès. Par la suite, les modèles ont été testés à l'aide de Simulink et c'est à ce moment que les problèmes liés à la saturation sont arrivés. Malheureusement, les forces nécessaires pour fonctionner rapidement ne sont pas envisageables si l'on ne veut pas faire chauffer le système et induire des déformations involontaires sur le miroir. Par conséquent, il faut limiter la fréquence de la consigne si l'on veut garder des résultats corrects. De plus, on remarque qu'il n'est pas possible d'obtenir les déplacements présents dans les objectifs pour les modes du défocus et de l'astigmatisme. Cependant il faut noter que les mouvements réalisables auront tout de même un effet sur la correction des turbulences. Finalement, bien que complètement nouvelles pour moi, les méthodes d'analyse misent en pratique sont essentielles pour le développement des systèmes mécatroniques modernes.

Au niveau des chiffres les tableaux suivant regroupent les résultats obtenus.

Analyse statique

Position	Horizontale	Verticale selon x	Verticlae selon y
Déformation statique selon z	0.12 mm	25 microns	17 microns
Inclinaison du miroir distance maximum en z à l'extrémité du miroir	0	12 microns	10 microns

Régulation PID

	A 100 Hz Actuateur central	A 300 Hz Actuateur central	A 100 Hz Actuateurs extérieurs	A 300 Hz Actuateurs extér.
Kp	8810	87100	2430	24830
Ti	1e-4	1e-5	1e-4	1e-5
Td	1.7	0.8	1.7	0.8

Les valeurs des Kp présenté sont celle pour obtenir un gain unitaire, pour obtenir une faible erreur statique, ses valeurs doivent être multipliées par un facteur lié à l'erreur statique souhaitée.

Régulation par filtre de compensation

Déplacements atteints à 100 Hz dans le meilleur des cas

	Piston	Tilt-x	Tilt-y	Défocus	Astigmatisme
Amplitude du sinus	100 microns	100 microns	100 microns	0.3 micron	0.7 micron

Si la fréquence est infiniment lente : valeur de stabilisation

Piston	Tilt-x	Tilt-y	Défocus	Astigmatisme
590 microns	115 microns	235 microns	0.9 micron	1.1 micron

Finalement, il est probable qu'avec ce design le système ne fonctionne pas très bien. Les améliorations à apporter sont dans un premier temps au niveau des forces applicables, un circuit conducteur pour les champs magnétiques est recommandé si l'on veut garder le design de l'élément ressort qui soutient le miroir. Une modification du design de la structure ressort est également envisageable. Si le système est installé à la verticale, une diminution de l'épaisseur serait envisageable. Comme les déformations sont liées aux inerties et celle-ci sont proportionnelle au cube de l'épaisseur, une légère diminution aurait des répercutions importantes sur les trois premiers modes. Au niveau statique, les déformations n'augmenteraient pas énormément car la structure ressort agirait en compression par conséquent les dimensions discriminantes seraient les longueurs qui ne seraient pas modifiées.

Yverdon, le 17 juillet 2009

Alain Meyer

15 Bibliographie

Introduction à la dynamique des structures

Auteur : Yves Gourinat

Edition : Cépaduès

CALFEM A FINITE ELEMENT TOOLBOX Version 3.5

OpenFEM A finite element toolbox for Matlab and Scilab

Cours de mécatronique HEIG-VD

Auteur : Bernard Schneider & Michel Girardin

Présentation optique adaptative Lorenzo Zago

SIMULINK® TUTORIAL

The Intelligent Structures and Systems Laboratory

Department of Mechanical Engineering

The Ohio-State University

Columbus OH 43210.

Structural Dynamics Toolbox Primer

Originally by : Prof N.A.J. Lieven

Department of Aerospace Engineering, University of Bristol

Revised by : Jean Michel Leclère, Jean Philippe Bianchi

SDTools REVISED FOR SDT 6

Modeling and Control of a Large Deformable Mirror

Fredrik Bjöörn

Olof Garpinger

Development of Rotationally Consistent Diagonal Mass

Matrices for Plate and Beam Elements

Graham C. Archer and Timothy M. Whalen*

School of Civil Engineering, Purdue University, West Lafayette, IN, 47907-1284, USA.

Introduction to Matlab – Simulink & their application in Control Systems

ENTC 462 - Spring 2007

Méthodes numériques appliquées à la conception par éléments finis

David Dureisseix

Formulations mathématiques et résolution numérique en mécanique

ChristianWilegosz Bernard Peseux Yves Lecointe

Simulink Tutorial

Christopher Lum

Autonomous Flight Systems Laboratory

Updated: 11/01/06

Analyzing LASIK Optical Data Using Zernike Functions

By Paul Fricker

Commande optimale par approche d'état en optique adaptative

Caroline Kulcsár, Henri-François Raynaud, Cyril Petit

16 Webographie

http://www.imcce.fr/fr/ephemerides/astronomie/Promenade/pages4/448.html

http://www.demailly.com

http://www.eso.org/projects/aot/

http://www-laog.obs.ujf-grenoble.fr/

http://www.lesia.obspm.fr/

http://citeseer.ist.psu.edu/old/396655.html

http://www.leg.ensieg.inpg.fr/machines/theses/Cugat/HDR3miroir.pdf

Commande optimale en optique adaptative classique et multiconjuguée
Thèse de Brice Le Roux

Micro-miroirs déformables pour l'optique adaptative de prochaine génération :
Caractérisation et simulation
Thèse d'Arnaud Liotard

17 Annexe

17.1 Code Matlab

Heads_main

```
clear all
close all
clc

warning('off','MATLAB:dispatcher:InexactMatch')
global XD YD

heads_dat
heads_geo
heads_fem

heads_KCM
[modes2act, act2modes] = geom_trans()
heads_gravity_effect

heads_static
heads_eigen

% ------ Dynamic response ----------------------------------------
freqvec = logspace(0,3,100)';   w=2*pi*freqvec;

[sys sysd] = heads_lti (mdof,n_act,freqrad,Egv,w);


dim_PD_ret2
regul_comp_filter
```

heads_dat

```
% Materials
pois = 0.33;
% Al alloy
rho_Al = 2700.;
E_Al = 69000e6; G_Al = E_Al / (2*(1+pois));
alpha_Al = 23.4e-6;

R_act = 25e-3; % Pupil diameter
diam = 70e-3;  % Mirror diameter
R_flex1 = 78e-3/2;
R_cardan = 87e-3/2;
```

```
R_flex2 = 91e-3/2;
R_flat = 99e-3/2;
Lflex = 2e-3;
nb_c = 16;

magnet_mass = 4.2e-3;
R_bobine = 5;
Kf = 0.5;

h = 1e-3;       b = 4e-3;
[A, Iy, Iz, J] = rect_pro (b,h);
Ep_contour = [E_Al  G_Al  A Iy Iz J A*rho_Al];

h = 1e-3;       b = 1.3e-3;
[A, Iy, Iz, J] = rect_pro (b,h);
Ep_flex = [E_Al  G_Al  A Iy Iz J A*rho_Al];

h = 1e-3;       b = 3e-3;
[A, Iy, Iz, J] = rect_pro (b,h);
Ep_flat = [E_Al  G_Al  A Iy Iz J A*rho_Al];

h = 1e-3;       b = 1.5e-3;
[A, Iy, Iz, J] = rect_pro (b,h);
Ep_cardan = [E_Al  G_Al  A Iy Iz J A*rho_Al];

r = 0.006;
[A, Iy, Iz, J] = circ_pro (r);
Ep_stiff = [E_Al*3  G_Al*2.75  A Iy Iz J A*rho_Al/10000];
```

heads_geo

```
% heads_geo

disk_geo
mount_geo
```

disk_geo

```
femesh('reset');
model=femesh('testquad4 divide8 8');
Coord = FEnode(:,5:7);
Elem4 = FEel0(2:length(FEel0), 1:4);

n_disk = 1:length(Coord);
DD = sortrows (sortrows ([n_disk' Coord(n_disk,:)],3),2);
```

```
NN = reshape(DD(:,1),9,9);

n_contour = [];   n_pupil = [];  n_act = [43];
for i=1:length(Coord)
    if ((Coord(i,1)==0) | (Coord(i,2)==0) | (Coord(i,1)==1) |
(Coord(i,2)==1))
       n_contour = [n_contour i];
    end
    if (((Coord(i,1)==0.125) | (Coord(i,2)==0.125) | (Coord(i,1)== 0.875) |
(Coord(i,2)==0.875)) & ...
        ((Coord(i,1)>=0.125) & (Coord(i,2)>=0.125) & (Coord(i,1)<= 0.875) &
(Coord(i,2)<=0.875)))
       n_pupil = [n_pupil i];

       if (Coord(i,1)==Coord(i,2)) | (Coord(i,1) == 1-Coord(i,2))
           n_act = [n_act i];
       end
    end
    if ((Coord(i,1)==0.5) & (Coord(i,2)==1))
        n_cp = i;
    elseif ((Coord(i,1)==0.5) & (Coord(i,2)==0))
        n_cm = i;
    end
end

Xm = FEnode(:,5);
Ym = FEnode(:,6);
Xm = (Xm*2 - 1) * R_act/sqrt(2) * 4/3;
Ym = (Ym*2 - 1) * R_act/sqrt(2) * 4/3;

FEnode(:,5) = Xm;
FEnode(:,6) = Ym;
Coord = FEnode(:,5:7);

for i = 1:length(Coord)
    radius = sqrt(Xm.^2 + Ym.^2);
    if (Xm(i) ~= 0)
        alpha(i) = atan(Ym(i)./Xm(i));
    else
        alpha(i) = sign(Ym(i))*pi/2;
    end
    if (Ym(i) == 0)
        if (Xm(i) > 0)
            alpha(i) = 0;
        else
            alpha(i) = pi;
        end
    elseif (Xm(i) < 0)
        alpha(i) = alpha(i) + pi;
    end
end

% sort n_contour
clear aa
for i = 1:length(n_contour)
    aa(i,:) = [alpha(n_contour(i)) n_contour(i)];
end
aa = sortrows (aa,1);
n_contour = aa(:,2);
```

```
for i = 1:length(n_contour)
    Xm(n_contour(i)) = diam/2 * cos(alpha(n_contour(i)));
    Ym(n_contour(i)) = diam/2 * sin(alpha(n_contour(i)));
end

n_pupil_circle = setdiff (1:length(Coord), n_contour);
maxXm = max(Xm(n_pupil_circle));
maxYm = max(Ym(n_pupil_circle));
for i = 1:length(n_pupil_circle)
    Rm = sqrt(2) * max ([ abs(Xm(n_pupil_circle(i)))
abs(Ym(n_pupil_circle(i))) ]);
    Xm(n_pupil_circle(i)) = Rm * cos(alpha(n_pupil_circle(i)));
    Ym(n_pupil_circle(i)) = Rm * sin(alpha(n_pupil_circle(i)));
end

FEnode(:,5) = Xm;
FEnode(:,6) = Ym;
Coord = FEnode(:,5:7);
n_contour = n_contour';

model = femesh('model0')
```

mount_geo

```
% Mount geometry

Elem = [];
n = size(Coord,1);  ne = size(Elem,1);

% magnets
for i = 1:5
    Coord(n+i,:) = [Coord(n_act(i),1) Coord(n_act(i),2) Coord(n_act(i),3)-
0.0025  ];
    Elem(ne+i,:) = [n_act(i) n+i];

end
eMagnet = [(ne+1):(ne+5)];
% contour
ne = size(Elem,1);
nc = length(n_contour);
for i = 1:(nc-1)
    Elem(ne+i,:) = [n_contour(i)  n_contour(i+1)];
end
Elem(ne+nc,:) = [n_contour(nc)  n_contour(1)];
eContour = [(ne+1):(ne+nc)];

% cardan
n = size(Coord,1);  ne = size(Elem,1);
for i = 1:nc
    Coord(n+i,:) = R_cardan * [cos(2*pi/nc*i)  sin(2*pi/nc*i)  0];
end
n_op = n+nc/4;
n_om = n+nc*3/4;
```

```
n_o1 = n+nc*2/4;
n_o2 = n+nc;

for i = 1:(nc-1)
    Elem(ne+i,:) = [n+i  n+i+1];
end
Elem(ne+nc,:) = [n+nc  n+1];
eCardan = [(ne+1):(ne+nc)];

% flex_1
n = size(Coord,1);  ne = size(Elem,1);
Coord(n+1,:) = [ Coord(n_cp,1)   R_flex1        Coord(n_cp,3) ];
Coord(n+2,:) = [ Coord(n_cp,1)   R_flex1+Lflex  Coord(n_cp,3) ];
Coord(n+3,:) = [ Coord(n_cm,1)  -R_flex1        Coord(n_cm,3) ];
Coord(n+4,:) = [ Coord(n_cm,1)  -R_flex1-Lflex  Coord(n_cm,3) ];
Elem(ne+1,:) = [n_cp n+1];
Elem(ne+2,:) = [n+1  n+2];
Elem(ne+3,:) = [n+2  n_op];
Elem(ne+4,:) = [n_cm n+3];
Elem(ne+5,:) = [n+3  n+4];
Elem(ne+6,:) = [n+4  n_om];

eFlex = [ne+2  ne+5];
eFlat = [ne+1  ne+3  ne+4  ne+6];

% flex_2
n = size(Coord,1);  ne = size(Elem,1);
Coord(n+1,:) = [ -R_flex2         Coord(n_o1,2)   Coord(n_o1,3) ];
Coord(n+2,:) = [ -R_flex2-Lflex   Coord(n_o1,2)   Coord(n_o1,3) ];
Coord(n+3,:) = [ -R_flat          Coord(n_o1,2)   Coord(n_o1,3) ];
Coord(n+4,:) = [  R_flex2         Coord(n_o2,2)   Coord(n_o2,3) ];
Coord(n+5,:) = [  R_flex2+Lflex   Coord(n_o2,2)   Coord(n_o2,3) ];
Coord(n+6,:) = [  R_flat          Coord(n_o2,2)   Coord(n_o2,3) ];
Elem(ne+1,:) = [n_o1 n+1];
Elem(ne+2,:) = [n+1  n+2];
Elem(ne+3,:) = [n+2  n+3];
Elem(ne+4,:) = [n_o2 n+4];
Elem(ne+5,:) = [n+4  n+5];
Elem(ne+6,:) = [n+5  n+6];

eFlex = [eFlex  ne+2  ne+5];
eFlat = [eFlat  ne+1  ne+3  ne+4  ne+6];

n_fix = [n+3 n+6]
```

heads_fem

```
% ------ topologie ------------------------------------------------
[n_nodes,n_dof,Dof] = get_Dof (Coord);
[n_elem4,n_nel4,Edof4] = get_Edof (Coord,Elem4,Dof);
[E4x,E4y,E4z] = coordxtr(Edof4,Coord,Dof,n_nel4);
[n_elem,n_nel,Edof] = get_Edof (Coord,Elem,Dof);
[Ex,Ey,Ez] = coordxtr(Edof,Coord,Dof,n_nel);
```

```
% Check elements
Number_of_elements = size(Elem,1)
Check = length([ eContour eCardan eFlex eFlat eMagnet])

clear Coord_xy Coord_xz
Coord_xy(:,1) = Coord(:,1); Coord_xy(:,2) = Coord(:,2);
figure; femdraw2 (Coord_xy,E4x,E4y,[1 7 2 5 0.],Edof4(:,1));
hold on
femdraw2 (Coord_xy,Ex,Ey,[1 4 2 5 0.],Edof(:,1));
ylabel('y'); grid;

Coord_xz(:,1) = Coord(:,1); Coord_xz(:,2) = Coord(:,3);
figure; femdraw2 (Coord_xz,E4x,E4z,[1 7 2 5 0.],Edof4(:,1));
hold on
femdraw2 (Coord_xz,Ex,Ez,[1 4 2 5 0.],Edof(:,1));
ylabel('z'); grid;

for i = 1:9
    for j = 1:9
        XD(i,j) = Coord(NN(i,j),1);
        YD(i,j) = Coord(NN(i,j),2);
        ZD(i,j) = Coord(NN(i,j),3);
    end
end
figure; femdraw3 (Coord,Ex,Ey,Ez,[1 4 2 5 0.],Edof(:,1));
hold on;   surf (XD,YD,ZD);
femdraw3 (Coord,E4x,E4y,E4z,[1 7 2 5 0.],Edof4(:,1));
zlim([-0.01 0.01]); grid; axis('equal');

% Element (beam) length
for ie = 1:n_elem
   b_elem = [ Ex(ie,2)-Ex(ie,1); Ey(ie,2)-Ey(ie,1); Ez(ie,2)-Ez(ie,1) ];
   L_elem(ie) = sqrt(b_elem'*b_elem);
end
L_elem = L_elem';
```

Heads_KCM

```
% FEM
% ------ generate element matrices, assemble in global matrices
nd = n_nodes*n_dof;
clear K M C
K = zeros(nd); M = zeros(nd); C = zeros(nd);

% disk matrices ------------------------------------------------
FE.pl = m_elastic('dbval 100 aluminum');
FE.il = [p_shell('dbval 110 kirchhoff 0.0015') ];  % thickness 1.5 mm
FE.pl(1,3)=FE.pl(1,3)/7.2*6.9;
FE.pl(1,4)=0.24;
FE.pl(1,5)=2530;
model = struct('Node',FEnode,'Elt',FEel0,'pl',FE.pl,'il',FE.il);
[Md,Kd,mdof] = fe_mk(model);

for i = 1:length(Md)
```

```
    for j = 1:length(Md)
        K(i,j) = Kd(i,j);
        M(i,j) = Md(i,j);
    end
end

% beam elements ------------------------------------------------
eFile = fopen ('beam_elements.out','w');
s_output (eFile,'Beam elements')
pFile = fopen ('beam_elem_properties.out','w');
s_output (pFile,'Beam element properties')

nr_elem = 0;

for ie = eContour
  eo(ie,:) = [0 0 1];
  [ke,me] = beam3d (Ex(ie,:),Ey(ie,:),Ez(ie,:),eo(ie,:),Ep_contour);
  K = assem(Edof(ie,:),K,ke);
  M = assem(Edof(ie,:),M,me);
  nr_elem = nr_elem+1;
  loc = 'Mirror contour';
  m_elem(ie) = L_elem(ie) * Ep_contour(7);
  fprintf (eFile,' %3d  %4d %4d  %7.4f %7.4f %7.4f %7.3f    %s\n',...
     ie,Elem(ie,:),eo(ie,:),m_elem(ie),loc);
end
fprintf (pFile,'%15s %10.3e %10.3e %10.3e %10.3e %10.3e %10.3e
%10.3e\n',...
         loc,Ep_contour);

for ie = eCardan
  eo(ie,:) = [0 0 1];
  [ke,me] = beam3d (Ex(ie,:),Ey(ie,:),Ez(ie,:),eo(ie,:),Ep_cardan);
  K = assem(Edof(ie,:),K,ke);
  M = assem(Edof(ie,:),M,me);
  nr_elem = nr_elem+1;
  loc = 'Cardan';
  m_elem(ie) = L_elem(ie) * Ep_cardan(7);
  fprintf (eFile,' %3d  %4d %4d  %7.4f %7.4f %7.4f %7.3f    %s\n',...
     ie,Elem(ie,:),eo(ie,:),m_elem(ie),loc);
end
fprintf (pFile,'%15s %10.3e %10.3e %10.3e %10.3e %10.3e %10.3e
%10.3e\n',...
         loc,Ep_cardan);

for ie = eFlex
  eo(ie,:) = [0 0 1];
  [ke,me] = beam3d (Ex(ie,:),Ey(ie,:),Ez(ie,:),eo(ie,:),Ep_flex);
  K = assem(Edof(ie,:),K,ke);
  M = assem(Edof(ie,:),M,me);
  nr_elem = nr_elem+1;
  loc = 'Flex';
  m_elem(ie) = L_elem(ie) * Ep_flex(7);
  fprintf (eFile,' %3d  %4d %4d  %7.4f %7.4f %7.4f %7.3f    %s\n',...
     ie,Elem(ie,:),eo(ie,:),m_elem(ie),loc);
end
fprintf (pFile,'%15s %10.3e %10.3e %10.3e %10.3e %10.3e %10.3e
%10.3e\n',...
         loc,Ep_flex);
```

```
for ie = eFlat
  eo(ie,:) = [0 0 1];
  [ke,me] = beam3d (Ex(ie,:),Ey(ie,:),Ez(ie,:),eo(ie,:),Ep_flat);
  K = assem(Edof(ie,:),K,ke);
  M = assem(Edof(ie,:),M,me);
  nr_elem = nr_elem+1;
  loc = 'Flat';
  m_elem(ie) = L_elem(ie) * Ep_flat(7);
  fprintf (eFile,' %3d  %4d %4d  %7.4f %7.4f %7.4f %7.3f    %s\n',...
     ie,Elem(ie,:),eo(ie,:),m_elem(ie),loc);
end
fprintf (pFile,'%15s %10.3e %10.3e %10.3e %10.3e %10.3e %10.3e
%10.3e\n',...
         loc,Ep_flat);

for ie = eMagnet
  eo(ie,:) = [0 1 0];
  [ke,me] = beam3d (Ex(ie,:),Ey(ie,:),Ez(ie,:),eo(ie,:),Ep_stiff);
  K = assem(Edof(ie,:),K,ke);
  M = assem(Edof(ie,:),M,me);
  nr_elem = nr_elem+1;
  loc = 'Magnet';
  m_elem(ie) = L_elem(ie) * Ep_stiff(7);
  fprintf (eFile,' %3d  %4d %4d  %7.4f %7.4f %7.4f %7.3f    %s\n',...
     ie,Elem(ie,:),eo(ie,:),m_elem(ie),loc);
end
fprintf (pFile,'%15s %10.3e %10.3e %10.3e %10.3e %10.3e %10.3e
%10.3e\n',...
         loc,Ep_stiff);

% ------ Set magnet mass (and inertia) ------------------------------
n_mag=[82 :86];
for i=1:5
    for j = 1:3
       M(Dof(n_mag(i),j),Dof(n_mag(i),j)) = magnet_mass;
    end
end

Check = nr_elem
m_elem = m_elem';
fclose (eFile);
fclose (pFile);

%% ------ Liste masses -----------------------------------------------
for i = 1:n_nodes
  Mass(i) = M(i*n_dof-n_dof+3,i*n_dof-n_dof+3);
end
Masses_par_noeud = [ [1:n_nodes]' Mass' ];
Mass_total = sum(Mass)
```

Geom_trans

```
function [modes2act, act2modes] = geom_trans ()

% Linear transform matrix from mirror modes to actuator displacements
%-------------------------------------------------------------
modes2act = [ 1  1  1  1  1 ;
              0 -1  1 -1  1 ;
              0  1  1 -1 -1 ;
              0  1  1  1  1 ;
              0  1 -1 -1  1 ]';
act2modes = inv(modes2act);
```

heads_gravity_effect

```
%% heads_gravity_effect

%% Analyse statique-----------------------------------------

Mag = 10;

% ------ Boundary conditions ------------------------------------
  bc = []; b = [];
  [b,bc,nb] = fix_point (bc,[n_fix],Dof);

%% effet g sur structure horizontal
p = zeros(size(K,1),1);   % initialisation du vecteur des charges

for i= 1:n_nodes
    dof_exc = (i-1)*n_dof + 3;
    p(dof_exc) = 9.8162 * M(dof_exc, dof_exc);
end

[X R xyz Rf] = FE_stat (K,p,b,n_dof,n_nodes);

Ed = extract (Edof,X);
Ed4 = extract (Edof4,X);
figure;
femdraw3 (Coord,Ex,Ey,Ez,[1 4 2 4 0.]);
femdisp3 (Ex,Ey,Ez,Ed,[1 5 0 5],Mag); ylabel('z');
hold on;   surf (XD,YD,ZD*Mag);
femdraw3 (Coord,E4x,E4y,E4z,[1 4 2 4 0.],Edof4(:,1));
femdisp3 (E4x,E4y,E4z,Ed4,[1 5 0 5],Mag); ylabel('z');
grid; axis('equal');
title('Analyse statique miroir à l''horizontal');


figure
femdisp3 (E4x,E4y,E4z,Ed4,[1 4 0],Mag*1e3); ylabel('y');
```

```
title('Analyse statique de la surface du miroir à l''horizontal');

figure;
     Edb4xy = [Ed4(:,1) Ed4(:,2) Ed4(:,7) Ed4(:,8) Ed4(:,13) Ed4(:,14)
Ed4(:,19) Ed4(:,20)];
     femdisp2 (E4x,E4y,Edb4xy,[1 5 0 5],Mag*1e5);
     title('Static analysis - surface miroir à l''horizontal plan xy');

figure;
     Edb4yz = [Ed4(:,2) Ed4(:,3) Ed4(:,8) Ed4(:,9) Ed4(:,14) Ed4(:,15)
Ed4(:,20) Ed4(:,21)];
     femdisp2 (E4y,E4z,Edb4yz,[1 5 0 5],Mag*1e3);
     title('Static analysis - surface miroir à l''horizontal plan yz ');

figure;
     Edb4xz = [Ed4(:,1) Ed4(:,3) Ed4(:,7) Ed4(:,9) Ed4(:,13) Ed4(:,15)
Ed4(:,19) Ed4(:,21)];
     femdisp2 (E4x,E4z,Edb4xz,[1 5 0 5], Mag*1e3);
     title('Static analysis - surface miroir à l''horizontal plan xz ');


%% effet g sur structure verticale g selon y

p = zeros(size(K,1),1);    % initialisation du vecteur des charges

for i=2:6:size(K,1)-4
p(i) = 9.81*M(i,i);
end

[X R xyz Rf] = FE_stat (K,p,b,n_dof,n_nodes);
Ed = extract (Edof,X);
Ed4 = extract (Edof4,X);
figure; femdraw3 (Coord,Ex,Ey,Ez,[1 7 2 1]);
femdisp3 (Ex,Ey,Ez,Ed,[1 4 0],Mag*5); ylabel('y');
hold on;   surf (XD,YD,ZD);
femdraw3 (Coord,E4x,E4y,E4z,[1 7 2 1],Edof4(:,1));
femdisp3 (E4x,E4y,E4z,Ed4,[1 4 0],Mag*5); ylabel('y');
grid; axis('equal');
title('Analyse statique miroir à la vertical');



figure
femdisp3 (E4x,E4y,E4z,Ed4,[1 4 0],Mag*5e1); ylabel('y');
title('Analyse statique de la surface du miroir à la verticale');

figure;
     Edb4xy = [Ed4(:,1) Ed4(:,2) Ed4(:,7) Ed4(:,8) Ed4(:,13) Ed4(:,14)
Ed4(:,19) Ed4(:,20)];
     femdisp2 (E4x,E4y,Edb4xy,[1 5 0 5],Mag*1e5);
     title('Static analysis - surface miroir à la verticale plan xy');

figure;
     Edb4yz = [Ed4(:,2) Ed4(:,3) Ed4(:,8) Ed4(:,9) Ed4(:,14) Ed4(:,15)
Ed4(:,20) Ed4(:,21)];
     femdisp2 (E4y,E4z,Edb4yz,[1 5 0 5],Mag*5e1);
     title('Static analysis - surface miroir à la verticale plan yz ');
```

```
figure;
     Edb4xz = [Ed4(:,1) Ed4(:,3) Ed4(:,7) Ed4(:,9) Ed4(:,13) Ed4(:,15)
Ed4(:,19) Ed4(:,21)];
     femdisp2 (E4x,E4z,Edb4xz,[1 5 0 5], Mag*5e1);
     title('Static analysis - surface miroir à la verticale plan xz ');

%% effet g sur structure verticale

p = zeros(size(K,1),1);   % initialisation du vecteur des charges

for i=1:6:size(K,1)-5
p(i) = 9.81*M(i,i);
end

[X R xyz Rf] = FE_stat (K,p,b,n_dof,n_nodes);
Ed = extract (Edof,X);
Ed4 = extract (Edof4,X);
figure; femdraw3 (Coord,Ex,Ey,Ez,[1 7 2 1]);
femdisp3 (Ex,Ey,Ez,Ed,[1 4 0],Mag); ylabel('y');
hold on;   surf (XD,YD,ZD);
femdraw3 (Coord,E4x,E4y,E4z,[1 7 2 1],Edof4(:,1));
femdisp3 (E4x,E4y,E4z,Ed4,[1 4 0],Mag); ylabel('y');
grid; axis('equal');
title('Analyse statique miroir à la vertical');


figure
femdisp3 (E4x,E4y,E4z,Ed4,[1 4 0],Mag*1e2); ylabel('y');

figure;
     Edb4xy = [Ed4(:,1) Ed4(:,2) Ed4(:,7) Ed4(:,8) Ed4(:,13) Ed4(:,14)
Ed4(:,19) Ed4(:,20)];
     femdisp2 (E4x,E4y,Edb4xy,[1 5 0 5],Mag*1e5);
     title('Static analysis - surface miroir à la verticale plan xy');

figure;
     Edb4yz = [Ed4(:,2) Ed4(:,3) Ed4(:,8) Ed4(:,9) Ed4(:,14) Ed4(:,15)
Ed4(:,20) Ed4(:,21)];
     femdisp2 (E4y,E4z,Edb4yz,[1 5 0 5],Mag*5e1);
     title('Static analysis - surface miroir à la verticale plan yz ');

figure;
     Edb4xz = [Ed4(:,1) Ed4(:,3) Ed4(:,7) Ed4(:,9) Ed4(:,13) Ed4(:,15)
Ed4(:,19) Ed4(:,21)];
     femdisp2 (E4x,E4z,Edb4xz,[1 5 0 5], Mag*5e1);
     title('Static analysis - surface miroir à la verticale plan xz ');
```

FE_stat

```
function [X,R,xyz,RF] = FE_stat (K,p,b,n_dof,n_nodes)

% ----- static analysis -------------------------------------
if length(b)==0
   [X,R] = solveq (K,p);
else
   [X,R] = solveq (K,p,b);
end

  xyzt = reshape (X,n_dof,n_nodes);
  xyz = xyzt';
  RFt = reshape (R,n_dof,n_nodes);
  RF = RFt';
```

heads_static

```
% HEADS static run
warning('off','MATLAB:dispatcher:InexactMatch')
label = ['Z     ';'Tilt-X';'Tilt-Y';'Focus ';'Astigm';];
Mag = 0.005;
for j=1:4
for i = 1:5
% ------ Boundary conditions ---------------------------------
  bc = []; b = [];
  [b,bc,nb] = fix_point (bc,[n_fix],Dof);
%  ------ Load ---------------------------------
  u = zeros(5,1);
  u(i) = 0.0001;   % 0.1 mm modal displacement
  u_act = modes2act*u;


  displ = zeros(size(K,1),1);
  dof_act = (n_act-1).*n_dof+3;
  displ(dof_act) = u_act;
  disp ([label(i,:)])

  b = [ b; dof_act' displ(dof_act) ];

  if j==1
  p = zeros(size(K,1),1);
  end
  if j==2
    for k=3:6:size(K,1)-3
    p(k) = 9.81*M(k,k);
    end
```

```
  end
  if j==3
    for k=2:6:size(K,1)-4
    p(k) = 9.81*M(k,k);
    end
  end
  if j==4
    for k=1:6:size(K,1)-5
    p(k) = 9.81*M(k,k);
    end
  end

  [X,R,xyz,RF] = FE_stat (K,p,b,n_dof,n_nodes);
  Edb = extract(Edof,X);
  Edb4=extract(Edof4,X);
  Act_disp = xyz(n_act,3)
  Act_forces = RF(n_act,3)


%   if (j>1)
%     figure;
%     Edbxz = [Edb(:,1) Edb(:,3) Edb(:,5) Edb(:,7) Edb(:,9) Edb(:,11)];
%     femdisp2 (Ex,Ez,Edbxz,[1 5 0 5], Mag); xlabel('x'); ylabel('z');
%     Edb4xz = [Edb4(:,1) Edb4(:,3) Edb4(:,7) Edb4(:,9) Edb4(:,13)
Edb4(:,15) Edb4(:,19) Edb4(:,21)];
%     femdisp2 (E4x,E4z,Edb4xz,[1 5 0 5], Mag);
%     title(['Static analysis - ' label(i,:)])
%     grid on
%
%     figure;
%     Edbyz = [Edb(:,2) Edb(:,3) Edb(:,4) Edb(:,8) Edb(:,9) Edb(:,10)];
%     Edb4yz = [Edb4(:,2) Edb4(:,3) Edb4(:,8) Edb4(:,9) Edb4(:,14)
Edb4(:,15) Edb4(:,20) Edb4(:,21)];
%     femdisp2 (E4y,E4z,Edb4yz,[1 5 0 5],Mag);
%     femdisp2 (Ey,Ez,Edbyz,[1 5 0 5],Mag); xlabel('y'); ylabel('z')
%     grid on
%
%     figure;
%     Edbxy = [Edb(:,1) Edb(:,2) Edb(:,6) Edb(:,7) Edb(:,8) Edb(:,12)];
%     Edb4xy = [Edb4(:,1) Edb4(:,2) Edb4(:,7) Edb4(:,8) Edb4(:,13)
Edb4(:,14) Edb4(:,19) Edb4(:,20)];
%     femdisp2 (E4x,E4y,Edb4xy,[1 5 0 5],Mag);
%     femdisp2 (Ex,Ey,Edbxy,[1 5 0 5],Mag); xlabel('x'); ylabel('y')
%     title(['Static analysis - ' label(i,:)])
%   end
end
end
```

heads_eigen

```
% Eigenmode run
% ------ Boundary conditions ------------------------------------
bc = [];
[b,bc,nb] = fix_point (bc,[n_fix],Dof);

mdof = sdt_mdof(n_nodes,n_dof);
adof = sdt_adof(n_nodes,n_dof,Dof,bc);

disp ('... computing eigenmodes')
[Egv,freqrad] = fe_eig (M,K,[4,20],mdof,adof);
Freq = freqrad/2/pi;

for i = [1:6]
  heads_modes
(Coord,Dof,NN,Ex,Ey,Ez,Edof,E4x,E4y,E4z,Edof4,real(Egv),real(Freq),i,0.001)
;
end
```

heads_mode

```
% ----- plot one eigenmode ---------------------------------------

function Mag = heads_modes
(Coord,Dof,NN,Ex,Ey,Ez,Edof,E4x,E4y,E4z,Edof4,Egv,Freq,Nf,Mag)
 global XD YD
 if nargin <= 10;
      Mag = 0.2;
 end
 T = ['Eigenmode nr. ' num2str(Nf) '    f = ' num2str(Freq(Nf),'%10.1f') '
Hz'];
 figure
 Edb=extract(Edof,Egv(:,Nf));
 Edb4=extract(Edof4,Egv(:,Nf));
 nDof = [(1:length(Coord))' Dof];
 for i = 1:9
    for j = 1:9
        disp_disk = extract (nDof(NN(i,j),1:4), Egv(:,Nf));
        ZM(i,j) = Coord(NN(i,j),3) + disp_disk(3);
        Col(i,j) = 1;
    end
 end

 subplot (2,2,1); hold on
 % femdraw3 (Coord,E4x,E4y,E4z,[1 7 2 5 0.],Edof4(:,1));
 femdraw3 (Coord,Ex,Ey,Ez,[1 4 2 4 0.]);
 surf (XD,YD,ZM*Mag);
```

```
 femdisp3 (Ex,Ey,Ez,Edb,[1 5 0 5],Mag); grid;
 femdisp3 (E4x,E4y,E4z,Edb4,[1 5 0 5],Mag); grid;
 title(T)

 subplot (2,2,2)
 Coord_xy(:,1) = Coord(:,1);    Coord_xy(:,2) = Coord(:,2);
 femdraw2 (Coord_xy,E4x,E4y,[1 7 2 5 0.],Edof4(:,1)); hold on
 femdraw2 (Coord,Ex,Ey,[2 4 2 4 0.]);
 Edbxy = [Edb(:,1) Edb(:,2) Edb(:,6) Edb(:,7) Edb(:,8) Edb(:,12)];
 Edb4xy = [Edb4(:,1) Edb4(:,2) Edb4(:,7) Edb4(:,8) Edb4(:,13) Edb4(:,14)
Edb4(:,19) Edb4(:,20)];
 femdisp2 (E4x,E4y,Edb4xy,[1 5 0 5],Mag);
 femdisp2 (Ex,Ey,Edbxy,[1 5 0 5],Mag);

 subplot (2,2,3)
 Coord_xz(:,1) = Coord(:,1);    Coord_xz(:,2) = Coord(:,3);
 femdraw2 (Coord_xz,E4x,E4z,[1 7 2 5 0.],Edof4(:,1));  hold on
 femdraw2 ([Coord(:,1) Coord(:,3)],Ex,Ez,[2 4 2 4 0.]);
 Edbxz = [Edb(:,1) Edb(:,3) Edb(:,5) Edb(:,7) Edb(:,9) Edb(:,11)];
 Edb4xz = [Edb4(:,1) Edb4(:,3) Edb4(:,7) Edb4(:,9) Edb4(:,13) Edb4(:,15)
Edb4(:,19) Edb4(:,21)];
 femdisp2 (E4x,E4z,Edb4xz,[1 5 0 5],Mag);
 femdisp2 (Ex,Ez,Edbxz,[1 5 0 5],Mag); ylabel('z')

 subplot (2,2,4)
 Coord_yz(:,1) = Coord(:,2);    Coord_yz(:,2) = Coord(:,3);
 femdraw2 (Coord_yz,E4x,E4z,[1 7 2 5 0.],Edof4(:,1));  hold on
 femdraw2 ([Coord(:,2) Coord(:,3)],Ey,Ez,[2 4 2 4 0.]);
 Edbyz = [Edb(:,2) Edb(:,3) Edb(:,4) Edb(:,8) Edb(:,9) Edb(:,10)];
 Edb4yz = [Edb4(:,2) Edb4(:,3) Edb4(:,8) Edb4(:,9) Edb4(:,14) Edb4(:,15)
Edb4(:,20) Edb4(:,21)];
 femdisp2 (E4y,E4z,Edb4yz,[1 5 0 5],Mag); xlabel('y'); ylabel('z')
 femdisp2 (Ey,Ez,Edbyz,[1 5 0 5],Mag); xlabel('y'); ylabel('z')
```

heads_lti

```
function [sys sysd] = heads_lti (mdof,n_act,freqrad,Egv,w)

nm = size(Egv,2);
zm = zeros(size(Egv));

% Inputs (drivers)
b_Mot1 = fe_c(mdof,n_act(1)+0.03,1);
b_Mot2 = fe_c(mdof,n_act(2)+0.03,1);
b_Mot3 = fe_c(mdof,n_act(3)+0.03,1);
b_Mot4 = fe_c(mdof,n_act(4)+0.03,1);
b_Mot5 = fe_c(mdof,n_act(5)+0.03,1);
pb1 = Egv'*b_Mot1';
pb2 = Egv'*b_Mot2';
pb3 = Egv'*b_Mot3';
pb4 = Egv'*b_Mot4';
pb5 = Egv'*b_Mot5';
```

```
pb = [pb1 pb2 pb3 pb4 pb5];

% Outputs
c_S1 = fe_c(mdof,n_act(1)+0.03,1);  cp1  = c_S1*Egv;
c_S2 = fe_c(mdof,n_act(2)+0.03,1);  cp2  = c_S2*Egv;
c_S3 = fe_c(mdof,n_act(3)+0.03,1);  cp3  = c_S3*Egv;
c_S4 = fe_c(mdof,n_act(4)+0.03,1);  cp4  = c_S4*Egv;
c_S5 = fe_c(mdof,n_act(5)+0.03,1);  cp5  = c_S5*Egv;

cp = [ cp1 zeros(1,nm); cp2 zeros(1,nm); cp3 zeros(1,nm);
       cp4 zeros(1,nm); cp5 zeros(1,nm) ];

[a,b,c,d] = nor2ss (freqrad,0.02,pb,cp);
sys = ss(a,b,c,d);
size(sys)


Ts=1e-6;
sysd = c2d(sys,Ts);


figure
 pzmap(sys)
 figure
 pzmap(sysd,'r')

warning off
figure; bode (sys(1,1) ,'r',w);
title ('Open loop response S_1/F_1')
warning on

warning off
figure; bode (sys(2,2) ,'r',w);
title ('Open loop response S_1/F_1')
warning on
```

reduction_model

```
[rsys,g] = balreal(tf(sys(1,1)));  % Compute balanced realization
elim = (g<  0.000008934890899);        % Small entries of g are negligible
states
rsys = modred(rsys,elim); % Remove negligible states

zpk(rsys)



figure
bode(2*rsys)
hold on
```

```
bode(sys(1,1))
bode(sys(2,2))

zero(2*rsys)
pole(2*rsys)
```

dim_PD_ret2

```
%% dimensionnement PD

Tref    = 1e-4; %Kp=1
Gct1    = tf(1*[15*Tref 1],[Tref 1]);
Gct2    = tf(1*[16*Tref 1],[Tref 1]);
Gct3    = tf(1*[17*Tref 1],[Tref 1]);
Gct4    = tf(1*[18*Tref 1],[Tref 1]);

Gct5    = tf(19*10^(78.2/20)*[18*Tref 1],1);

figure
bode(sys(1,1)*Gct1, sys(1,1)*Gct2, sys(1,1)*Gct3, sys(1,1)*Gct4 )

Gct1    = tf(1*[5*Tref 1],[Tref 1]);
Gct2    = tf(1*[6*Tref 1],[Tref 1]);
Gct3    = tf(1*[7*Tref 1],[Tref 1]);
Gct4    = tf(1*[8*Tref 1],[Tref 1]);

Gct6    = tf(19*10^(98.4/20)*[8*Tref 1],[Tref 1]);

figure
bode(sys(1,1)*Gct1, sys(1,1)*Gct2, sys(1,1)*Gct3, sys(1,1)*Gct4 )


figure
bode(sys(1,1)*Gct5, sys(1,1)*Gct5*tf([0 1],[1e-4 1]), sys(1,1)*Gct5*tf([0
1],[1e-3 1]), sys(1,1)*Gct5*tf([0 1],[1e-2 1]) )
legend('sans intégrateur','Ti=1e-4','Ti=1e-3','Ti=1e-2')
title('système actuateur central régulé pou 100Hz')

Gct1    = tf(1*[15*Tref 1],[Tref 1]);
Gct2    = tf(1*[16*Tref 1],[Tref 1]);
Gct3    = tf(1*[17*Tref 1],[Tref 1]);
Gct4    = tf(1*[18*Tref 1],[Tref 1]);


figure
bode(sys(2,2)*Gct1, sys(2,2)*Gct2, sys(2,2)*Gct3, sys(2,2)*Gct4 )

Gct1    = tf(1*[5*Tref 1],[Tref 1]);
Gct2    = tf(1*[6*Tref 1],[Tref 1]);
Gct3    = tf(1*[7*Tref 1],[Tref 1]);
Gct4    = tf(1*[8*Tref 1],[Tref 1]);
```

```
Gct7    = tf(19*10^(65.7/20)*[16*Tref 1],[Tref 1]);


figure
bode(sys(2,2)*Gct1, sys(2,2)*Gct2, sys(2,2)*Gct3, sys(2,2)*Gct4 )

Gct8    = tf(19*10^(87.4/20)*[8*Tref 1],[Tref 1]);


figure;
subplot(2,2,1)
step(feedback(sys(1,1)*Gct5,1))
subplot(2,2,2)
step(feedback(sys(1,1)*Gct6,1))
subplot(2,2,3)
step(feedback(sys(2,2)*Gct7,1))
subplot(2,2,4)
step(feedback(sys(2,2)*Gct8,1))
```

regul_comp_filter

```
%réglage avec filtre compensateur

figure; bode (sys(1,1) ,'r',w);
title('fonction de transfert du noeud central')
hold on
bode (sys(2,2) ,'b',w);
title('fonction de transfert du noeud central en rouge et celles des noeuds
extérieurs en bleu')
hold off

figure; bode (sys(1,1)*tf(1,[1e-4 1]) ,'r',w);
title('fonction de transfert du noeud central')
hold on
bode (sys(2,2)*tf(1,[1e-4 1]) ,'b',w);
title('fonction de transfert du noeud central en rouge et celles des noeuds
extérieurs en bleu avec retard de 1e-4')
hold off



%% inté

Kp1=100000;
N1=5;
b1=500;
ld=tf(Kp1*N1*[1 b1],[1 b1*N1]);

Kp5=3;
N5=2;
b5=400;
```

```
ld5=tf(Kp5*N5*[1 b5],[1 b5*N5]);

figure; bode (ld*ld5*sys(1,1)*tf(1,[1e-4 1]) ,'r',w)
hold on
bode (sys(1,1) *tf(1,[1e-4 1]),'b',w)
title('Fonction de transfert du noeud central retardée et compensée en
rouge et celle non compensée ')

%% exté

Kp2=10;
N2=3;
b2=600;
ld2=tf(Kp2*N2*[1 b2],[1 b2*N2]);

Kp3=10;
N3=310/260;
b3=260;
ld3=tf(Kp3*N3*[1 b3],[1 b3*N3]);

Kp4=1000;
N4=490/350;
b4=350;
ld4=tf(Kp4*N4*[1 b4],[1 b4*N4]);

Kp6=1;
N6=1.5;
b6=1800;
ld6=tf(Kp6*N6*[1 b6],[1 b6*N6]);

Kp7=1;
N7=1.5;
b7=2000;
ld7=tf(Kp7*N7*[1 b7],[1 b7*N7]);

figure; bode (ld2*ld3*ld4*ld6*ld7*sys(2,2)*tf(1,[1e-4 1]) ,'r',w)
hold on
bode (sys(2,2)*tf(1,[1e-4 1]) ,'b',w)
title('Fonction de transfert des noeuds extérieurs retardée et compensée en
rouge et celle non compensée ')

comp2=ld2*ld6*ld7*ld3*ld4;

comp1=ld*ld5;

figure;step(comp1*sys(1,1),1)
figure;step(comp2*sys(2,2),1)

figure;step(feedback(comp1*sys(1,1),1))
figure;step(feedback(comp2*sys(2,2),1))

figure;step(feedback(comp1*sys(1,1),tf(1,[1e-5 1])))
figure;step(feedback(comp2*sys(2,2),tf(1,[1e-5 1])))
figure;step(feedback(comp1*sys(1,1),tf(1,[1e-6 1])))
figure;step(feedback(comp2*sys(2,2),tf(1,[1e-6 1])))

% mauvaise réponse au retard
```

```
comp1_d=c2d(comp1,1e-6);
comp2_d=c2d(comp2,1e-6);




%% régulation actionneur
t_bo=1;
t_bf=.0001;
% piston
figure
subplot(1,2,1)
step(sys(1,1),t_bo)
subplot(1,2,2)
bode(sys(1,1),w)
figure;step(feedback(sys(1,1),1))


Kp=10000000;
Ti=1e-1;
Td=1e-3;

pid=tf(Kp*[Td*Ti Ti 1],[Ti 0]);

sys_pis=sys(1,1)*pid;

figure
subplot(1,2,1)
step(feedback(sys_pis,1),t_bf)
subplot(1,2,2)
bode(sys_pis,w)

% tilt-x
figure
subplot(1,2,1)
step(sys(2,2),t_bo)
subplot(1,2,2)
bode(sys(2,2),w)

Kp=10000000;
Ti=1e-1;
Td=1e-3;

pid=tf(Kp*[Td*Ti Ti 1],[Ti 0]);

sys_tilt_x=sys(2,2)*pid;

figure
subplot(1,2,1)
step(feedback(sys_tilt_x,1),t_bf)
subplot(1,2,2)
bode(sys_tilt_x,w)

% tilt-y
figure
```

```
subplot(1,2,1)
step(sys(3,3),t_bo)
subplot(1,2,2)
bode(sys(3,3),w)

Kp=10000000;
Ti=1e-1;
Td=1e-3;

pid=tf(Kp*[Td*Ti Ti 1],[Ti 0]);

sys_tilt_y=sys(2,2)*pid;

figure
subplot(1,2,1)
step(feedback(sys_tilt_y,1),t_bf)
subplot(1,2,2)
bode(sys_tilt_y,w)

% focus
figure
subplot(1,2,1)
step(sys(4,4),t_bo)
subplot(1,2,2)
bode(sys(4,4),w)

Kp=10000000;
Ti=1e-1;
Td=1e-3;

pid=tf(Kp*[Td*Ti Ti 1],[Ti 0]);

sys_focus=sys(4,4)*pid;

figure
subplot(1,2,1)
step(feedback(sys_focus,1),t_bf)
subplot(1,2,2)
bode(sys_focus,w)

% astigmatim
figure
subplot(1,2,1)
step(sys(5,5),t_bo)
subplot(1,2,2)
bode(sys(5,5),w)

Kp=10000000;
Ti=1e-1;
Td=1e-3;

pid=tf(Kp*[Td*Ti Ti 1],[Ti 0]);

sys_astigm=sys(2,2)*pid;

figure
subplot(1,2,1)
step(feedback(sys_astigm,1),t_bf)
```

```
subplot(1,2,2)
bode(sys_astigm,w)

sys_reg=sys;
sys_reg(1,1)=sys_pis;
sys_reg(2,2)=sys_tilt_x;
sys_reg(3,3)=sys_tilt_y;
sys_reg(4,4)=sys_focus;
sys_reg(5,5)=sys_astigm;

figure
step(feedback(sys_reg,eye(5)),t_bf)

figure
step(modes2act*feedback(sys_reg,eye(5)),t_bf)

%% ajout retard 0.5, 1 et 2 ms

Gmt1     = tf(1,[40e-3 1]);
Gmt2     = tf(1,[80e-3 1]);
Gmt3     = tf(1,[160e-3 1]);
Gmt4     = tf(1,[320e-3 1]);
Gmt5     = tf(1,[640e-3 1]);

% figure
% step(modes2act*feedback(sys_reg,Gmt1*eye(5)),t_bf)
% figure
% step(modes2act*feedback(sys_reg,Gmt2*eye(5)),t_bf)
% figure
% step(modes2act*feedback(sys_reg,Gmt3*eye(5)),t_bf)


sys_ret=Gmt1*sys;
figure
bode(sys_ret,w)

Kp=1000000;
Ti=10;
Td=10;

pid=tf(Kp*[Td*Ti Ti 1],[Ti 0]);

figure;bode(pid*eye(5)*sys_ret)
figure;step(modes2act*feedback(pid*sys_ret,eye(5)),t_bf)

sys_ret2=Gmt2*sys;
figure
bode(sys_ret2,w)

Kp=1000000;
Ti=10;
Td=100;

pid=tf(Kp*[Td*Ti Ti 1],[Ti 0]);

figure;bode(pid*eye(5)*sys_ret2)
figure;step(modes2act*feedback(pid*sys_ret2,eye(5)),t_bf)
```

```
sys_ret3=Gmt3*sys;
figure
bode(sys_ret3,w)

Kp=1000000;
Ti=10;
Td=100;

pid=tf(Kp*[Td*Ti Ti 1],[Ti 0]);

figure;bode(pid*eye(5)*sys_ret3)
figure;step(modes2act*feedback(pid*sys_ret3,eye(5)),t_bf)

sys_ret4=Gmt4*sys;
figure
bode(sys_ret4,w)

Kp=1000000;
Ti=10;
Td=100;

pid=tf(Kp*[Td*Ti Ti 1],[Ti 0]);

figure;bode(pid*eye(5)*sys_ret4)
figure;step(modes2act*feedback(pid*sys_ret4,eye(5)),t_bf)

sys_ret5=Gmt5*sys;
figure
bode(sys_ret5,w)

Kp=1000000;
Ti=10;
Td=100;

pid=tf(Kp*[Td*Ti Ti 1],[Ti 0]);

figure;bode(pid*eye(5)*sys_ret5)
figure;step(modes2act*feedback(pid*sys_ret5,eye(5)),t_bf)
```