

EPREUVE COMMUNE DE TIPE 2013 - Partie D

Stabilisation des instruments interférométriques

Temps de préparation :2 h 15 minutes

Temps de présentation devant le jury :10 minutes

Entretien avec le jury :10 minutes

GUIDE POUR LE CANDIDAT :

Le dossier ci-joint comporte au total : 14 pages

Prendre soin d'utiliser le lexique en dernière page (*mots en italique*)

Travail **suggéré** au candidat : Analyser ce document en prenant soin de comprendre le principe général de la stabilisation d'instruments interférométriques. Vous pourrez à votre guise choisir de détailler une ou l'ensemble des méthodes de génération des signaux d'erreur. Illustrer votre compréhension du phénomène en vous appuyant sur l'exemple proposé. Bien utiliser le lexique pour vous familiariser avec le vocabulaire technique du texte. Si vous le souhaitez, proposer une méthode de stabilisation d'un des deux instruments présentés dans l'introduction.

CONSEILS GENERAUX POUR LA PREPARATION DE L'EPREUVE :

* Lisez le dossier en entier dans un temps raisonnable.

* Réservez du temps pour préparer l'exposé devant le jury.

➤ Vous pouvez écrire sur le présent dossier, le surligner, le découper ... mais tout sera à remettre au jury en fin d'oral.

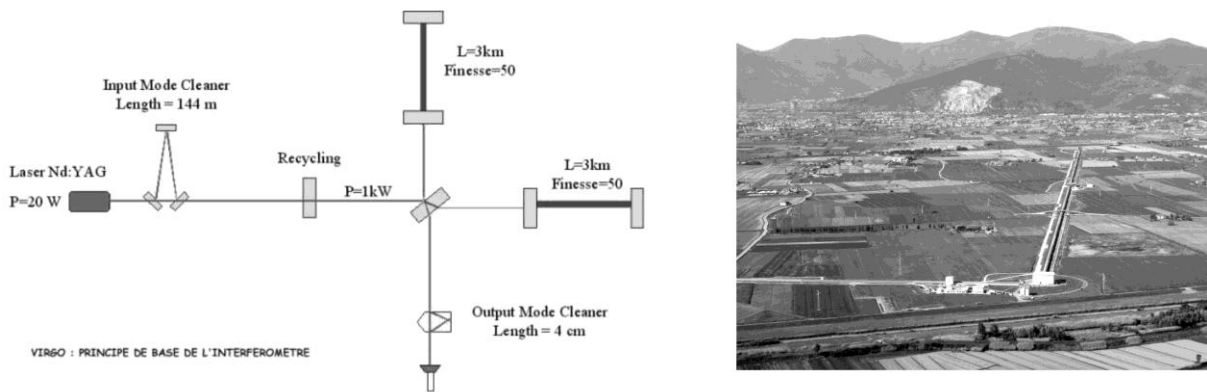
➤ En fin de préparation, rassemblez et ordonnez soigneusement TOUS les documents (transparents, *etc.*) dont vous comptez vous servir pendant l'oral, ainsi que le dossier, les transparents et les brouillons utilisés pendant la préparation. En entrant dans la salle d'oral, vous devez être prêts à débiter votre exposé.

➤ A la fin de l'oral, vous devez remettre au jury le présent dossier, les transparents et les brouillons utilisés pour cette partie de l'oral, ainsi que TOUS les transparents et autres documents présentés pendant votre prestation.

Stabilisation des instruments interférométriques

1. Introduction

Les mesures de grandes précisions font souvent appel à des interféromètres optiques réputés pour leur très grande sensibilité. Nous pouvons citer par exemple l'interféromètre VIRGO ayant pour objet de détecter les *ondes gravitationnelles* grâce aux déformations induites sur un interféromètre de Michelson comportant des cavités Fabry Perot dans chaque bras. Les déformations attendues en variation relative des bras de l'interféromètre sont de l'ordre de 10^{-21} . Seul un interféromètre optique pourra atteindre une telle sensibilité.



10

Figure 1 : interféromètre VIRGO implanté aux environs de Pise (Italie) schéma de principe et photo. Les bras de l'interféromètre mesurent 3km.

Cette sensibilité est exploitée aussi dans un interféromètre stellaire réalisant des interférences entre les lumières collectées par deux télescopes espacés de plusieurs centaines de mètres afin de déterminer les détails fins d'un objet astronomique très éloigné. L'interféromètre KECK implanté au sommet du Mauna Kea sur l'île principale d'Hawaï est un exemple parmi les dizaines de grands instruments en cours de réalisation ou en exploitation.

20

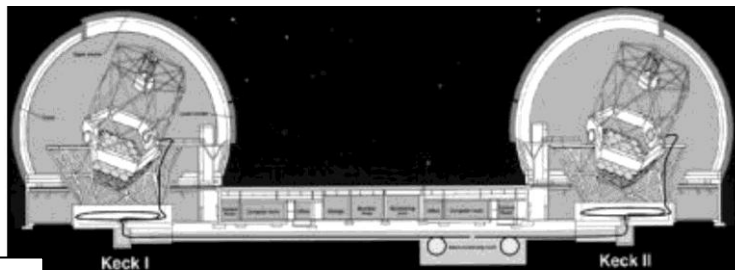


Figure 2 : interféromètre KECK, schéma de principe et photo des télescopes

25



Ces deux exemples exploitent la possibilité de mesurer des variations de chemins optiques bien inférieures à la longueur d'onde optique afin de réaliser une mesure extrêmement précise de phénomènes de très faibles amplitudes. Cependant, cette grande sensibilité peut devenir un inconvénient du fait de perturbations extérieures (vibrations, effets thermiques). Une stabilisation de l'instrument est donc nécessaire afin de s'assurer que le résultat d'une mesure est bien le fait de l'événement étudié et non d'un phénomène parasite. La suite de ce document explique comment il est possible de stabiliser un interféromètre afin de pouvoir bénéficier de tout son potentiel pour une exploitation scientifique fiable des résultats.

2. Principe général

Le principe général est illustré par la figure 3. Un chemin optique est mesuré par un *faisceau de métrologie* (traits continus) alors que le *faisceau « science »* dédié à l'application scientifique (pointillés) se propage suivant le même trajet.

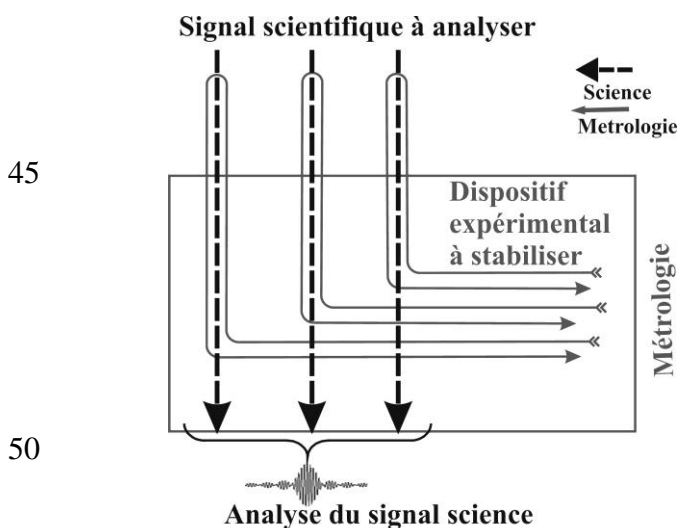


Figure 3: propagation simultanée des signaux scientifiques et de métrologie

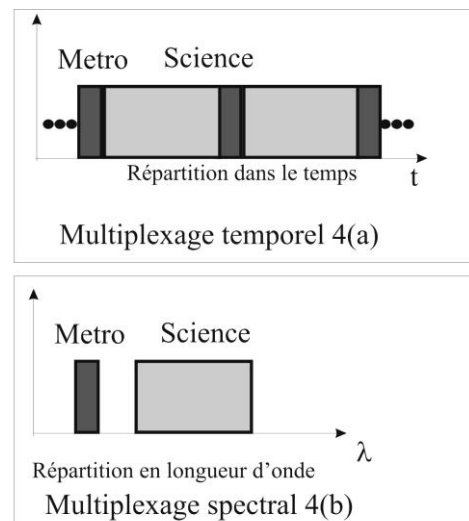


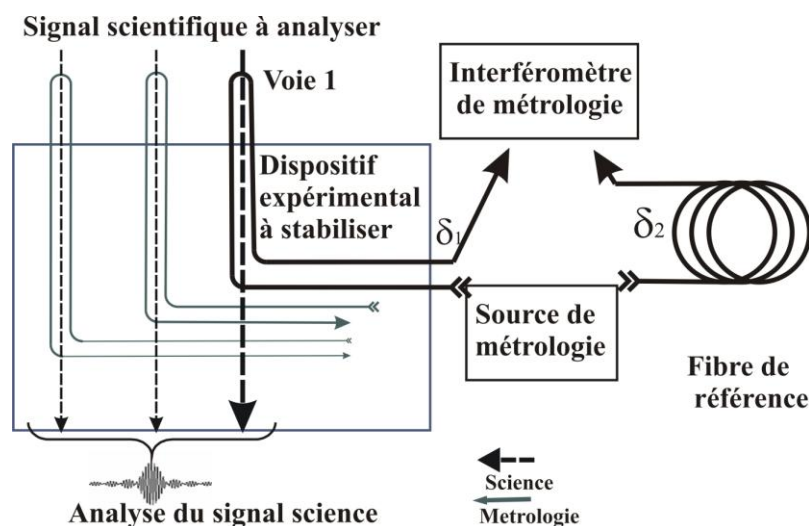
Figure 4: méthodes de multiplexage

En sortie, pour discerner ces deux signaux, on dispose de deux méthodes :

- Un multiplexage temporel consistant à allouer des fenêtres temporelles successivement au signal scientifique et au signal métrologie (figure 4a). Pendant le temps où le signal de métrologie passe dans l'instrument, la mesure des chemins optiques est réalisée permettant de faire une correction le cas échéant. En admettant que le système reste stable entre deux mesures de métrologie, la mesure scientifique peut être effectuée en bénéficiant de la stabilisation précédemment obtenue. Pour qu'un tel principe fonctionne, la fréquence

du multiplexage doit être bien supérieure à la fréquence maximum des perturbations extérieures.

➤ Un multiplexage spectral où les deux signaux correspondent à des domaines de longueur d'onde disjoints (figure 4b). Dans ce cas, la mesure de métrologie est réalisée en continu, rendant cette technique indépendante du spectre en fréquence des perturbations extérieures. Par contre, ce dispositif nécessite d'employer des séparateurs de longueurs d'ondes appelés dichroïques. Lorsque le signal scientifique est très faible, il convient d'utiliser un signal de métrologie le plus faible possible, et des lames dichroïques ayant un **pouvoir de réjection** élevé pouvant aller jusqu'à 10^4 . Si cette valeur reste trop faible, il est possible de mettre en cascade deux lames dichroïques pour atteindre des taux de réjection atteignant 10^8 .



75 **Figure 5 : exemple de structure d'un interféromètre de métrologie**

La mesure des variations du chemin optique nécessite de faire interférer les signaux de métrologie avec un signal de même longueur d'onde se propageant sur un bras de référence. De nombreuses architectures sont envisageables. La figure 5 propose un schéma expérimental utilisant une fibre optique de référence. Cette situation offre l'avantage de ne pas utiliser l'une des voies de l'interféromètre comme référence. En effet le choix de cette voie recevant déjà des perturbations extérieures obligerait les autres chemins optiques à subir ces variations. Au contraire, la fibre de référence peut être placée dans une zone non perturbée et ainsi ne pas subir de fluctuation. Remarquons que dans la configuration présentée dans la figure 5, la fibre de référence devra avoir une longueur double de la voie scientifique afin de travailler avec une différence de marche presque nulle. De plus la source de métrologie sera choisie pour son caractère monochromatique et sa stabilité en longueur d'onde. Le signal interférométrique

(appelé indifféremment par la suite puissance ou intensité) en sortie de l'interféromètre de métrologie pourra ainsi être exprimé sous la forme :

90
$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(2\pi \frac{\delta_1 - \delta_2}{\lambda}\right) \quad \text{Equation (1)}$$

Où I_1 et I_2 sont les puissances respectives se propageant dans les deux voies de l'interféromètre, et λ la longueur d'onde de la source de métrologie.

Les fluctuations de l'intensité lumineuse I permettent de mesurer les variations du chemin optique δ_1 . Les paragraphes suivants montreront en détail comment la mesure d'un ou de
95 plusieurs signaux interférométriques permet de corriger les écarts de chemin optique $\Delta\delta$ pour placer l'interféromètre au chemin optique nominal noté $\delta_{1 \text{ nom}}$.

On appelle erreur la valeur $\Delta\delta = \delta_1 - \delta_{1 \text{ nom}}$

Supposant le signal d'erreur mesuré, il reste à corriger le chemin optique afin de ramener $\Delta\delta$ à une valeur nulle. Pour ce faire, il est nécessaire d'utiliser des *actuateurs* permettant de
100 modifier de façon contrôlée le trajet de la voie 1. Il existe une grande variété de dispositifs pouvant assurer cette fonction : (1) systèmes électromécaniques de type haut parleur, (2) systèmes *piézoélectriques* permettant de déplacer un miroir, (3) systèmes piézoélectriques permettant d'étirer une fibre optique.

Les systèmes piézoélectriques sont souvent préférés pour leur grande sensibilité. Sous l'action
105 d'une différence de potentiel, le matériau est déformé de façon quasi proportionnelle en fonction de la consigne d'entrée. Cependant ils nécessitent une électronique haute tension et ne disposent pas de courses très importantes. Une solution classique consiste alors à utiliser des systèmes hybrides alliant la grande course de d'actuateur électromécanique avec un deuxième étage très précis basé sur des piézoélectriques. Afin d'optimiser la boucle de
110 rétroaction, un *filtre PID* (**P**roportionnel **D**érivée **I**ntégral) est placé avant la commande de puissance alimentant les piézoélectriques. L'ensemble de ces filtres va permettre d'assurer la stabilité de l'asservissement (signe de la correction en fonction du signal d'erreur), et la rapidité et la précision de la correction (gain et fonction de transfert de la boucle globale d'asservissement). Les performances de l'asservissement sont mesurées grâce à l'étalonnage
115 du signal d'erreur $\Delta\delta$. L'évaluation est faite en *erreur crête à crête* mais aussi en *écart type ou RMS*. Des précisions de l'ordre du nm sont couramment obtenues, et des systèmes de hautes précisions peuvent aller jusqu'à 10^{-10} m. Dans la suite du document nous allons préciser les méthodes utilisées pour étalonner le signal d'erreur et nous concluons par un exemple.

120

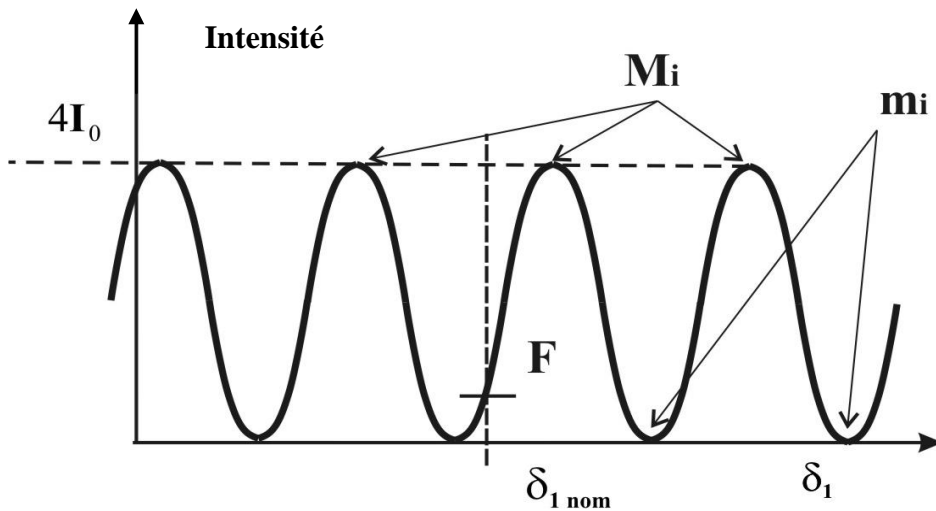
3. Obtention du signal d'erreur

Dans les lignes qui suivent nous présentons trois principes de génération de signaux d'erreur afin de montrer la diversité des dispositifs qui peuvent être envisagés.

3.1. Stabilisation en un point fixe d'un interféromètre à une sortie

125 Lorsque le choix du point de fonctionnement de l'interféromètre n'est pas critique il est possible d'utiliser une seule sortie interférométrique. Dans l'hypothèse de flux équilibrés dans les deux voies de l'interféromètre, le signal délivré à la sortie de l'interféromètre a toujours

pour expression : $I = 2I_0[1 + \cos\left(2\pi\frac{\delta_1 - \delta_2}{\lambda}\right)]$ Equation(2)



130 **Figure 7 :** évolution de l'intensité en fonction de la différence de marche δ_1 observée

La courbe de réponse I en fonction de δ_1 est représentée sur la figure 7. Le premier défaut de cette réponse est son caractère non monotone. Autour du maximum M_i ou du minimum m_i (I égale à $4I_0$ et 0 respectivement) le signal (ou intensité) ne varie pas en fonction de δ_1

135 empêchant l'asservissement en ces points. De façon plus générale, toute les zones où la pente de la courbe est négative ou nulle ne permettent pas d'asservir l'interféromètre sur la valeur nominale recherchée. Le signe de la pente de correction est opposé à celui souhaité pour que l'asservissement s'oppose à la perturbation. Au contraire, dans les zones de pentes positives,

140 nous au point de fonctionnement F correspondant à une intensité $2I_0$ (figures 8). Ce point est intéressant car la pente de la courbe étant forte, de faibles variations $\Delta\delta$ du chemin δ_1 seront facilement observables puisqu'elles entraîneraient de fortes variations de l'intensité lumineuse.

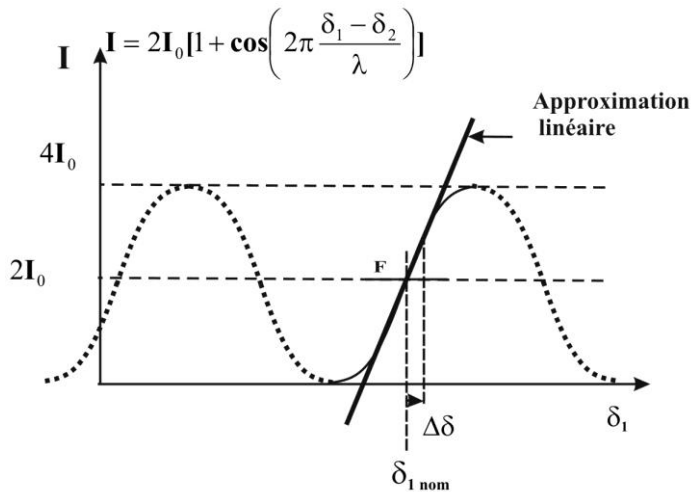


Figure 8 : linéarisation de la fonction d'erreur

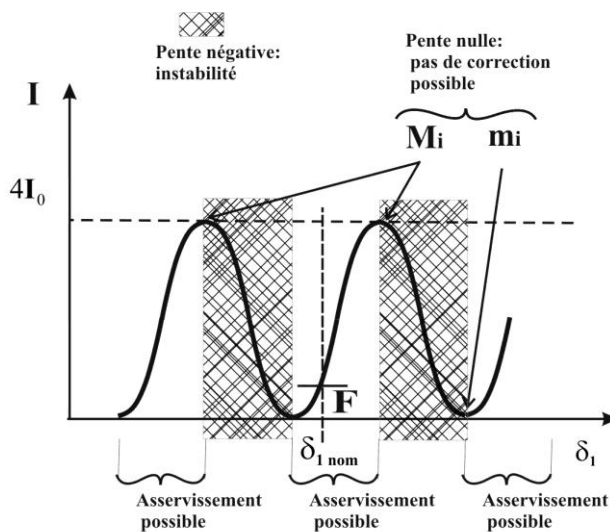


Figure 9 : zone stable et utilisable pour l'asservissement

145

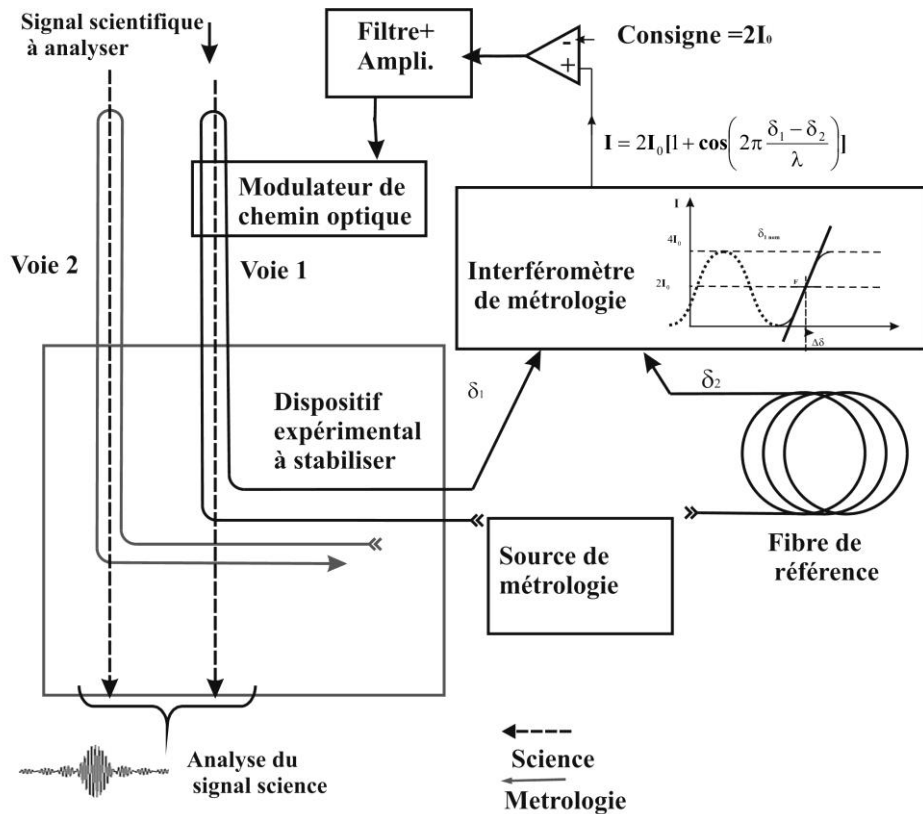
Dans cette hypothèse, la linéarisation de la fonction autour du point de fonctionnement permet d'écrire l'erreur de chemin $\Delta\delta$ optique de façon très simple sous la forme :

$$\Delta\delta = \frac{\lambda}{2\pi} \left(\frac{I}{2I_0} - 1 \right) \text{ équation (3) où } \lambda \text{ est la longueur d'onde}$$

150

Ainsi, l'ensemble du gain de la boucle d'asservissement pourra ainsi être déterminé moyennant la mesure de l'intensité $4I_0$. La figure 10 (page suivante) montre l'architecture de l'ensemble de la boucle de stabilisation de l'instrument (boucle de rétroaction). Notons que, grâce à cette configuration, il est possible, en supposant δ_2 stable, d'évaluer simplement la stabilité de l'instrument, les variations de l'intensité étant directement proportionnelles aux

fluctuations de chemin optique : $\text{Fluctuations } (\delta) = \frac{\lambda}{2\pi 2I_0} (\text{Fluctuations } (I)) \text{ Equation (4)}$



155

Figure 10 : structure globale de l'asservissement à une sortie interférométrique

Cette même opération sera effectuée pour chaque trajet optique du signal scientifique. Ainsi l'ensemble de l'instrument est stabilisé en utilisant la même fibre de référence. Cette première méthode offre l'avantage évident de la simplicité puisqu'elle utilise une seule sortie interférométrique, mais elle ne permet pas d'ajuster la position du point de fonctionnement en fonction des besoins. Pour cette raison, dans le paragraphe suivant, nous allons analyser le fonctionnement d'un dispositif à deux sorties interférométriques.

160

3.2. Stabilisation en un point fixe d'un interféromètre à deux quadrants

Dans cette configuration, l'interféromètre de métrologie fournit deux sorties en quadrature

$$I_1 = 2I_0 \left[1 + \cos \left(2\pi \frac{\delta_1 - \delta_2}{\lambda} \right) \right] \text{ Equation (2)} \quad ; \quad I_2 = 2I_0 \left[1 + \sin \left(2\pi \frac{\delta_1 - \delta_2}{\lambda} \right) \right] \text{ Equation (5)}$$

Pour cela, il suffit de séparer en deux la sortie de la voie de référence et d'ajouter un retard différentiel par un trajet additionnel ou par une lame biréfringente. La voie à mesurer étant comparée à ces deux références, les deux signaux I_1 et I_2 sont détectés par des photodiodes. La situation idéale recherchée consiste à obtenir $\delta_1 = \delta_{1nom}$. Du fait des perturbations extérieures une erreur de chemin vient se superposer : $\delta_1 = \delta_{1nom} + \Delta\delta$. Les lignes suivantes proposent une méthode pour mesurer $\Delta\delta$.

170

En notant $\varepsilon = \Delta\delta \frac{2\pi}{\lambda}$ les équations 2 et 5 permettent d'écrire les quantités **S** et **C**:

$$C = \frac{I_1}{2I_0} - 1 = \cos\left(2\pi\left(\frac{\delta_{1nom} - \delta_2}{\lambda}\right) + \varepsilon\right) \quad S = \frac{I_2}{2I_0} - 1 = \sin\left(2\pi\left(\frac{\delta_{1nom} - \delta_2}{\lambda}\right) + \varepsilon\right)$$

Pour accéder à l'erreur ε il est possible de combiner les signaux de mesure **S** et **C** avec deux
175 consignes **S_{ref}** et **C_{ref}** grâce à la formule trigonométrique donnant $\sin(\varepsilon) = S.C_{ref} - C.S_{ref}$

$$\text{avec } S_{ref} = \sin\left(2\pi\frac{\delta_{1nom} - \delta_2}{\lambda}\right) \text{ et } C_{ref} = \cos\left(2\pi\frac{\delta_{1nom} - \delta_2}{\lambda}\right)$$

Sur de petites plages de variation, le sinus peut être assimilé à son argument permettant ainsi
d'écrire : $\Delta\delta = \frac{\lambda}{2\pi} \varepsilon = \frac{\lambda}{2\pi} (S.C_{ref} - C.S_{ref})$

La figure 11 montre la nouvelle structure de la boucle de stabilisation de l'interféromètre.
180 Comme dans le cas précédent, le signal d'erreur sera acheminé vers le modulateur de chemin
optique via un filtre et un amplificateur. Toute variation de δ_1 sera compensée par la boucle
afin de stabiliser l'interféromètre.

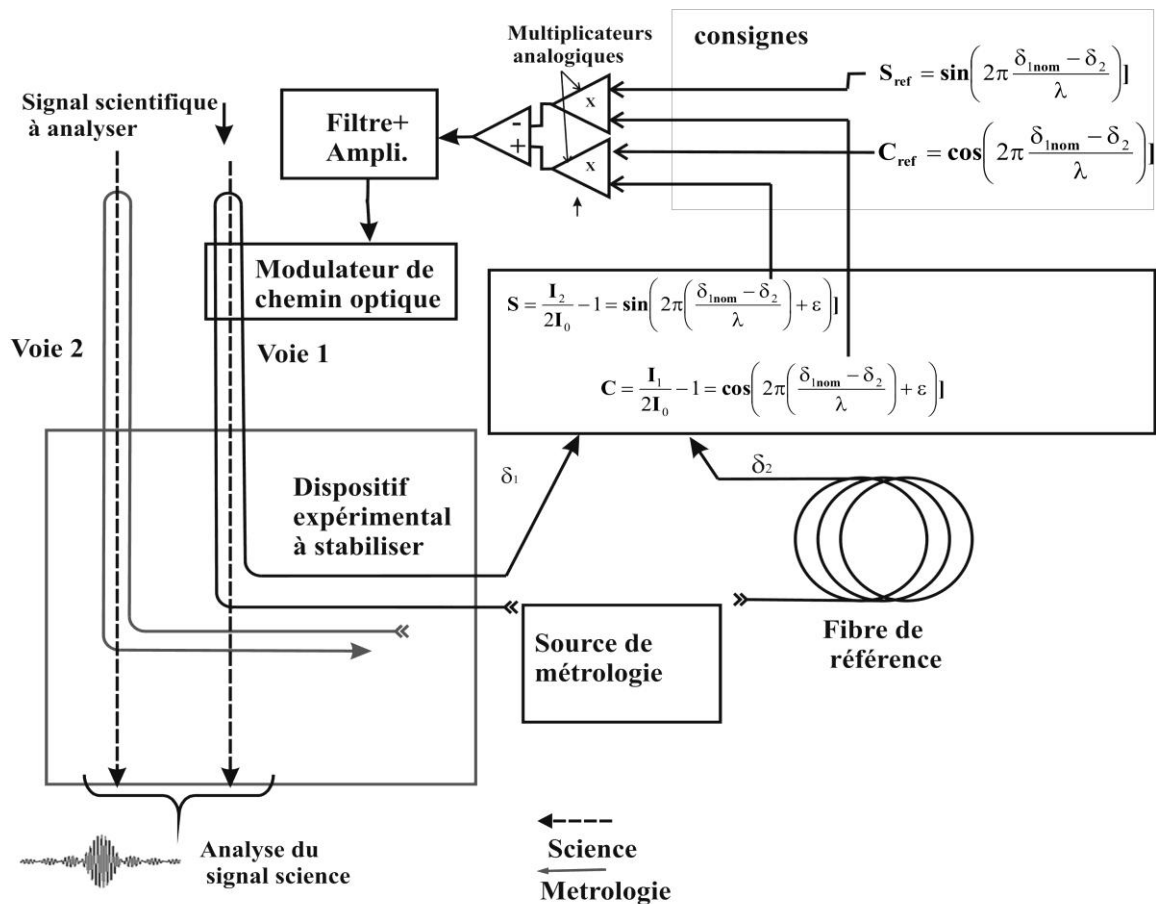


Figure 11 : structure globale de l'asservissement en deux sorties en quadrature

185 Remarquons que dans cette configuration le point de fonctionnement δ_{1nom} peut être choisi sans contrainte contrairement au cas précédent. Il est ainsi possible, en utilisant toujours la même référence, d'opérer pour l'ensemble des voies à stabiliser.

3.3. Asservissement de la modulation linéaire de chemin optique en fonction du temps

L'objectif de cet instrument est de faire varier la différence de phase dans l'interféromètre de façon linéaire au cours du temps. $\delta_1 = \delta_{1nom} + at$

Ainsi, il sera possible de visualiser les franges d'interférence en fonction du temps et non par un affichage spatial comme cela se fait de façon classique. Du fait des perturbations extérieures le chemin optique à asservir a pour expression : $\delta_1 = \delta_{1nom} + at + \Delta\delta$. A nouveau, il convient d'utiliser comme dans le cas précédent deux sorties interférométriques

195 d'intensités :

$$I_1 = 2I_0 \left[1 + \cos \left(2\pi \frac{\delta_{1nom} + at + \Delta\delta - \delta_2}{\lambda} \right) \right] \text{ Equation (2')}$$

$$I_2 = 2I_0 \left[1 + \sin \left(2\pi \frac{\delta_{1nom} + at + \Delta\delta - \delta_2}{\lambda} \right) \right] \text{ Equation (5')}$$

Pour simplifier notre raisonnement nous pourrions supposer que $\delta_{1nom} = \delta_2$.

L'expression des intensités se simplifie de la façon suivante

200

$$I_1 = 2I_0 [1 + \cos(\omega t + \varepsilon)] \quad I_2 = 2I_0 [1 + \sin(\omega t + \varepsilon)]$$

$$\text{Avec } \omega = 2\pi \frac{a}{\lambda} \text{ et } \varepsilon = \Delta\delta \frac{2\pi}{\lambda}$$

Comme précédemment nous allons reconditionner ces mesures sous la forme

$$C = \frac{I_1}{2I_0} - 1 = \cos(\omega t + \varepsilon) \quad S = \frac{I_2}{2I_0} - 1 = \sin(\omega t + \varepsilon)$$

205 De façon analogue au paragraphe 3.2 nous définirons les consignes qui représentent les sorties idéales des interféromètres lorsque le système est parfaitement asservi.

$$C_{Ref} = \frac{I_1}{2I_0} - 1 = \cos(\omega t) \quad S_{Ref} = \frac{I_2}{2I_0} - 1 = \sin(\omega t)$$

Enfin, comme dans le cas précédent, le signal d'erreur ε et la fluctuation de chemin optique $\Delta\delta$ seront générés par une combinaison trigonométrique de ces signaux :

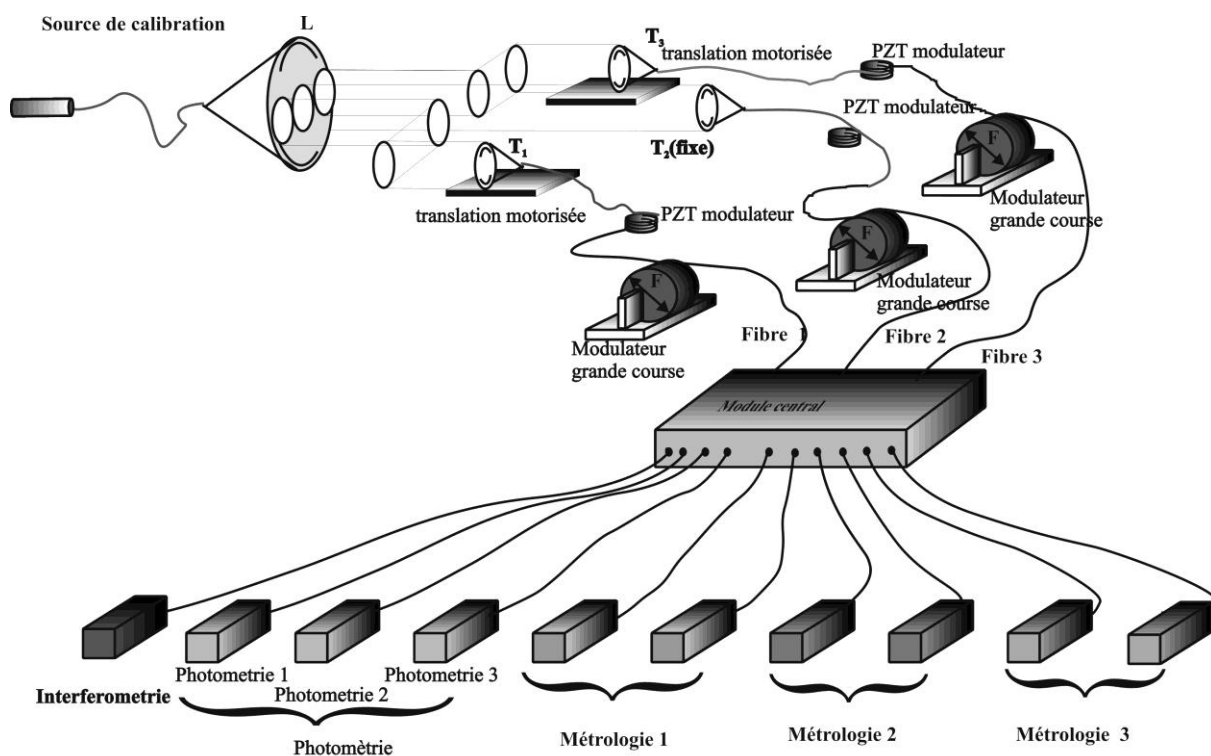
210

$$\Delta\delta = \frac{\lambda}{2\pi} \varepsilon = \frac{\lambda}{2\pi} (S.C_{ref} - C.S_{ref}).$$

De ce fait le schéma de principe sera complètement analogue à celui proposé sur la figure 11. Seuls les signaux de consignes seront modifiés. Cette technique est illustrée dans l'exemple proposé au paragraphe 4.

215 **4. Exemple de l'instrument MAFL**

L'instrument MAFL (Multi aperture Fiber Linked Interferometre) est une étude financée par l'ESA (European Space Agency) ayant pour objectif de proposer un réseau de télescopes reliés par fibres optiques. Les observations se font sur une bande spectrale proche infrarouge centrée autour de $1,55 \mu\text{m}$ qui correspond à une plage de longueur d'onde à la fois d'intérêt astronomique et pour laquelle les fibres optiques sont très performantes. L'interféromètre comporte trois voies composées de fibres optiques et l'ensemble des fonctions de recombinaison a été regroupé sur une puce *d'optique intégrée* de 5cm de diamètre située dans le module central. La figure 12 montre le schéma de principe du banc test.



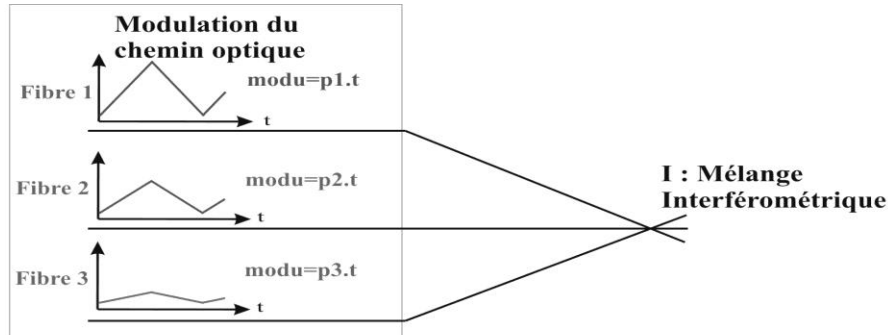
225

Figure 12 : interféromètre MAFL

Une source de calibration alimente trois lentilles jouant le rôle des télescopes. La lumière se propage alors dans des fibres optiques incluant des modulateurs de chemin optique. Le premier possède une grande course et corrige lentement les erreurs ; le second, constitué d'un modulateur piézoélectrique (PZT) de petite course, est précis et rapide. Les trois faisceaux rejoignent le module central incluant un interféromètre scientifique et trois interféromètres de métrologie opérant à $1,3 \mu\text{m}$. Une batterie de détecteurs (en bas sur la figure) permet

230

d'effectuer les mesures scientifiques (à gauche), et d'obtenir les sorties interférométriques pour les métrologies (à droite). L'instrument fonctionne par modulation linéaire de chemin optique (**modu** sur la figure ci-dessous) en fonction du temps ($p_i.t$). La figure 13 montre comment il est possible d'interpréter les signaux observés.



	différence de chemin optique	Fréquence des franges	Canal fréquence
entre 1 et 2	$(p1-p2).t$	$f_{12} = (p1-p2)/\lambda$	N12
entre 2 et 3	$(p2-p3).t$	$f_{23} = (p2-p3)/\lambda$	N23
entre 1 et 3	$(p1-p3).t$	$f_{13} = (p1-p3)/\lambda$	N13

Remarque $f_{12} + f_{23} = f_{13}$

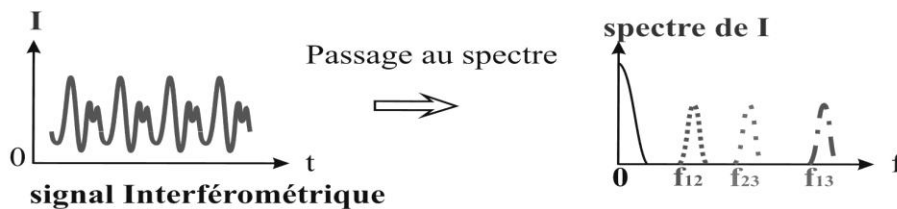


Figure 13 : principe de visualisation des franges d'interférence sur l'interféromètre MAFL

Chaque bras interférométrique i ($i=1,2$ ou 3) est modulé par un signal triangulaire de pente de chemin optique $\pm p_i$. Pour cela il est nécessaire de mettre en place la technique proposée dans le paragraphe 3.3. La différence de marche engendré entre les voies i et j est alors égale à $\delta = \pm (p_i - p_j).t$

Les franges observées entre les bras interférométriques i et j sont donc modulées à la

fréquence $f_{ij} = \frac{p_i - p_j}{\lambda}$ associée à un canal numérique N_{ij} .

Le signal interférométrique total est constitué de la superposition des trois systèmes de franges (en bas à gauche de la figure 13). Pour séparer les trois informations ainsi intriquées, le spectre du signal électrique détecté est analysé par une transformée de Fourier

(en bas à droite de la figure 13). La stabilité de cet instrument a été testée voie par voie. La figure 14 montre un résultat permettant de conclure à une précision le chemin optique de l'ordre de $\lambda/200$ et un temps de réponse voisin de $0,5 \mu\text{s}$ observable au niveau des changements de pente de chemin optique.

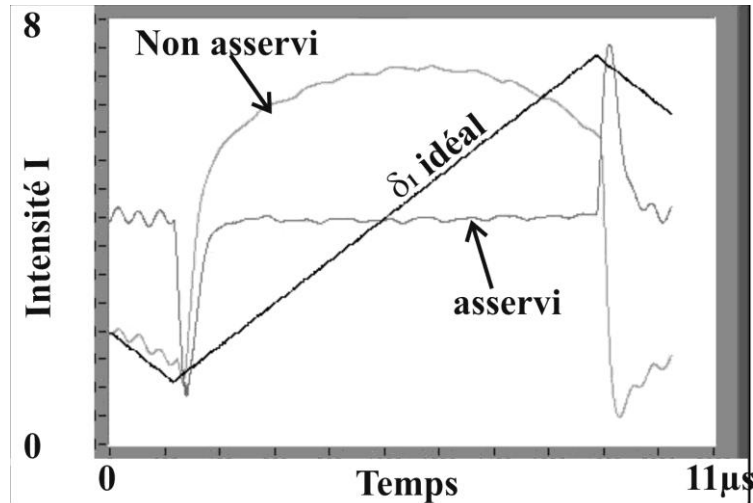


Figure 14 : variation linéaire associée de δ_1 , signal d'erreur avec et sans asservissement.

255

Conclusion :

Les méthodes interférométriques sont parmi les plus précises qui existent actuellement. Des précisions bien meilleurs que le nm sont couramment observées. Pour cela des techniques de modulation et d'analyse des signaux sont nécessaires afin de contourner les difficultés liées à la non linéarité des fonctions monotones utilisées.

260

Lexique:

Actuateur : dispositif permettant, grâce à une commande extérieure, de modifier un paramètre d'un dispositif inséré dans un montage expérimental. Exemple : un système de déplacement mécanique commandé par une tension électrique.

265

Ecart-type ou RMS, et erreur crête à crête : En statistique, la variance V est une mesure arbitraire servant à caractériser la dispersion d'un échantillon ou d'une population autour d'une valeur moyenne (moyenne du carré des écarts). La variance est toujours positive ou nulle (si V est nulle, cela signifie alors que les données sont toutes identiques). L'écart type σ ou RMS est sa racine carrée :

270

$$V(X) = \langle (X - \langle X \rangle)^2 \rangle = \langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2 \quad \sigma_x = \sqrt{V(X)} \quad \text{avec } \langle \rangle = \text{valeur moyenne.}$$

L'erreur crête crête correspond à l'amplitude maximum des fluctuations du signal (valeur max – valeur min).

275 **Faisceau de métrologie**, et **faisceau « science »** : Les faisceaux de métrologie sont des faisceaux lumineux se propageant dans l'instrument afin de « lire » les fluctuations de chemins optiques. Ils ne doivent pas gêner la propagation et la détection des faisceaux sciences qui correspondent à la lumière provenant de la source astronomique observée. Ces deux types de signaux sont différenciés par des multiplexages spatiaux ou temporels.

280 **Filtre PID** : Filtre d'optimisation des boucles d'asservissement. La réponse en fréquence du système à stabiliser peut induire des impossibilités pour un système de rétroaction à contrer les perturbations extérieures sur une large gamme de fréquence. Les filtres « intégral » (~"passe bas"), « proportionnel » et « dérivé » (~"passe haut") permettent de diviser les zones de fréquences en trois domaines afin d'apporter une correction garantissant à la fois précision et rapidité de l'asservissement.

285 **Interféromètre à deux quadrants** : Interféromètre capable de générer deux sorties, la plus part du temps en quadrature de phase.

290 **Onde gravitationnelle** : variation de la gravité locale provoquée par des modifications structurelles de grande ampleur dans des étoiles ou galaxies. Ces ondes modifient l'espace en perturbant par exemple le trajet optique dans un interféromètre. Ceci permet d'envisager de les détecter par une méthode interférométrique.

Optique intégrée : c'est la transposition des techniques de la microélectronique dans le domaine de l'optique pour la réalisation de composants de très petites dimensions. Cette technologie permet de réaliser dans de faibles volumes des fonctions optiques élémentaires ou élaborées impossibles à réaliser par d'autres technologies.

295 **Piézoélectriques (PZT)**: du grec piézein (presser, appuyer), c'est la propriété que possèdent certains corps de se polariser électriquement sous l'action d'une contrainte mécanique, et réciproquement de se déformer lorsqu'on leur applique un champ électrique. Les deux effets sont indissociables. Le premier est appelé effet piézoélectrique direct ; le second effet piézoélectrique inverse.

300 **Pouvoir de réjection** : Capacité pour un instrument de séparer deux éléments de caractéristiques physiques différentes. Dans le cas évoqué en ligne 64 et suivantes, possibilité "d'aiguiller" les deux longueurs d'onde sans *mélange résiduel*. (taux de rejection)

305 **Faisceau de métrologie**, et **faisceau « science »** : Les faisceaux de métrologie sont des faisceaux lumineux se propageant dans l'instrument afin de « lire » les fluctuations de chemins optiques. Ils ne doivent pas gêner la propagation et la détections des faisceaux sciences qui correspondent à la lumière provenant de la source astronomique observée.