

## Montage d'interférométrie hétérodyne

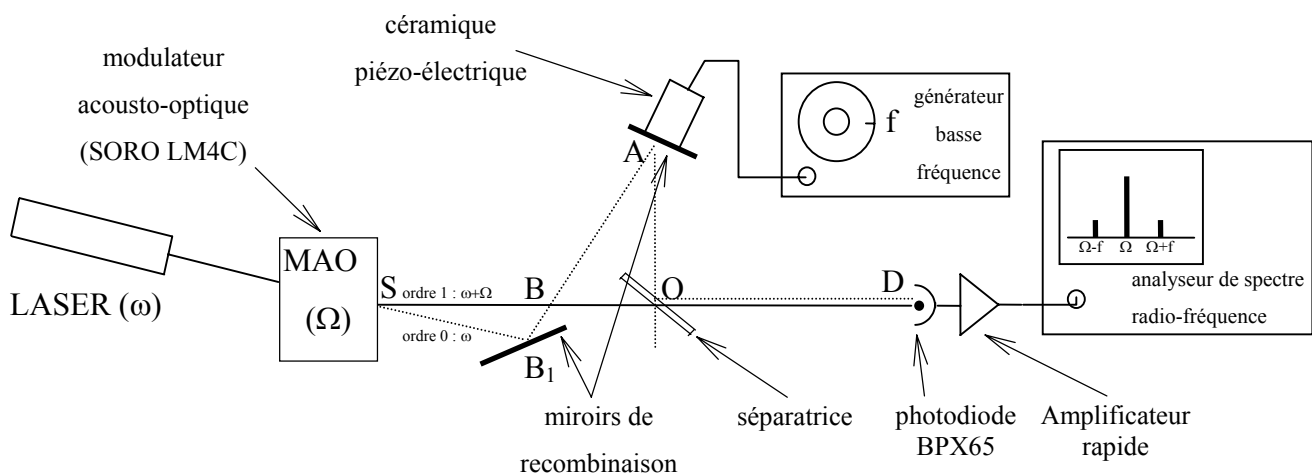
### OBJECTIFS PEDAGOGIQUES :

- Etude d'un composant optoélectronique : un modulateur acousto-optique  
Réseau de phase épais (incidence de Bragg)  
Fonctions déviation, modulation d'amplitude et/ou de phase d'un faisceau laser  
Fréquence de l'onde progressive se propageant dans le cristal et efficacité de diffraction

- Interférométrie hétérodyne :  
Battement entre deux faisceaux laser décalés en fréquence  
Etude du signal d'interférence  
Intérêts du décalage en fréquence  
Application à la mesure d'amplitudes de vibration nanométriques

-autres :  
Photodétection, bande passante, modulation de fréquence, analyse spectrale, etc.  
Cohérence, finesse spectrale d'une source Laser

### SCHEMA DU MONTAGE :



*schéma du montage :  $\omega$ ,  $\Omega$ , et  $f$  désignent respectivement les fréquences du Laser, du Modulateur Acousto-Optique (MAO) et de la modulation de la ceramique piezo-électrique qui supporte le miroir.*

Un faisceau laser HeNe est envoyé à travers un modulateur acousto-optique. Celui-ci est constitué d'une céramique piézo-électrique collée sur un cristal. Cette céramique piézo-électrique est excitée par une tension de fréquence  $\Omega \approx 70\text{MHz}$ . Elle engendre dans le cristal une onde acoustique progressive, de fréquence  $\Omega$ , et qui crée un **réseau de phase épais**. La diffraction sur ce réseau **épais** a une efficacité maximale au voisinage de l'angle de réflexion de Bragg. On obtient alors, à la sortie du modulateur, deux faisceaux faisant entre eux un petit angle et correspondant aux ordres 0 et 1 de diffraction sur le réseau. De plus, compte tenu de l'effet Doppler introduit dans la réflexion sur l'onde acoustique **progressive**, ces deux faisceaux sont décalés en fréquence l'un par rapport à l'autre de la fréquence de modulation  $\Omega$ .

**A la sortie du modulateur, on obtient donc 2 faisceaux faisant entre eux un petit angle et décalés en fréquence l'un par rapport l'autre de  $\Omega$  soit 70 MHz environ.**

Recombinés au moyen de deux miroirs (A et B<sub>1</sub>) et d'une séparatrice (O), sont ensuite envoyés sur une photodiode rapide (D, modèle BPX65) suivie d'un amplificateur rapide. La bande passante de ce système de détection est 7 MHz à 500 MHz.

La photodétection, quadratique, fait apparaître un courant modulé à la fréquence  $\Omega$  qui correspond au battement entre les deux ondes lumineuses de fréquences légèrement différentes. Cette modulation peut être observée soit directement sur un oscilloscope rapide soit, de façon plus commode, à l'aide d'un analyseur de spectre radio-fréquence (RF).

*Le montage est tout à fait comparable à un interféromètre de Mach-Zehnder (ou de Michelson) avec un décalage en fréquence du faisceau dans l'un des bras de l'interféromètre.*

### **MODULATION DE LA DIFFERENCE DE MARCHE ENTRE LES DEUX VOIES**

Un des miroirs de recombinaison est monté sur une seconde céramique piézo-électrique. En appliquant une tension sur cette céramique, on module la longueur du trajet d'un des deux faisceaux, donc leur différence de marche. On réalise ainsi une modulation de phase du signal de

battement des deux faisceaux. Pour une tension périodique, il apparaît alors des bandes latérales à l'analyseur de spectre dont l'amplitude est liée à l'amplitude du mouvement du miroir.

L'avantage du décalage en fréquence (montage hétérodyne) est le suivant : le signal à 70 MHz est 60 à 70 dB au dessus du bruit avec la largeur de bande d'analyse utilisée sur cet analyseur de spectre. Ceci va permettre de mesurer des amplitudes de vibrations inférieures au nanomètre. Dans un *Michelson* sans décalage de fréquence (montage homodyne), le rapport signal à bruit est beaucoup plus faible du fait des bruits mécaniques, électroniques et des bruits techniques du laser, essentiellement basse fréquence.

La limite de sensibilité, fondamentale mais cependant accessible de cette détection hétérodyne correspond au bruit de photons des faisceaux lumineux.

### ETUDE DU MODULATEUR ACOUSTO-OPTIQUE :

Une fois le modulateur réglé au mieux de manière à obtenir un flux maximum sur l'ordre 1, il est possible d'estimer l'angle  $\beta$  entre les 2 ordres :

$$\beta = \frac{\lambda_{HeNe}}{\Lambda_{acoustique}}$$

On peut estimer cet angle et déduire la vitesse de propagation  $v$ , de l'onde dans le cristal par :

$$\Lambda_{acoustique} = \frac{v}{\Omega}$$

On peut par ailleurs mesurer l'efficacité de diffraction du cristal définie par :

$$\eta_{diffraction} = \frac{Flux_{ordre 1}}{Flux_{Total}}$$

Il est aussi possible de moduler le flux du faisceau diffracté en utilisant un générateur basse fréquence sur l'entrée de l'alimentation du modulateur (Bande passante de modulation quelques centaines de kHz). Positionner alors le commutateur de modulation sur 'externe'.

### ANALYSE DU SIGNAL DE BATTEMENT ENTRE L'ORDRE 0 ET 1 :

On note  $E_0 = a_0 e^{i\omega t}$  et  $E_1 = a_1 e^{i((\omega+\Omega)t+\varphi)}$ , les amplitudes complexes des champs électriques des ondes diffractées à l'ordre 0 et 1 qui interfèrent au niveau du détecteur. ( $\varphi$  est le déphasage entre les deux ondes variant aléatoirement et très lentement devant la pulsation de modulation  $\Omega$ ). La photodiode est sensible au module carré du champ électrique :

$$i(t) \propto \left\{ \left( a_0 e^{i\omega t} + a_1 e^{i(\omega+\Omega)t+\varphi} \right) \left( a_0 e^{-i\omega t} + a_1 e^{-i(\omega+\Omega)t-\varphi} \right) \right\}$$

$$i(t) \propto a_0^2 + a_1^2 + 2a_0 a_1 \cos(\Omega t + \varphi)$$

La composante continue étant filtrée par l'amplificateur, le signal à la sortie du système de détection est :

$$V_s(t) = V_{s,0} \cos(\Omega t + \varphi)$$

Ce signal est observé à l'oscilloscope et/ou à l'analyseur de spectre RF à la fréquence  $\Omega$ , largement comprise dans la bande passante du système de détection (7 MHz-500 MHz).

Son amplitude dépend ici essentiellement de la qualité de la superposition des 2 ordres et de l'efficacité de diffraction du MAO (voir méthode de réglage).

Il est remarquable de constater la finesse spectrale de ce signal : sa largeur est déterminée par la bande de résolution de l'analyseur de spectre RF. *Tout ce passe comme si les deux faisceaux laser étaient deux oscillateurs de pulsation  $\omega$  et  $\omega + \Omega$ , extrêmement stable devant le temps de réponse du détecteur.*

### **MESURE DE L'AMPLITUDE DE VIBRATION DU MIROIR :**

Si la céramique piézo-électrique qui porte le miroir en A est excitée par une tension sinusoïdale de fréquence  $f$ , de l'ordre de 100 kHz, le mouvement du miroir est en première approximation :  $\delta A(t) = \delta A_0 \cos(2\pi f t)$ .

La phase entre les deux voies de l'interféromètre devient :

$$\varphi(t) = \varphi_0 + \frac{2\pi}{\lambda_{\text{HeNe}}} 2\delta A_0 \cos(i) \cos(2\pi f t), \text{ où } i \text{ est l'angle d'incidence sur le miroir A.}$$

Le signal à la sortie du système de détection devient :

$$V_s(t) = V_{s,0} \cos(\Omega t + \varphi(t))$$

***Le mouvement du miroir A se traduit par une modulation de phase du signal de battement.***

### **1° Cas : Faible amplitude de modulation de phase:**

Ce cas particulièrement intéressant est celui des faibles amplitudes de vibrations du miroir, A :

$$\delta A_0 \ll \lambda_{\text{HeNe}}$$

Il vient alors :

$$\begin{aligned}
 V_s(t) &= V_{s,0} \cos(\Omega t - \varphi_0 - \frac{4\pi\delta A_0 \cos(i)}{\lambda_{HeNe}} \cos(2\pi f t)) \\
 &= V_{s,0} \cos(\Omega t - \varphi_0) \cos\left(\frac{4\pi\delta A_0 \cos(i)}{\lambda_{HeNe}} \cos(2\pi f t)\right) + V_{s,0} \sin(\Omega t - \varphi_0) \sin\left(\frac{4\pi\delta A_0 \cos(i)}{\lambda_{HeNe}} \cos(2\pi f t)\right)
 \end{aligned}$$

Si  $\delta A_0 \ll \lambda_{HeNe}$ , on obtient au premier ordre :

$$\begin{aligned}
 \cos\left(\frac{4\pi\delta A_0 \cos(i)}{\lambda_{HeNe}} \cos(2\pi f t)\right) &= 1 \\
 \sin\left(\frac{4\pi\delta A_0 \cos(i)}{\lambda_{HeNe}} \cos(2\pi f t)\right) &= \frac{4\pi\delta A_0 \cos(i)}{\lambda_{HeNe}} \cos(2\pi f t)
 \end{aligned}$$

Soit :

$$\begin{aligned}
 V_s(t) &= V_{s,0} \cos(\Omega t - \varphi_0) + V_{s,0} \frac{4\pi\delta A_0 \cos(i)}{\lambda_{HeNe}} \sin(\Omega t - \varphi_0) \cos(2\pi f t) \\
 &= V_{s,0} \cos(\Omega t - \varphi_0) + V_{s,0} \frac{2\pi\delta A_0 \cos(i)}{\lambda_{HeNe}} [\sin((\Omega t + 2\pi f t) - \varphi_0) + \sin((\Omega t - 2\pi f t) - \varphi_0)]
 \end{aligned}$$

A l'analyseur de spectre, de part et d'autre du pic à la fréquence de battement  $\Omega$ , il apparaît 2 pics latéraux, décalés de  $\pm f$  dont l'amplitude sera notée  $V_{s,1}$ .

$$\text{D'où : } \frac{V_{s,1}}{V_{s,0}} = \frac{2\pi\delta A_0 \cos(i)}{\lambda_{HeNe}}$$

L'amplitude de vibration du miroir est donc :

$$\boxed{\delta A_0 = \frac{V_{s,1}}{V_{s,0}} \frac{\lambda_{HeNe}}{2\pi \cos(i)}}$$

Par exemple, si les pics latéraux sont à  $\frac{V_{s,1}}{V_{s,0}} = -50dB$  et pour  $\lambda_{HeNe} = 632.8nm$ ,  $i = 15^\circ$ , il vient :

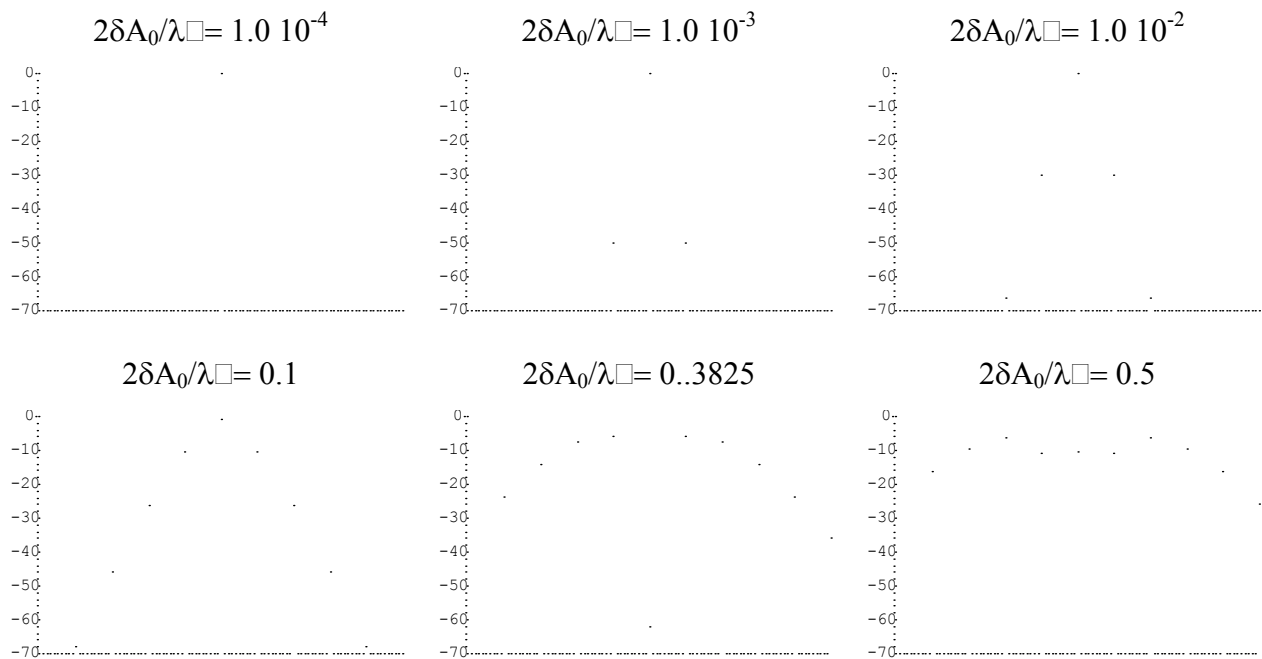
$$\delta A_0 = 10^{-\frac{50}{20}} \frac{632.8}{2\pi \cos(15^\circ)} = 0.33 \text{ nm}$$

De même, pour  $\frac{V_{s,1}}{V_{s,0}} = -40dB$ ,  $\delta A_0 = 1 \text{ nm}$  et pour  $\frac{V_{s,1}}{V_{s,0}} = -60dB$ ,  $\delta A_0 = 0.1 \text{ nm}$ .

Cette méthode est donc extrêmement sensible. Elle permet de mesurer l'amplitude du mouvement d'ensemble du miroir. Plus généralement, elle permet de mesurer des variations de chemin optique extrêmement faibles grâce à son excellent rapport signal à bruit.

**2° Cas : Forte amplitude de modulation de phase:**

Aux fortes amplitudes de modulation, il faut pousser le développement aux ordres supérieurs : le spectre s'élargit et il apparaît des pics latéraux séparés du pic central d'un nombre entier de fois la fréquence  $f$ . Pour un mouvement sinusoïdal, les amplitudes de ces différents pics latéraux sont données par des fonctions spéciales de *Bessel*. Dans le tableau qui suit, on suppose que  $i$ , angle d'incidence sur le miroir, A, est nul, de sorte que l'amplitude de la modulation de phase est simplement donnée par  $\delta\phi = 4\pi \delta A_0/\lambda$ . On donne l'allure des spectres obtenus pour des amplitudes  $\delta A_0$  croissantes. On a de plus rajouté un niveau de bruit de -70dB correspondant au dispositif expérimental.

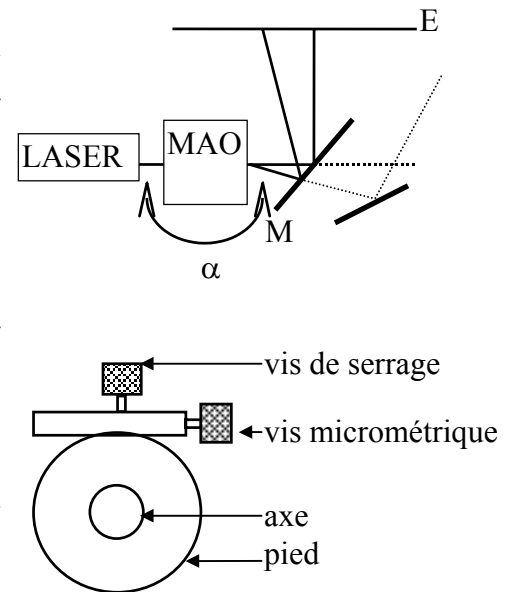


**PROCEDURE DE REGLAGE**

Il est recommandé de ne pas modifier la position des pieds vissés sur le banc.

### modulateur acousto-optique

- mettre l'alimentation sur marche et 12V et le commutateur de modulation d'amplitude sur 'interne'.
- insérer un miroir annexe M à 45° entre le MAO et le pied du premier miroir de façon à observer une tache ou plusieurs sur un écran E.
- Tourner délicatement le MAO (angle  $\alpha$ ) tout en vérifiant que le faisceau le traverse de façon à obtenir une intensité diffractée maximale sur l'ordre 1. On prendra soin de vérifier que la diffraction se produit vers la droite pour des raisons d'encombrement. NB : lorsque la vis de serrage est dévissée, on peut tourner l'axe du miroir à la main (réglage gros). La serrer pour obtenir l'action de la vis micrométrique (réglage fin).

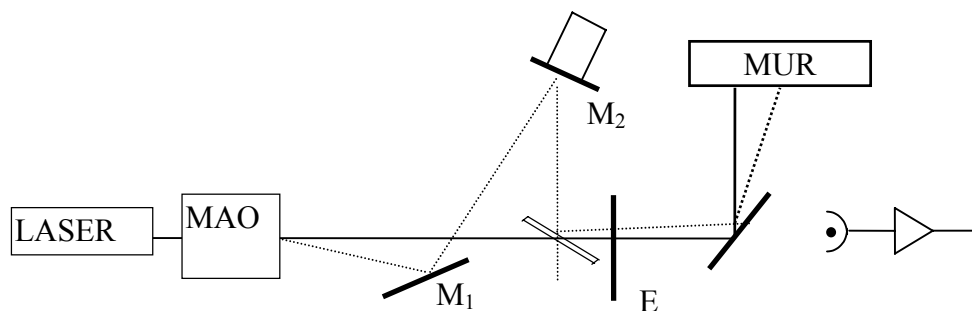


### miroirs

- $M_1$  est un petit miroir ( $1 \text{ cm}^2$ ) directement fixé dans une tige. En tournant la tige dans le pied, renvoyer l'ordre 0 vers le centre de  $M_2$  sans intercepter l'ordre 1.
- positionner de même  $M_2$  de sorte que le point d'impact du faisceau avec la séparatrice soit au centre de la séparatrice O.

### Séparatrice

C'est le point le plus délicat à régler. Cela consiste à confondre la direction de propagation des deux faisceaux émergents ; il suffit pour cela de les confondre en deux points, un proche de la séparatrice, un aussi éloigné que possible. On s'aidera avantageusement d'un miroir auxiliaire M placé à 45° devant le détecteur qui renvoie les deux faisceaux, sur un mur éloigné par exemple.



- Disposer un écran E (en bristol par exemple) juste après la séparatrice. Agir sur les vis micrométriques de  $M_2$  pour confondre les deux taches. Retirer l'écran.

- Agir sur les vis micrométriques de la séparatrice pour confondre les deux taches sur le mur. En général, du fait de l'épaisseur de la séparatrice, l'ordre 1 a été légèrement décalé. Replacer l'écran E et reprendre au point précédent.

En général, après deux ou trois itérations les faisceaux sont correctement confondus.

Il ne reste plus qu'à positionner le détecteur et connecter sa sortie sur un oscilloscope rapide (100MHz) ou un analyseur de spectre RF. Optimiser alors le signal de battement en affinant les réglages.

### **Céramique piézo-électrique**

Connecter directement la céramique piézo-électrique à un générateur basse fréquence. Etant donné l'inertie du système céramique/miroir et les faibles déplacements (fractions de nanomètres !) obtenus sous quelques volts, on a tout intérêt à se placer autour de la résonance mécanique du système qui se situe aux alentours de 90 kHz. Une fois le signal obtenu, on pourra ensuite faire varier cette fréquence et observer les résonances en amplitude du mouvement du miroir.