

# **Miroirs Thermiquement Déformables : un nouveau schéma d'Optique Adaptative pour les Interféromètres Avancés dédiés à la détection d'ondes gravitationnelles**

**Marie Kasprzack**

**Directeur de thèse : Fabien Cavalier (LAL)**

## **Résumé en français**

### **Introduction**

Bien que l'existence des ondes gravitationnelles soit une conséquence de la théorie de la relativité générale d'Einstein, aucune observation directe de ce phénomène n'a pu être effectuée jusqu'à ce jour, et ce en dépit d'une traque qui se développe depuis une cinquantaine d'années autour d'instruments variés. La raison principale de cet insuccès réside dans la nature des interactions que les ondes gravitationnelles entretiennent avec la matière: leur effet sur les objets est extrêmement tenu. Les détecter parmi les sources de bruit inhérentes aux outils de mesure est donc un défi pour la physique d'aujourd'hui. Les interféromètres gravitationnels de nouvelle génération, dits avancés, qui sont actuellement en développement de part le monde, sont les instruments les plus prometteurs pour une première détection dans les années à venir.

Pour atteindre leur sensibilité nominale, ces détecteurs vont utiliser des lasers continus haute puissance. En contrepartie, ils vont devenir sensibles aux effets thermiques qui se produisent dans les composants optiques tout au long du parcours du faisceau laser dans l'instrument. Ces déformations thermiques vont engendrer une dégradation générale de la qualité du mode fondamental du faisceau laser. En particulier, le couplage du faisceau dans l'interféromètre va diminuer, conduisant à des pertes de puissance et à une possible augmentation du couplage des bruits parasites, ainsi affectant la sensibilité de l'interféromètre.

L'objectif de cette thèse est de proposer un nouveau système d'optique adaptative, dédié aux interféromètres gravitationnels avancés, et basé sur un nouvel outil de correction optique: le Miroir Thermiquement Déformable (TDM). Pour satisfaire les rigoureuses contraintes imposées par l'intégration du système dans l'interféromètre en termes de bruit et de compatibilité optique, les actionneurs de cet outil fonctionnent par activation thermique. Un substrat de haute qualité optique est mis en contact avec une matrice de résistances dont la puissance dissipée peut être réglée individuellement. L'absorption de puissance dans le substrat génère un gradient de température et par conséquent change localement la valeur de l'indice de réfraction. Un faisceau laser passant au travers du miroir et se reflétant sur la face arrière va expérimenter une variation de phase qui va modifier son front d'onde.

En choisissant de manière précise les valeurs de puissance délivrées par les résistances, le TDM va être capable de corriger les aberrations de front d'onde du faisceau laser incident.

### **Structure de la thèse**

Dans le premier chapitre, les principales caractéristiques des ondes gravitationnelles, décrites comme une conséquence de la Relativité Générale sont rappelées. Un des détecteurs de nouvelle génération, Advanced Virgo est décrit ainsi qu'un bref résumé des

sources principales de bruit. Les effets thermiques se produisant aux différents niveaux de l'interféromètre sont également présentés.

Dans le second chapitre, un état de l'art des systèmes d'optique adaptative est proposé, accompagné d'une étude sur leur compatibilité avec l'environnement d'un détecteur gravitationnel. En particulier, une analyse des systèmes thermiques est réalisée afin de déterminer leur conformité à nos exigences. Après que la nécessité de bénéficier d'un nouvel outil ait été établie, nous commençons la description du TDM par une étude approfondie des propriétés d'actuation au chapitre 3. Les caractéristiques thermiques et opto-mécaniques de plusieurs substrats sont comparées pour choisir le matériau le mieux adapté à nos besoins. Au chapitre 4 une configuration du système est proposée à partir de la description des aberrations rencontrées dans un système optique. En particulier, la fréquence spatiale requise pour la matrice de résistances est justifiée. Deux prototypes sont ensuite caractérisés au chapitre 5. Une analyse approfondie de leurs propriétés est réalisée au travers de leur performance en termes de génération d'aberrations optiques précédemment étudiées.

Dans les deux derniers chapitres, nous étudions l'intégration de ces outils dans un système d'optique adaptative pour améliorer le couplage du faisceau dans une cavité. Tout d'abord, au chapitre 6, nous analysons la suppression des modes d'ordre élevé par l'action combinée de deux TDMs. Nous simulons ensuite un schéma de contrôle dans différentes configurations. Nous en déduisons des propriétés importantes pour l'expérience de correction présentée au chapitre 7. Avec ce système, nous sommes capable de démontrer expérimentalement l'action positive des TDMs sur le couplage du faisceau dans les cavités.

## **Chapitre 1 : Détection des ondes gravitationnelles**

Dans le cadre des faisceaux haute puissance utilisés dans Advanced Virgo, des effets thermiques vont apparaître en différents points de l'interféromètre. Il est crucial de maintenir l'adaptation du faisceau laser dans les cavités résonnantes de Advanced Virgo à son plus haut niveau. En particulier, l'adaptation de faisceau dans les cavités principales aux derniers stades de l'injection ainsi que dans les cavités de filtrage pour la détection va être déterminante pour atteindre la sensibilité requise pour l'interféromètre. Assurer l'adaptation de faisceau dans les cavités de filtrage d'un système de squeezing va également lui permettre de satisfaire aux besoins liés à la sensibilité.

## **Chapitre 2 : Systèmes d'optique adaptative pour l'adaptation modale de faisceau – État de l'Art**

Pour réaliser une adaptation de faisceau, nous avons besoin d'un outil de correction qui soit compatible avec les diverses contraintes sur le vide, le couplage de bruit et la haute qualité optique requise pour une intégration dans l'environnement de l'interféromètre. De plus, l'adaptation de faisceau doit être tenue sous contrôle même dans le cas d'aberrations variant au cours du temps, comme c'est le cas avec les aberrations thermiques dans un interféromètre.

Les systèmes commerciaux sont en passés en revue au début du chapitre. Leurs propriétés sont examinées afin de déterminer leur adéquation à une utilisation pour les détecteurs avancés. Il apparaît que dans les limites actuelles de la technologie, aucun dispositif n'est complètement compatible avec nos besoins, que cela soit en termes de qualité optique, de bruit ou de résistance aux hautes puissances laser. De plus, le point critique demeure la compatibilité au vide. Les outils standards ne sont généralement pas prévus pour être placés sous vide et la plupart des expériences scientifiques utilisent l'optique adaptative en dehors des systèmes sous vide.

Depuis le début des projets autour des détecteurs interférométriques d'ondes gravitationnelles, les aberrations thermiques sont anticipées comme une source potentielle de problèmes et l'idée de les compenser passivement ou activement est présente depuis longtemps. Au cours des dernières années, différents systèmes ont vu le jour pour faire face à ces difficultés et de nouveaux prototypes sont en développement pour les prochaines générations de détecteurs. Tous ces systèmes fournissent une correction par effet thermique.

Les premiers systèmes visent à l'uniformisation de la température dans les principaux miroirs des bras miroirs pour compenser les effets thermiques induits par le faisceau laser haute puissance. Certains d'entre eux sont d'hors et déjà inclus dans Advanced Virgo, comme les anneaux chauffants (Ring Heaters), les lasers CO<sub>2</sub> ou encore les projecteurs centraux (CHRoCC).

La seconde génération vise quant à elle à optimiser l'adaptation du faisceau dans les cavités. Un exemple en est l'anneau chauffant à quadrants (Quadrant Ring Heater). Le TDM, dont nous proposons l'étude dans cette thèse, fait partie de cette nouvelle génération.

### Chapitre 3 : Principe du Mirror Thermiquement Déformable

Le TDM est un miroir en contact thermique avec un corps chauffant dont la puissance émise peut être contrôlée. Ce peut être une résistance qui dissipe localement de la chaleur dans le substrat. La zone active du système est composée d'une matrice de résistances pour contrôler la différence de chemin optique avec une fréquence spatiale relativement élevée. Le miroir est placé de façon à ce que sa surface anti-réfléchissante soit la première rencontrée par le faisceau laser qui est réfléchi par la face arrière après être passé au travers du substrat (cf. figure 1).

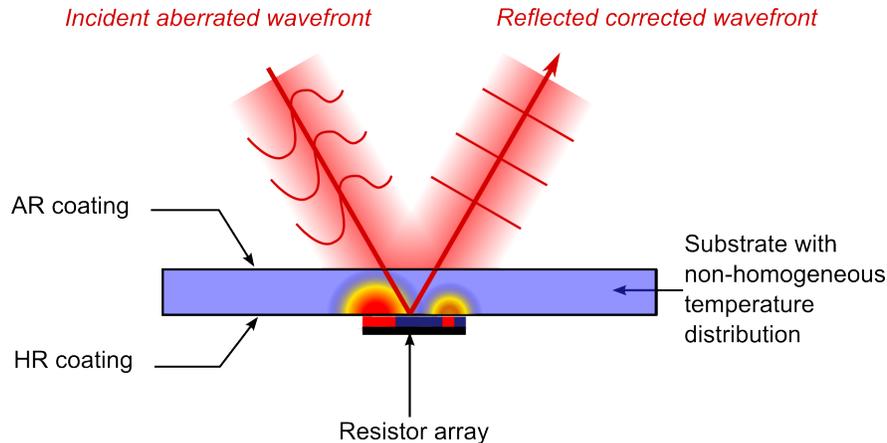


Figure 1 : Principe de fonctionnement du TDM

Il apparaît une différence de chemin optique liée à l'augmentation locale de température. Ceci va nous permettre de contrôler le front d'onde du faisceau laser incident.

Dans ce chapitre, nous étudions le comportement théorique du TDM et nous en définissons les propriétés et les limites. Cette étude est articulée autour de la caractérisation spatiale. La réponse temporelle du système n'étant pas un paramètre critique, elle sera mesurée au chapitre 5.

Tout d'abord, le champ de température généré par un actuateur est modélisé, ce qui nous permet de comparer le TDM à un filtre spatial dont nous déterminons les caractéristiques principales. À partir de l'équation de la chaleur en régime permanent et les conditions aux limites, nous obtenons le champ de température dans le matériau en fonction de la puissance incidente sur une des faces. Dans l'approximation d'un substrat de diamètre infini, nous établissons que la fonction de transfert entre la puissance incidente dans le matériau et la température intégrée sur l'épaisseur est proche de la combinaison d'un filtre passe-bande et d'un filtre passe-bas (cf. figure 2).

Cette étude nous permet de déterminer que les paramètres importants à étudier sont la conductivité thermique du matériau et son épaisseur. Nous pouvons extraire de cette approximation que les hautes fréquences spatiales vont être atténuées en  $1/u^2$  (avec  $u$  la

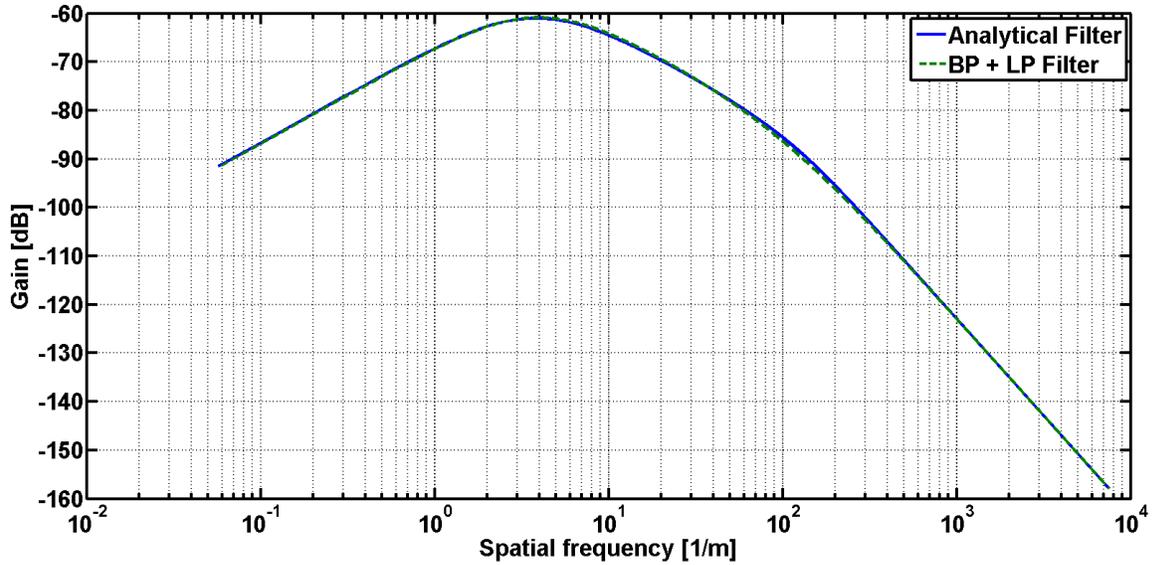


Figure 2 : Filtre spatial représentant la fonction de transfert du TDM.

fréquence spatiale) et les basses fréquences vont être réduites en  $1/u$ . Une augmentation de l'épaisseur augmentera le gain à basse fréquence et une augmentation de la conductivité thermique le diminuera sur toute la gamme de fréquences.

Afin d'obtenir une modélisation plus réaliste du système, nous implémentons une simulation avec un logiciel d'analyse par éléments finis. La linéarité de l'amplitude de la réponse avec la puissance incidente dissipée est vérifiée. Nous trouvons que la réponse du système en fonction de la taille de la résistance modélisée est dominée par les effets de bords du miroir. Cette même réponse est relativement indépendante de l'épaisseur du miroir. Enfin, pour une sélection de verres optiques, nous comparons l'influence du matériau composant le substrat sur la fréquence spatiale d'actuation et son amplitude (cf Figure 3). Le paramètre le plus important est la conductivité thermique, pondéré par les paramètres optiques du matériau. Ceci nous permet de choisir un substrat adapté pour la réalisation des prototypes.

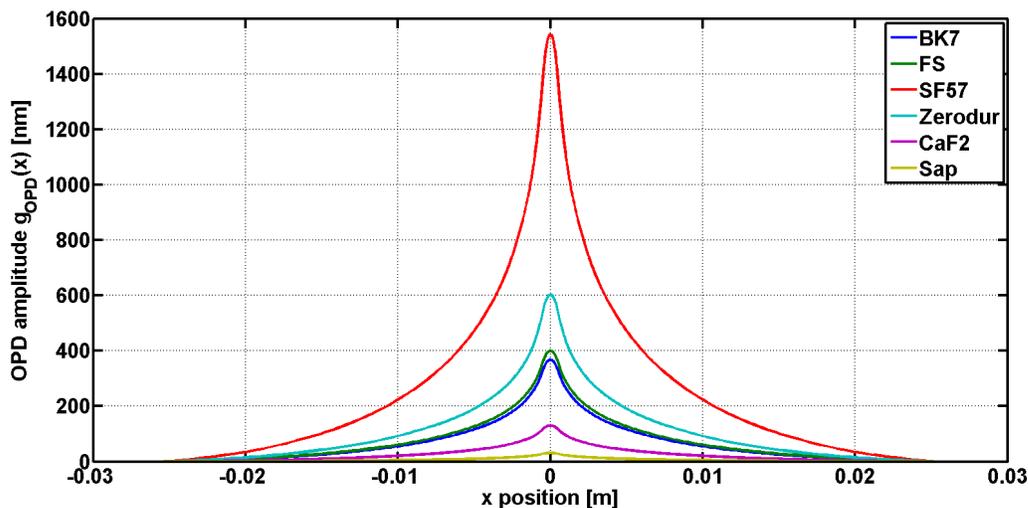


Figure 3 : Réponse du TDM pour différents substrats

## Chapitre 4 : Conception du Mirror Thermiquement Déformable

Nous avons défini dans le chapitre précédent la réponse du système à la puissance dissipée par une résistance. Cette différence de chemin optique est appelée la *fonction d'influence* du TDM. Nous examinons à présent l'interaction de plusieurs actuateurs. En particulier, la densité d'actuateurs sur la surface active est étudiée afin d'effectuer une adaptation de faisceau efficace. Nous montrons en effet à partir d'un modèle simple, qu'elle est déterminante pour la qualité de la correction.

Un faisceau laser idéalement adapté à une cavité présente un front d'onde dont la courbure épouse celle du faisceau résonant dans la cavité en tout plan le long de l'axe optique. Nous définissons les aberrations d'ordre supérieur comme tout écart au front d'onde idéal autre que la courbure moyenne et la direction. Les aberrations dans un système optique sont généralement exprimées sur une base de polynômes orthogonaux. Dans le cadre des faisceaux Gaussiens, elles sont génératrices de modes d'ordre supérieurs. Nous choisissons de travailler avec les polynômes de Zernike pour rapprocher notre système des outils d'optique adaptative traditionnels. Dans le reste du chapitre, nous utilisons un modèle simple pour calculer les corrections à partir de la fonction d'influence centrale obtenue avec la simulation par éléments finis du chapitre précédent.

Nous commençons par extrapoler la taille de la zone active requise à partir des besoins de correction exprimés au chapitre 2, pour contrôler au moins 99% de la puissance sur un faisceau gaussien. Puis nous encadrons la fréquence spatiale de correction par une fréquence minimale et une fréquence maximale. Nous déduisons d'après les propriétés des polynômes que la fréquence spatiale de correction doit être comprise entre  $1/(1.8 \text{ mm})$  et  $1/(0.2 \text{ mm})$ . Pour corriger 10% de découplage de faisceau, l'amplitude de différence de chemin optique produite par les actuateurs doit être au moins de 580 nm de pic à pic ou 85 nm RMS. L'écart entre les actuateurs et leur dimension doivent être choisis soigneusement pour optimiser les performances du système.

Les prototypes testés au chapitre suivant sont ici anticipés. Nous démontrons que leur conception permet de répondre aux besoins exprimés précédemment.

## Chapitre 5 : Tests des prototypes

Après le choix du matériau et la détermination de la géométrie par des simulations, un montage expérimental a été conçu pour tester les performances de deux prototypes de TDM qui ont été réalisés l'un après l'autre. Le montage expérimental, dit montage de caractérisation, est présenté sur la figure 4. Un faisceau laser ( $\lambda = 1064$  nm) est envoyé au centre d'un TDM, après que sa taille ait été ajustée pour recouvrir la zone active. Le TDM reflète le faisceau laser vers un analyseur de front d'onde au travers d'un télescope. Ce dernier permet d'observer les changements de front d'onde du faisceau dans le plan image du TDM. L'analyseur de front d'onde a une précision de 3 nm RMS. Les tests sont effectués avec une pupille de 7 mm de diamètre pour le premier prototype et 8.2 mm pour le second. La pupille est ainsi à l'intérieur de la zone active, pour bénéficier d'un cercle de résistances à sa périphérie, comme recommandé au chapitre 3. Les tests sont effectués sous air.

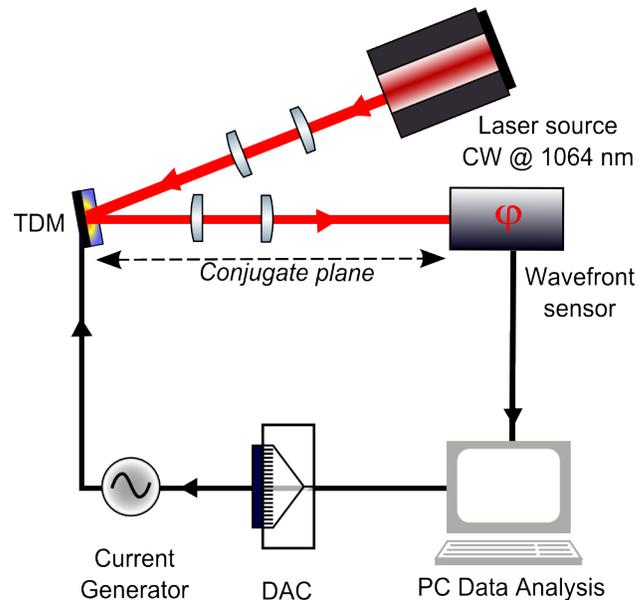


Figure 4 : Montage expérimental de caractérisation du TDM.

Les prototypes et leurs attributs sont présentés. Nous testons ensuite leurs propriétés fondamentales telles que l'amplitude de la réponse du substrat, sa linéarité en fonction de la puissance incidente, sa linéarité à l'activation de plusieurs résistances, la présence d'hystérésis et la motif thermique généré par le réseau de résistances. Nous déterminons ainsi la matrice d'influence de chacun des prototypes.

Nous étudions la génération des polynômes de Zernike pour déduire la correction d'adaptation de faisceau que les prototypes seraient en mesure de produire. Les résultats pour le second prototype sont présentés sur la figure 5.

Ces expériences nous permettent de démontrer que les TDMs sont capables de produire des polynômes de Zernike jusqu'au mode 20 et donc de corriger des aberrations d'ordre élevé. Les facteurs limitants sont la puissance dissipée par les résistances, qui ne doivent pas surchauffer, et leur empreinte résiduelle, liée à l'écart entre elles et à leur forme. La puissance d'actuation restreint le domaine de réponse linéaire du TDM. L'empreinte résiduelle limite la précision de la reproduction des modes. Le premier prototype, en

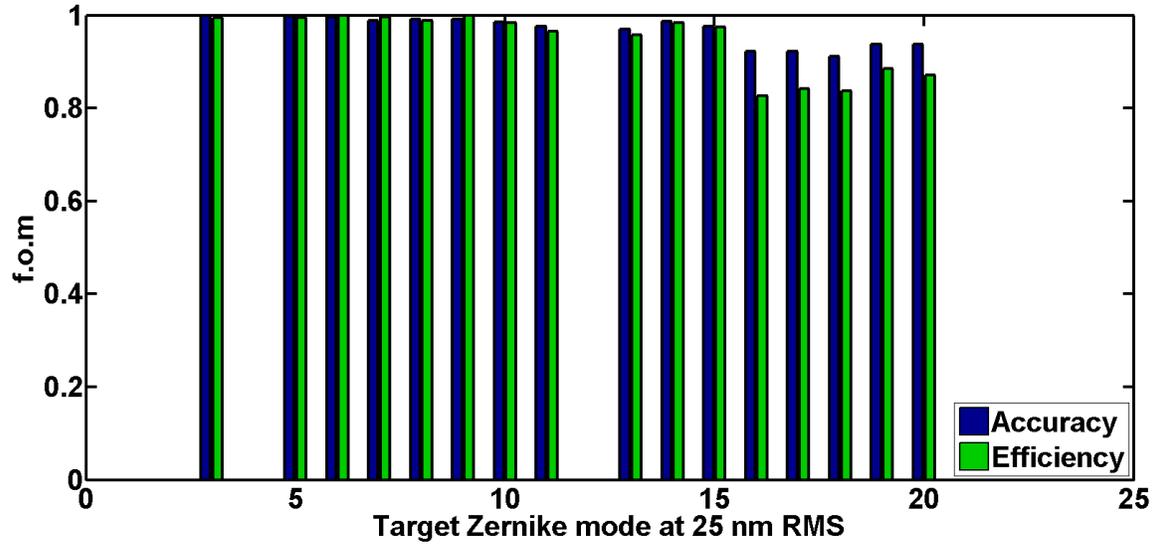


Figure 5 : Évaluation de la qualité des modes de Zernike générés par le second prototype.

particulier, possède un domaine d'actuation relativement faible et est peu fiable. Pour le second prototype, nous pouvons déduire d'un calcul basé sur une intégrale de recouvrement que, pour une désadaptation de faisceau jusqu'à 10% qui serait liée à des aberrations du second, troisième ou quatrième ordre des polynômes de Zernike, le TDM serait capable de réduire la désadaptation à mieux que 1%. De plus, il pourrait également ramener cette désadaptation en dessous de 1% pour des aberrations d'ordre 5 générant 5% de désadaptation. Cela signifie que dans les limites de son domaine d'actuation, le TDM satisfait aux besoins de correction de couplage d'Advanced Virgo.

## Chapitre 6 : Analyse et contrôle du contenu modal du faisceau

Nous avons démontré expérimentalement que le TDM est capable de produire les aberrations communes jusqu'à l'ordre 5 des polynômes de Zernike. Ces mesures ont été réalisées dans le plan de la surface du TDM. Dans ce chapitre, nous explorons la possibilité d'améliorer l'adaptation de faisceau dans une cavité par la réduction des modes gaussiens d'ordre supérieur. Il doit être mentionné que certains modes peuvent être plus ou moins nuisibles selon les applications concernées et que l'effort de correction doit être porté sur ces premiers. Ici nous proposons une approche générale pour la réduction des modes.

Une description complète du faisceau est réalisée sur la base des modes d'Hermite-Gauss. Ce contenu modal est préservé au cours de la propagation du faisceau si aucun défaut n'est rencontré dans le système. La propagation des différents modes est étudiée pour comprendre où et comment agir sur le faisceau pour réduire un mode particulier. Il apparaît que la réduction d'un mode nécessite de compenser la phase de faisceau dans deux plans séparés : cette analyse met en évidence l'importance de la phase de Gouy dans la conception d'un système de correction (cf Figure 6). La forme de la correction peut reproduire la forme de phase du mode concerné. Nous démontrons ainsi qu'il est théoriquement possible de contrôler l'amplitude d'un mode d'ordre supérieur en choisissant des cartes de compensation appropriées et en séparant les TDMs d'une distance représentant un décalage de phase de Gouy pour ce mode. Cependant cela nécessite des informations qui sont difficilement disponibles expérimentalement. Une stratégie de correction reste donc à déterminer. La solution la plus simple pourrait consister à appliquer un motif de correction correspond au mode cible, puis à parcourir la gamme des amplitudes sur chaque TDM pour trouver la meilleure correction. Ceci est testé en chapitre suivant.

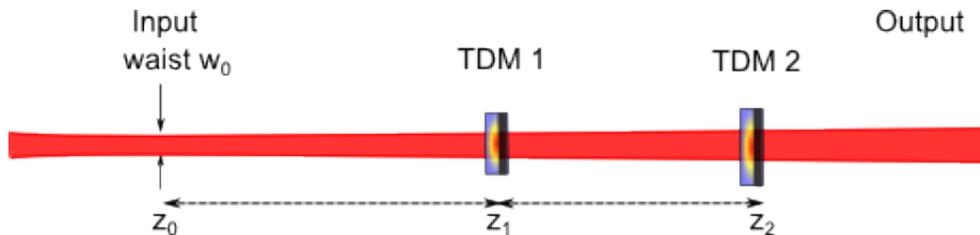


Figure 6 : Principe de la simulation de correction par deux TDMs.

## Chapitre 7 : Contrôle expérimental de l'adaptation de faisceau

Ce chapitre est dédié à la démonstration expérimentale de l'amélioration d'adaptation de faisceau par deux TDMs. Nous montrons qu'il est possible de réduire le contenu en modes d'ordre supérieur.

Le montage de correction comprend deux TDMs séparés par une phase de Gouy définie sur la base des calculs du chapitre précédent. Sur chaque TDM, le faisceau a le diamètre requis de 5.2 mm. Plusieurs télescopes assurent que toutes ces conditions sont remplies. Le faisceau laser est ensuite envoyé sur une cavité résonante fixe, tandis qu'un système de détection (photodiodes et caméras) mesure l'adaptation du faisceau à la cavité. La fréquence du laser est asservie sur la longueur de la cavité par une boucle de contrôle de Pound-Drever-Hall, afin de la maintenir à résonance. Le montage est présenté sur la figure 7.

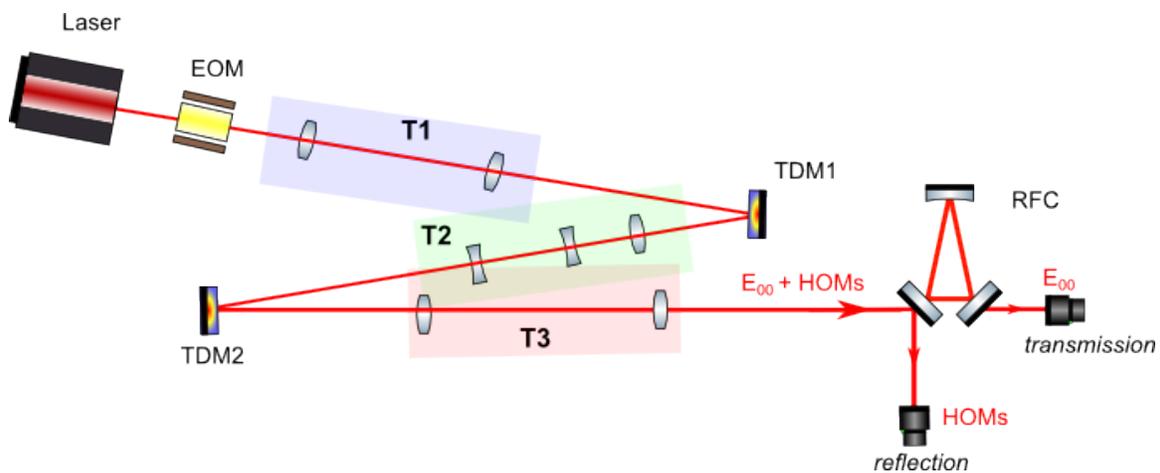


Figure 7 : Principe du montage expérimental de correction de couplage.

Deux montages ont été successivement implémentés pour réaliser les tests avec deux cavités différentes. Les deux cavités sont des cavités dites de filtrage modal, avec une géométrie triangulaire qui permet de débarrasser le faisceau transmis des modes d'ordre supérieurs qui contiennent les aberrations optiques. Les premiers tests effectués ont utilisé des algorithmes de convergence longs, qui cherchent à minimiser la puissance réfléchi par la cavité en trouvant par une pseudo-marche au hasard itérative la valeur des 122 actuateurs. Cette expérience nous a permis de démontrer la possibilité d'action corrective de deux TDMs combinés.

Avec le second setup, nous avons démontré que certains modes en particulier peuvent être contrôlés (cf Figure 8). Nous avons été capables d'augmenter puis de réduire l'amplitude d'un mode en appliquant la carte de phase correspondante. Ceci est la première mise en évidence d'un contrôle modal de la désadaptation de faisceau par les TDMs. Cependant, cette correction est principalement limitée par le couplage entre les modes. En effet, les TDMs introduisent un effet de translation, de changement d'angle du faisceau et de courbure de front d'onde. Ces effets secondaires doivent être compensés pour avoir la possibilité de corriger la désadaptation. Pour cela, le montage doit être amélioré pour inclure une compensation continue. Après quoi, une étude systématique de la correction des modes pourra être proposée.

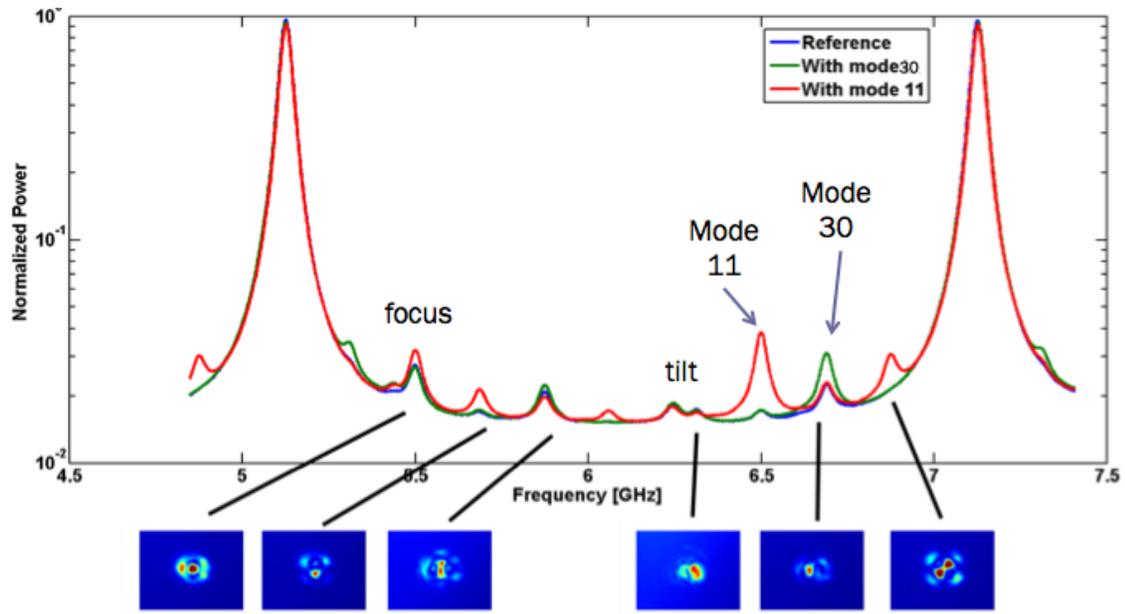


Figure 8 : Génération de modes sur le second setup avec les TDMS.