

Olympiades de Physique 2009

Un espion  
interférométrique



Martin DONZE et Pierre HEIDMANN

Elèves en TS3 au Lycée Louis le Grand

# *Un espion interférométrique*

<b>I. Présentation du sujet</b>	<b>2</b>
<b>1) Historique</b>	<b>2</b>
<b>2) Les différentes expériences</b>	<b>3</b>
1 - Utilisation du Speckle	3
2 - Interférométrie matérialisée sur un oscilloscope	6
3 - Interférométrie avec un signal sonore réel	9
<b>II. Les Expériences</b>	<b>10</b>
<b>1) Principe de la manipulation</b>	<b>10</b>
1 - Explication de l'interféromètre de Michelson	10
2 - Explication de l'interférométrie par speckle.	17
<b>2) Du théorique à l'aspect pratique</b>	<b>19</b>



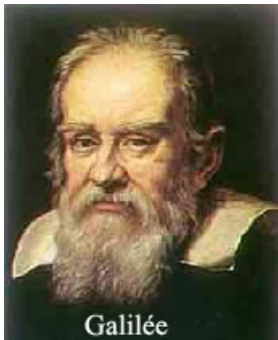
*L'espionnage est une pratique certainement aussi ancienne que les conflits humains. Mentionné dès le VI<sup>ème</sup> siècle avant J-C dans L'Art de la guerre, puis chez Homère dans L'Iliade ou même dans la Bible, le concept se matérialisera par des formes aussi primaires que sophistiquées et variées durant toute l'histoire de l'humanité. Il faudra cependant attendre l'époque moderne pour assister à une « professionnalisation », avec la mise en place de réseaux d'espionnage pérennes liés à l'appareil militaro-diplomatique et à un bond de leur popularité auprès du grand public. Développé durant la première guerre mondiale, l'espionnage est devenu affaire courante durant la Guerre Froide. Les troupes invisibles de la CIA et du KGB, agences américaine et soviétique ont mené une variété de tâches aux ordres de leurs maîtres politiques. Ces travaux incluaient des assassinats et la déstabilisation de régimes jugés officieusement dangereux. On ne pourra cependant oublier les objectifs intrinsèques de l'espionnage qui se veulent être la récupération secrète d'informations privées, nécessitant alors l'utilisation de dispositifs ingénieux, faisant appel aux découvertes scientifiques les plus pointues. Si la Guerre Froide a vu l'apparition d'appareils inventifs comme des appareils de photos déguisés en paquet à cigarettes, on remarquera facilement la fertilité de l'imagination humaine en ce qui concerne le domaine de l'espionnage : le succès des films à la James Bond est ostensiblement dû à l'ingéniosité des scénaristes en matière d'outillages ultra modernes dont sont pourvus à l'excès les espions. En somme, les différentes techniques ont fortement évolué au cours du temps, et cela parallèlement aux progrès constants de la physique. Le laser fait très certainement partie de l'arsenal de l'espion moderne. Nous présentons dans ce dossier la réalisation d'un système d'espionnage basé sur la technologie laser. Si ce système par interférométrie laser reste une méthode très précaire et même peu efficace, les principes qui la régissent n'en demeurent pas moins déroutants.*



# I. Présentation du sujet

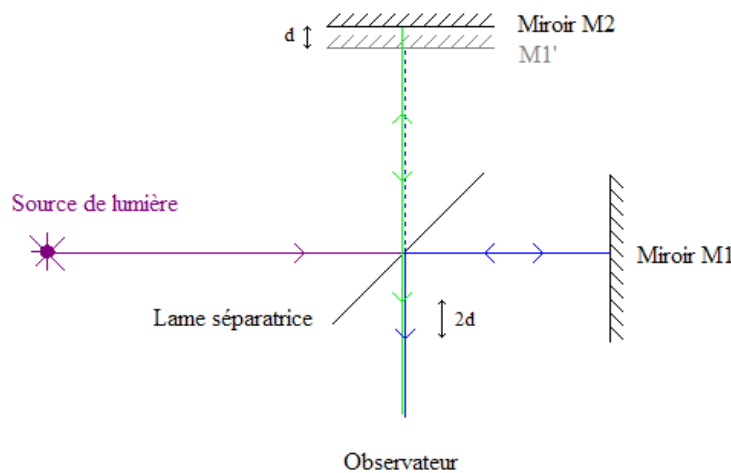
## 1) Historique

L'homme a toujours cherché à développer de nouveaux instruments dans le but d'approfondir le domaine infini de ses connaissances et mieux connaître le monde qui l'entoure. En témoigne par exemple la lunette astronomique de Galilée qui lui permit en 1610 d'observer les quatre satellites de Jupiter, faisant alors de cette dernière le centre d'un monde indépendant de la terre. Si cette découverte révolutionna l'astronomie à jamais, démontrant et complétant les fondements de la thèse copernicienne sur l'héliocentrisme contraire aux enseignements catholiques de l'époque, son intérêt réside dans notre cas à travers la démarche même de l'homme qui utilise un objet extérieur pour améliorer ses propres performances : ici Galilée par le simple fait d'utiliser un instrument affinant les détails de sa vision nue donnera le signal de départ d'une course visant à développer les méthodes de perception des phénomènes physiques à longue distance.



En ce qui concerne l'interférométrie il faudra cependant attendre le début du 19<sup>ème</sup> siècle pour que l'anglais Thomas Young réalise l'expérience qui mettra en évidence la nature ondulatoire de la

lumière. Il explicitera notamment le phénomène des franges d'interférence en observant un écran percé de deux petits trous et éclairé par une source ponctuelle. De cette expérience prendra forme peu à peu l'interférométrie contemporaine qui se concrétisera véritablement pour l'interférométrie laser avec les expériences d'Albert Abraham Michelson qui mettra au point un système d'interférences par division d'amplitude, l'appareil étant constitué principalement de deux miroirs et d'une lame semi réfléchissante comme l'explique le schéma théorique suivant :



En assistant dans le laboratoire Kastler Brossel à une expérience utilisant à grande échelle le principe de l'interférométrie, nous avons réfléchi à une démarche expérimentale relativement proche, reposant sur le même concept physique mais à notre portée. Après avoir pris contact avec le chercheur ayant réalisé l'expérience, ce dernier nous proposa différents supports théoriques sur lesquels baser notre propre montage. Nous décidâmes donc d'étudier les

tenants et les aboutissants de l'interférométrie laser dans ce qui la rapproche de l'espionnage. Nous avons dans ce contexte élaboré une série de trois expériences faisant appel à plusieurs facettes du principe d'interférométrie :

- Interférométrie par speckle et écoute d'un son à distance.
- Interférométrie par double miroir et illustration du principe théorique par le biais d'un oscilloscope.
- Interférométrie par double miroir et application concrète.

La dernière expérience étant très sensible, elle peut facilement varier selon les conditions expérimentales. Sa réalisation ne peut donc pas être assurée avec une fiabilité maximale.

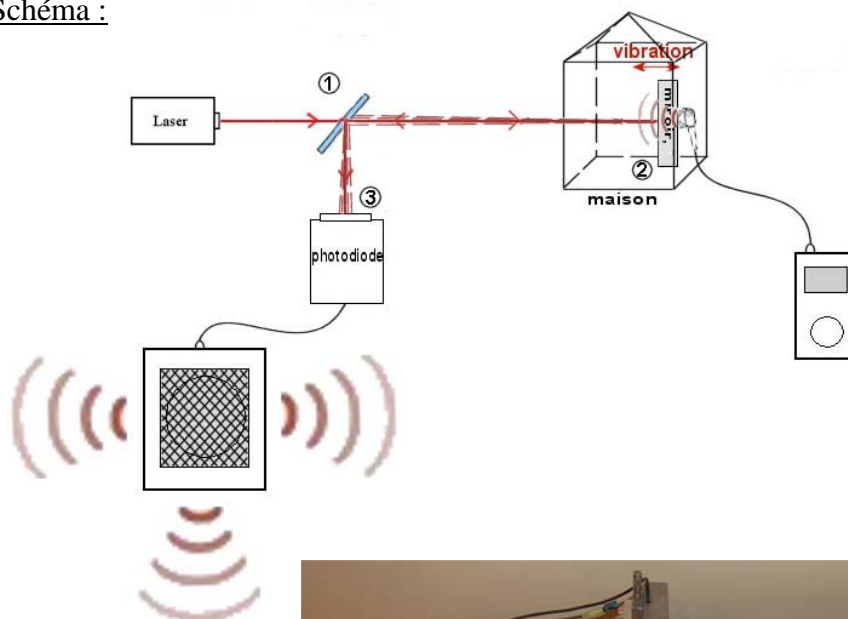
## **2) Les différentes expériences**

Toutes nos expériences auront le même objectif : réussir à capter un faible son (produisant une faible vibration mécanique) et de le retransmettre à distance sur un haut parleur. Tout cela en utilisant lumière et interférence.

### **1 - Utilisation du Speckle**

Cette expérience est l'illustration d'une méthode d'espionnage. On envoie un son varié dans un petit écouteur, un petit miroir (ou une surface réfléchissante) est placé devant l'écouteur et vibre légèrement en présence du son. On capte alors le message musical à l'aide d'un système interférométrique par speckle et le retranscrit dans un haut parleur.

Schéma :



Photographie :

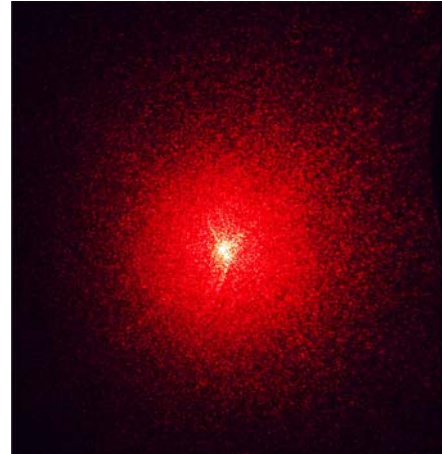


(1) Passage du faisceau par une lame séparatrice (ou miroir semi réfléchissant)

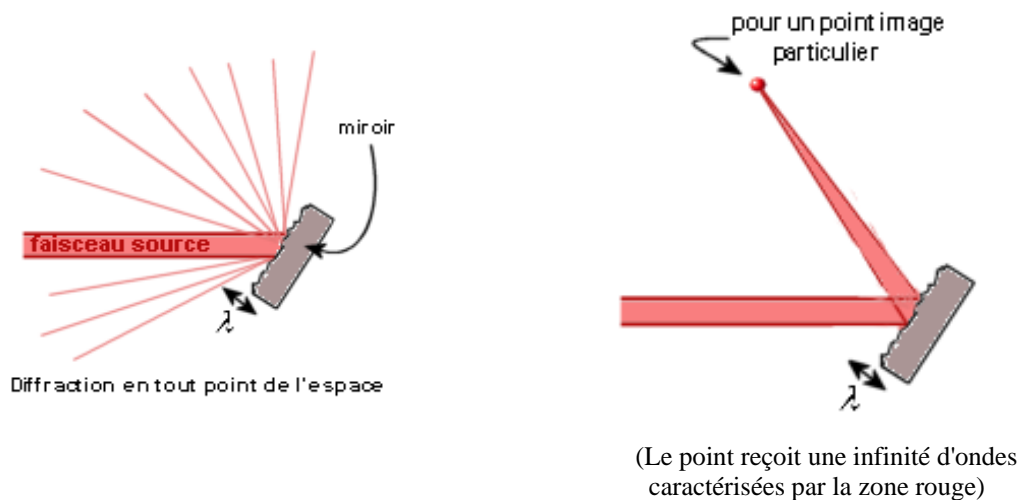
Dans cette expérience le dédoublement du faisceau n'est pas utile comme dans l'expérience suivante. Ainsi le principe de la lame séparatrice sera présenté dans la section suivante. Ici nous utilisons juste le fait qu'elle permet de réfléchir une partie de la lumière et à en laisser passer une autre. Comme on le voit sur le schéma, elle a son importance au retour du faisceau pour en envoyer une partie à la photodiode.

(2) Réception du faisceau par le miroir et effet de speckle

Le speckle correspond à l'ensemble des petites taches fluctuantes qui apparaissent dans la texture d'une image et qui lui donnent un aspect granuleux. Elles sont dues à la diffusion des ondes d'un faisceau de lumière cohérente par une surface présentant des irrégularités à l'échelle de la longueur d'onde. En effet la surface du miroir n'étant pas plane, elle diffuse en tout point le faisceau lumineux qu'elle a reçu. Le phénomène est donc dû aux interférences entre les rayons diffusés par le miroir. En terme simple, l'aspect granuleux est du au fait qu'en chaque point de notre plan image, la somme des ondes diffusées est soit en phase soit déphasé : d'où la présence de petits points lumineux et d'autres non-lumineux provoquant l'effet granuleux.

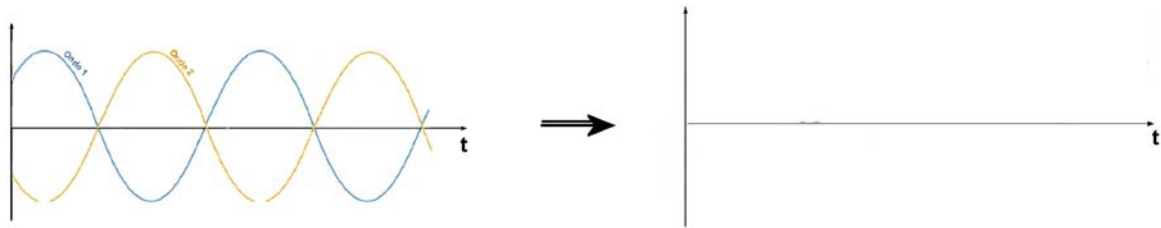


Pour mieux comprendre cet effet, on peut considérer tout d'abord que seuls deux points du miroir réfléchissent la lumière. On se trouve alors dans une configuration analogue à celle des deux trous de l'expérience de Thomas Young :

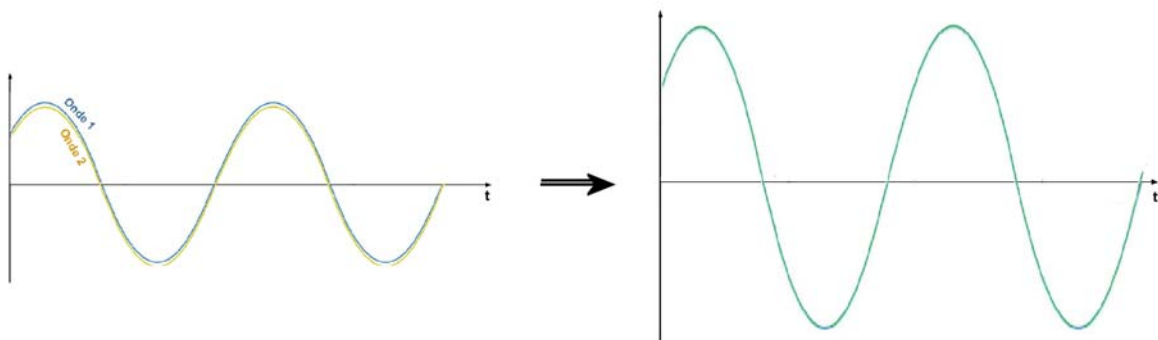


Ainsi à un point donné de l'écran on reçoit les deux ondes réémises par les deux points réfléchissants, mais leur phase respective dépend de la différence de chemin que suit la lumière. On peut donc se retrouver dans les deux situations opposées suivantes (ou dans toute situation intermédiaire selon la différence de chemin) :

- les ondes sont en opposition de phase, amenant à une onde totale nulle (point sans lumière) :



- les ondes sont soit en phase, amenant une onde max (point avec lumière) :

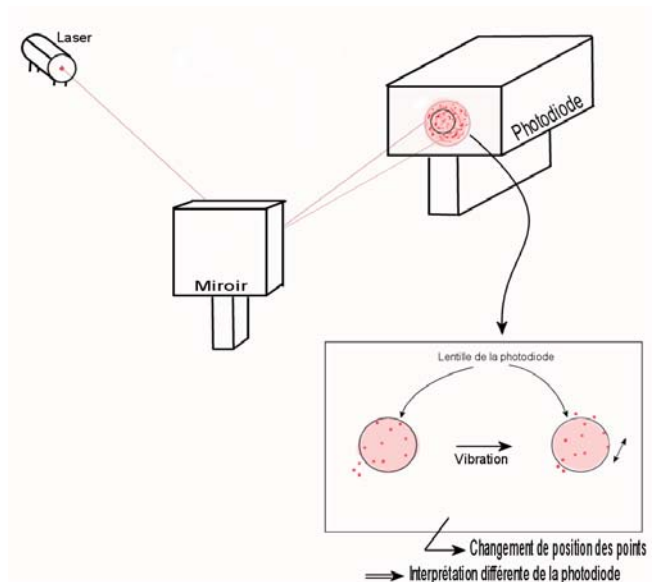


Ainsi pour chaque point sur l'écran nous avons une somme d'ondes de phases différentes donnant une onde finale plus ou moins brillante, provoquant une figure d'interférence. Dans le cas du speckle nous ne sommes pas seulement deux ondes, mais une infinité d'ondes produites par tous les points du miroir. Nous sommes donc une infinité d'ondes avec des phases plus ou moins variables du fait de la rugosité du miroir, qui change la longueur du parcours de la lumière et induit cet effet granuleux de speckle.

Dans notre expérience le miroir mobile que nous utilisons présente une rugosité suffisante pour produire nous avons ce type d'effet.

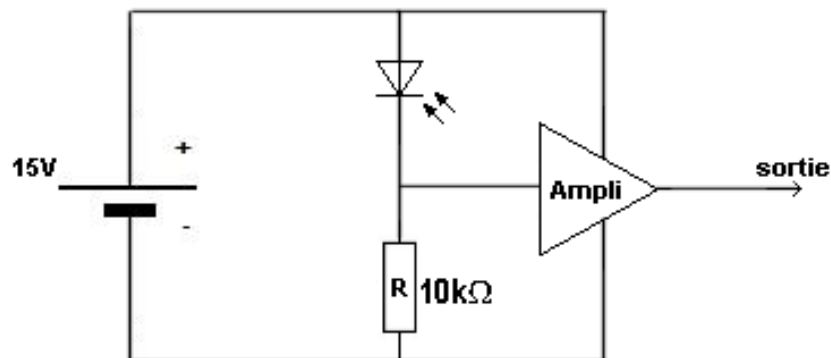
### (3) Effet sur la photodiode

Le faisceau granuleux réfléchi par le miroir atteint la lentille de la photodiode. Cette dernière mesure donc l'intensité lumineuse d'un grand nombre de points plus ou moins brillants. Du fait de la vibration de notre miroir, bien que faible, la position et les ondes respectives des points vont varier également au niveau de la photodiode et ceci va produire une variation de tension à la sortie de la photodiode proportionnelle au son que nous avons envoyé en premier lieu.



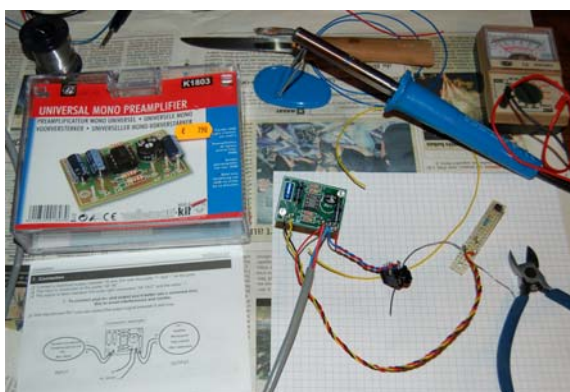
La partie théorique de cette étape sera vue plus en détails dans le chapitre suivant. En revanche, on peut ici s'attarder sur le rôle précis de la photodiode qui retranscrit la puissance lumineuse qu'elle reçoit en courant électrique. Ce courant est envoyé dans un petit amplificateur électronique qui en extrait la partie alternative de façon à éliminer la partie continue qui ne contient pas d'information utile dans notre cas ; puis l'amplifie de façon à piloter convenablement le haut-parleur. Comme le montre le schéma suivant, la photodiode agit comme un générateur de courant, et ce courant est converti en tension grâce à la résistance de  $10k\Omega$ . La variation de tension est mesurée et amplifiée par l'amplificateur.

Schéma :



Afin de réaliser ce montage, nous avons utilisé une petite plaque de circuit imprimé pour monter la photodiode et la résistance, l'ensemble étant placé sous un blindage pour éviter les parasites. Nous avons construit l'amplificateur à l'aide d'un kit à monter soi-même, prévu initialement pour amplifier le signal d'un microphone. L'ensemble est alimenté par une alimentation fixe de 15V.

Montage du kit et photographie de l'ensemble de détection :

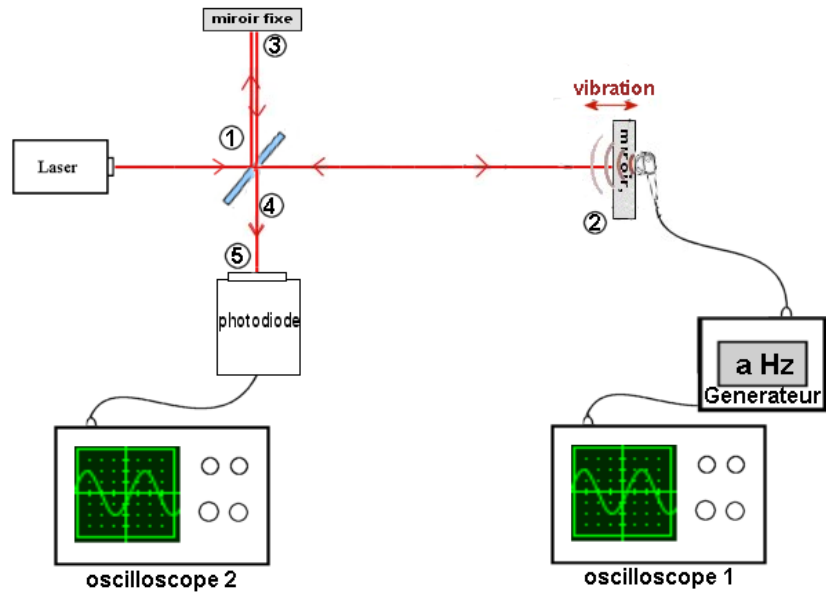


## **2 - Interférométrie matérialisée sur un oscilloscope**

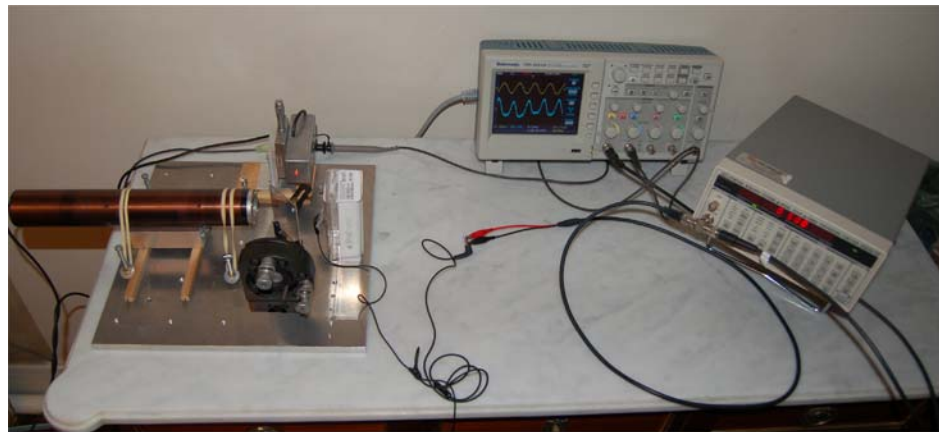
Cette expérience consiste à démontrer le fait qu'on peut également percevoir un son grâce à la lumière à l'aide d'un interféromètre de type Michelson, constitué d'une lame séparatrice et de deux miroirs. Pour bien mettre ce phénomène en évidence, nous allons tout d'abord faire une expérience simple où nous allons envoyer un son à fréquence constante à notre écouteur et à l'aide d'un double oscilloscope, voir si l'onde captée est la même que l'onde envoyée.



### Schéma :

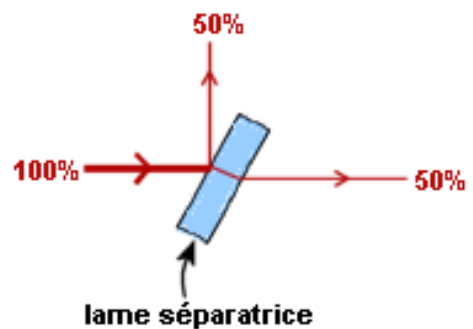


### Photographie :



### (1) Passage du faisceau par une lame séparatrice (ou miroir semi réfléchissant)

Cette lame a la particularité de ne réfléchir qu'une partie de la lumière qu'il reçoit, et de laisser passer l'autre partie. En d'autres termes, il sépare un rayon incident en deux flux lumineux, l'un réfléchi, l'autre réfracté. Les miroirs semi réfléchissants sont très importants en interférométrie. Comme son nom l'indique, son utilisation est nécessaire pour faire interférer deux rayons issus de la même source : les deux ondes réfléchies et transmises ont en effet la même fréquence et la même phase.



### (2) et (3) propagation dans les deux bras

Après avoir franchi la lame séparatrice, une partie du faisceau se dirige vers le miroir mobile. Le fait que le miroir réagisse au cours du temps au faible son qu'il reçoit, va faire varier la distance parcourue par le faisceau, bien que ce soit de manière minime. La vibration du miroir

va donc se faire sentir dans la longueur parcourue par la lumière dans ce bras de l'interféromètre. Après réflexion sur le miroir mobile, le faisceau se redirige vers la lame séparatrice dont une partie sera amenée à la photodiode.

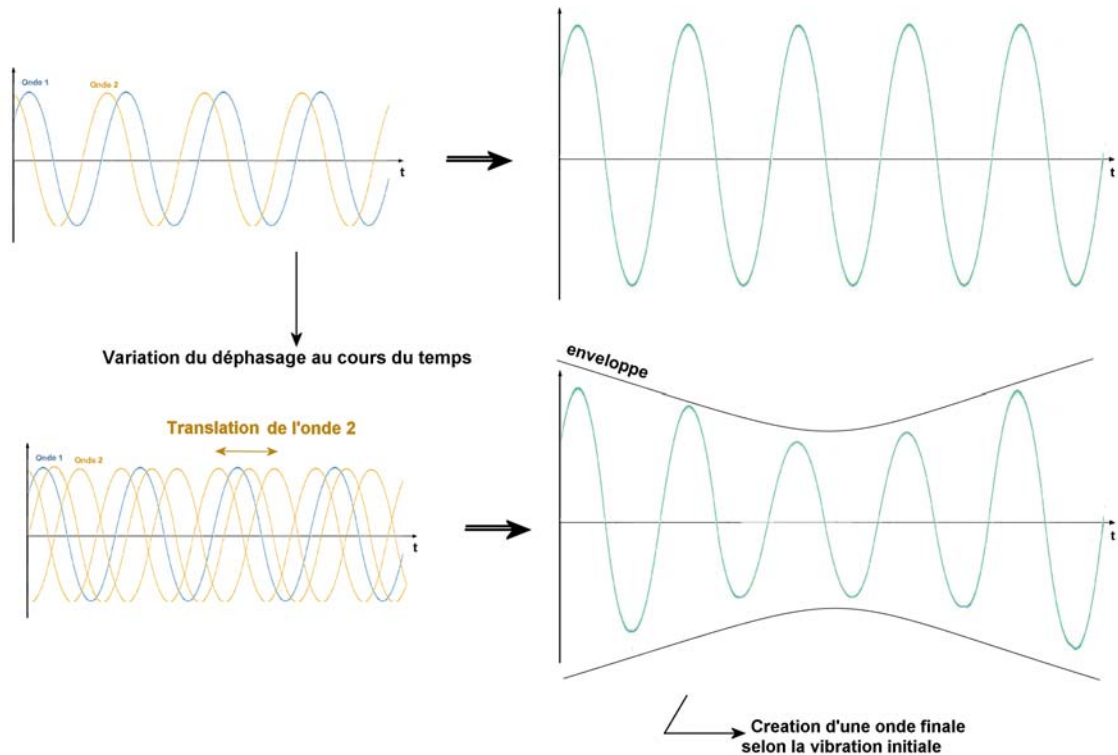
De même après réflexion sur la lame, une partie du faisceau laser se dirige vers le miroir immobile. Elle est reflétée par celui-ci et se redirige vers la lame et est en partie transmise vers la photodiode. Le fait que le miroir soit immobile est d'une importance capitale. La distance parcourue dans ce bras ne doit surtout pas changer en fonction du temps. Il permettra de mettre en évidence la vibration de l'autre miroir dans l'étape suivante à la recombinaison des deux faisceaux au niveau de la lame. Il forme une sorte de bras témoin.

#### (4) Recombinaison des deux bras au niveau de la lame

Les deux faisceaux sont recombinaisonnés au niveau de la lame séparatrice, conduisant à une onde proportionnelle à la somme des deux ondes se propageant vers la photodiode. Cette recombinaison doit répondre à une importante condition car les faisceaux doivent être parfaitement confondus afin qu'il y ait, comme avec le speckle, interférence entre les deux ondes. On se retrouve lors avec un seul faisceau laser se propageant vers la photodiode, mais dont l'amplitude de l'onde va dépendre de la façon dont les deux ondes s'ajoutent entre elles. On peut alors reprendre l'explication donnée pour le speckle et correspondant à l'interférence de deux ondes : l'amplitude de l'onde résultante va dépendre de la différence de phase entre les deux ondes issues des deux bras, et donc de la différence de longueur de ces deux bras : lorsque les ondes sont en phase, l'amplitude est maximale alors qu'elle est nulle lorsque les ondes sont en opposition de phase.

#### (5) Mesure et interférométrie

La photodiode va mesurer l'intensité du faisceau laser, dont la valeur va dépendre de la différence de longueur des deux bras et donc de la vibration provoquée par le son. On peut se demander qu'elle est la forme de l'onde lumineuse reçue par la photodiode. Elle résulte de la somme des deux ondes dans les bras, l'une d'elles étant invariante en fonction du temps, tandis que l'autre varie selon la vibration appliquée. Ainsi la vibration va changer le déphasage entre les deux ondes, modifiant l'amplitude de la somme. Ceci peut être schématisé de la manière suivante :



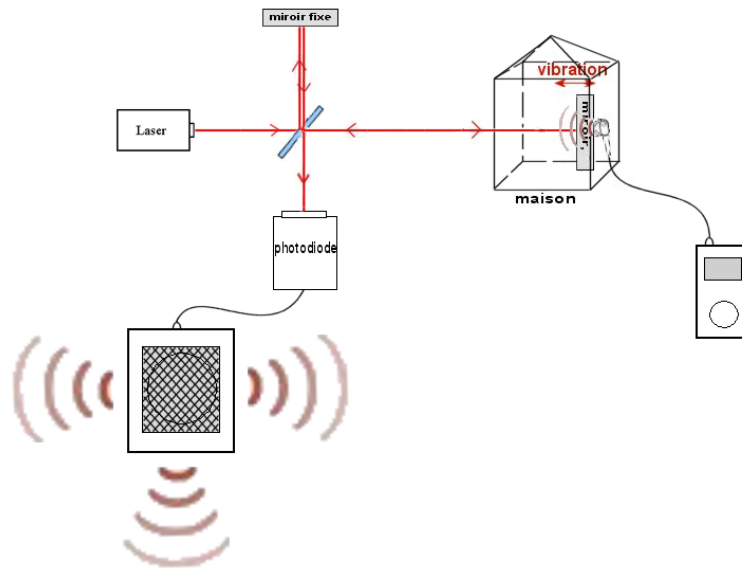
Il faut noter que la fréquence de l'onde lumineuse, de l'ordre de  $10^{15}$  Hz, est beaucoup plus élevée que celle de la variation de phase, de l'ordre de 1 kHz. L'onde résultante est donc essentiellement une onde sinusoïdale à la fréquence lumineuse, dont l'amplitude, c'est-à-dire l'enveloppe évolue selon le message sonore. C'est justement cette enveloppe que la photodiode va récupérer en détectant l'évolution de l'intensité de l'onde en fonction du temps.

Ainsi nous arrivons à retranscrire l'onde sonore envoyée au miroir mobile. A partir de là, pour modéliser cette retranscription par la lumière, il nous suffit de brancher sur un oscilloscope à deux voies, à la fois le signal au niveau de l'écouteur envoyant le faible son, et le signal issu de la photodiode. Si l'expérience fonctionne correctement les deux signaux devraient être similaires.

### 3 - Interférométrie avec un signal sonore réel

Cette expérience est fondée sur les mêmes principes que celle qui précède, à ceci près qu'au lieu d'utiliser un son constant, le son émis sera varié (musique ou message parlé) pour tenter de le retranscrire à l'aide d'un haut-parleur. Elle rentre donc, comme l'expérience par speckle, dans le contexte de l'espionnage.

Cette expérience se révèle toutefois beaucoup plus difficile à réaliser que les deux autres. On verra dans le chapitre suivant quelles sont les contraintes qui restreignent cette expérience.



## II. Les Expériences

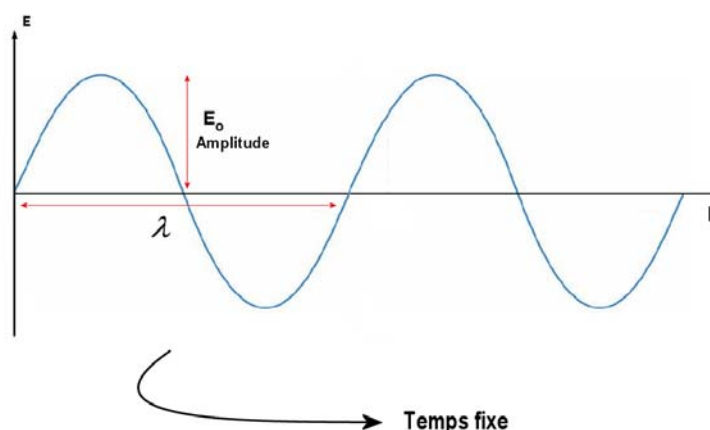
### 1) Principe de la manipulation

#### 1 - Explication de l'interféromètre de Michelson

Dans cette partie nous allons chercher à expliquer comment l'interféromètre de Michelson permet de reproduire un son dans nos expériences. Nous allons tout d'abord décrire la propagation du champ électromagnétique, puis nous nous intéresserons au principe de base de l'interféromètre de Michelson avant d'appliquer ces concepts à la reproduction d'un son.

##### (1) Modélisation du champ électromagnétique

Pour expliquer les interférences lumineuses, il est nécessaire de comprendre comment se comporte la lumière, le champ électromagnétique, qui est au cœur de nos expériences. Celui-ci se propage à la vitesse de la lumière  $c \approx 300\,000 \text{ km/s}$ , et pour un faisceau laser, peut être modélisé par le champ  $E(L,t)$ , où  $L$  est la position longitudinale dans le faisceau. Ainsi le champ dépend de deux variables  $L$  et  $t$ , et on peut s'en faire une représentation graphique en fixant l'une ou l'autre variable. Par conséquent l'évolution spatiale de l'onde dans le faisceau à un instant  $t$  donné est représentée par la figure suivante :

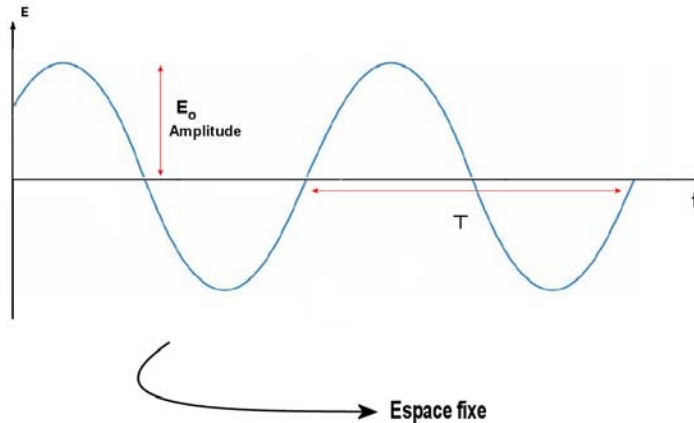


Ainsi, en fonction uniquement de L, le champ a une forme sinusoïdale :

$$E(L) = E_0 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} L + \varphi_t\right)$$

où  $E_0$  est l'amplitude du champ,  $\frac{2\pi}{\lambda}$  est la fréquence et  $\varphi_t$  est une constante dépendant à priori de t, et  $\lambda$  est la longueur d'onde, c'est-à-dire la période spatiale de l'onde.

De la même façon, on peut représenter l'évolution du champ en fonction du temps, à une position L donnée dans le faisceau.



En fonction de t, le champ a donc aussi une forme sinusoïdale :  $E(t) = E_0 \cdot \sin(\omega.t + \varphi_L)$

où  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  est la fréquence (T est la période temporelle) et  $\varphi_L$  est une constante dépendant de L.

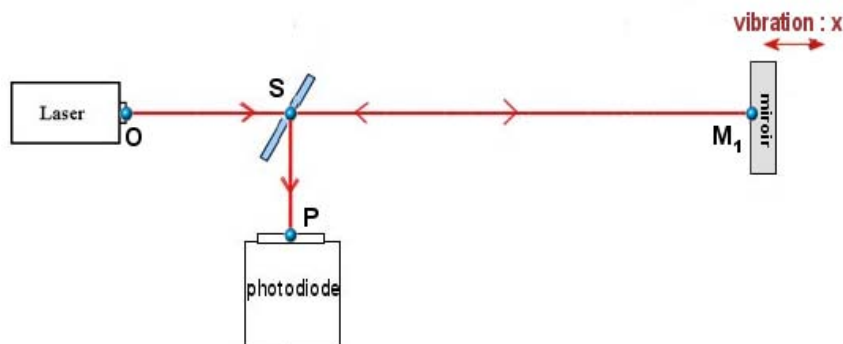
Ainsi, on déduit de ces représentations la formule générale du champ, en fonction du temps et

de l'espace :  $E(L,t) = E_0 \cdot \sin\left(\omega.t + \frac{2\pi}{\lambda} L\right)$

## (2) Interféromètre de Michelson

Il nous faut donc déterminer les longueurs  $L_1$  et  $L_2$  parcourues par la lumière dans chacun des bras de l'interféromètre.

Branche  $L_1$  :

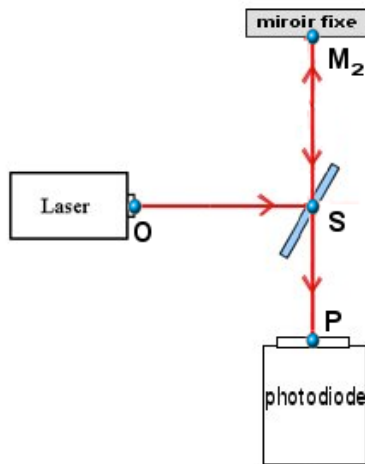


On a  $L_1 = OS + 2.SM_1 + SP$

On note  $OS + SP = k$  et  $SM_1 = l_1 + x(t)$ ,  $l_1$  est la longueur du bras constant en fonction du temps, alors que  $x(t)$  représente la vibration du miroir induite par l'onde sonore.

On obtient :  $\underline{L_1 = k + 2(l_1 + x(t))}$

Branche  $L_2$  :



On a  $L_2 = OS + 2.SM_2 + SP$

De même on note  $SM_2 = l_2$

On obtient  $\underline{\underline{L_2 = k + 2.l_2}}$

A présent évaluons le champ électrique  $E$  reçu par la photodiode, la lumière parcourant deux chemins différents, on a :  $E = E_1 + E_2$ , où  $E_1$  est le champ électrique de l'onde parcourant  $L_1$  et  $E_2$  est le champ électrique de l'onde parcourant  $L_2$ . Le champ  $E$  est donc la somme de deux sinusoïdes.

Soit d'après le premier point on a :

$$E = E_0 \cdot \sin\left(\omega.t + \frac{2\pi}{\lambda} L_1\right) + E_0 \cdot \sin\left(\omega.t + \frac{2\pi}{\lambda} L_2\right)$$

$$= E_0 \cdot \left[ \sin\left(\omega.t + \frac{2\pi}{\lambda} L_1\right) + \sin\left(\omega.t + \frac{2\pi}{\lambda} L_2\right) \right]$$

On peut modifier cette expression en utilisant les formules de transformation de la somme de deux sinus :

$$\sin(a) + \sin(b) = \sin\left(\frac{a+b}{2} + \frac{a-b}{2}\right) + \sin\left(\frac{a+b}{2} - \frac{a-b}{2}\right)$$

$$= \sin\left(\frac{a+b}{2}\right)\cos\left(\frac{a-b}{2}\right) + \sin\left(\frac{a-b}{2}\right)\cos\left(\frac{a+b}{2}\right)$$

$$+ \sin\left(\frac{a+b}{2}\right)\cos\left(\frac{a-b}{2}\right) - \sin\left(\frac{a-b}{2}\right)\cos\left(\frac{a+b}{2}\right)$$

$$= 2 \cdot \sin\left(\frac{a+b}{2}\right)\cos\left(\frac{a-b}{2}\right)$$

En l'appliquant à notre formule, le champ électrique reçu par la photodiode s'écrit donc :

$$E = 2.E_0 \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{\lambda}(L_1 + L_2)\right) \cos\left(\frac{\pi}{\lambda}(L_1 - L_2)\right)$$

Le champ apparaît comme un terme oscillant à la fréquence optique (premier terme du sinus), multiplié par un terme dépendant uniquement de la différence de chemin  $L_1 - L_2$  entre les deux bras (dernier terme en cosinus). On retrouve ici l'interprétation en terme d'onde lumineuse dont l'enveloppe est modifiée par la différence de chemin, donnée dans I.2.2.

Nous pouvons maintenant calculer l'intensité lumineuse reçue par la lumière. On admettra la relation  $I = E^2$ . On obtient :  $I = 4.E_0^2 \cdot \sin^2\left(\omega t + \frac{\pi}{\lambda}(L_1 + L_2)\right) \cos^2\left(\frac{\pi}{\lambda}(L_1 - L_2)\right)$

Or, le terme en  $\sin^2$  évolue à une fréquence très élevée de l'ordre de  $10^{15}$  Hz, et n'est en fait pas vu par la photodiode, qui en effectue la moyenne, la moyenne de  $\sin^2$  étant égale à  $\frac{1}{2}$  on a donc :

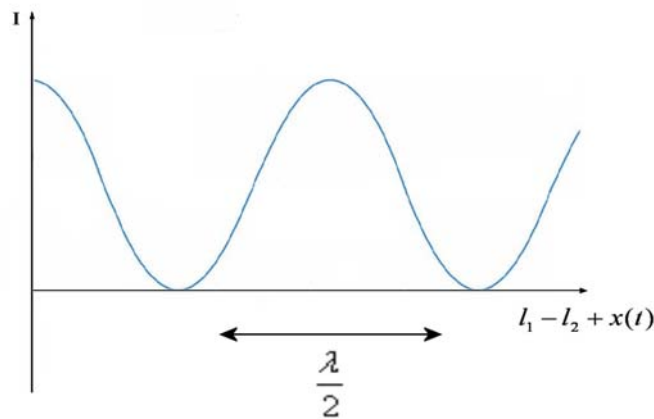
$$I = 2.E_0^2 \cos^2\left(\frac{\pi}{\lambda}(L_1 - L_2)\right)$$

Or  $L_1 - L_2 = 2 \cdot (l_1 + x(t) - l_2)$

$$\text{Soit } \boxed{I = 2.E_0^2 \cos^2\left(\frac{2\pi}{\lambda}(l_1 - l_2 + x(t))\right)}$$

L'intensité est une fonction périodique de la différence de longueur entre les deux bras de période  $\frac{\lambda}{2}$ .

Tracé de I :



Cette figure met en évidence les différentes franges d'interférences de l'interféromètre : lorsque la différence des longueurs est nulle modulo  $\frac{\lambda}{2}$ , alors l'intensité est maximale. Et entre deux telles franges lumineuses, on trouve une frange noire pour laquelle l'intensité est nulle.

### (3) Reproduction des vibrations du miroir

Le message sonore délivré par l'écouteur fait vibrer le miroir, ce qui va changer la différence de chemin entre les deux bras et se traduire par une variation de l'intensité lumineuse reçue

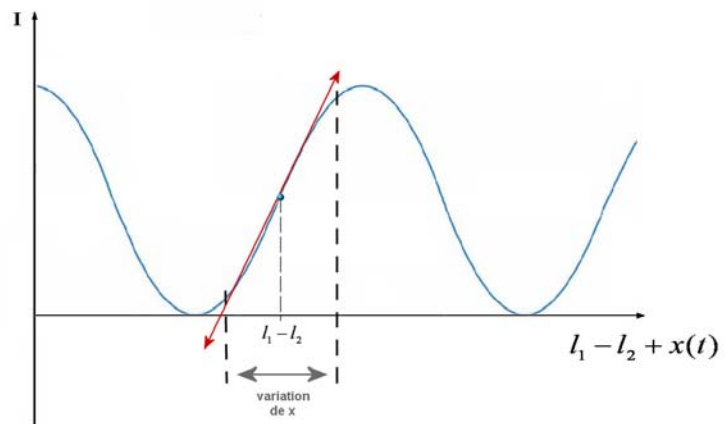
par la photodiode. Pour que le courant de celle-ci reproduise le message sonore, il nous faut obtenir une intensité proportionnelle à la variation  $x(t)$  du miroir. Ceci répond à deux conditions importantes :

- Il faut que  $l_1-l_2$  reste plus ou moins constant et bien placé sur le profil des franges d'interférences.
- Il faut que le cosinus soit assimilable à une droite sur la plage de variation de  $x$ . En effet s'il n'y a pas de droite à ce niveau là, on n'aura pas  $I = a.x$ , faussant le résultat.

Pour que cela paraisse plus clair on va estimer 2 cas, l'un bon et l'autre mauvais :

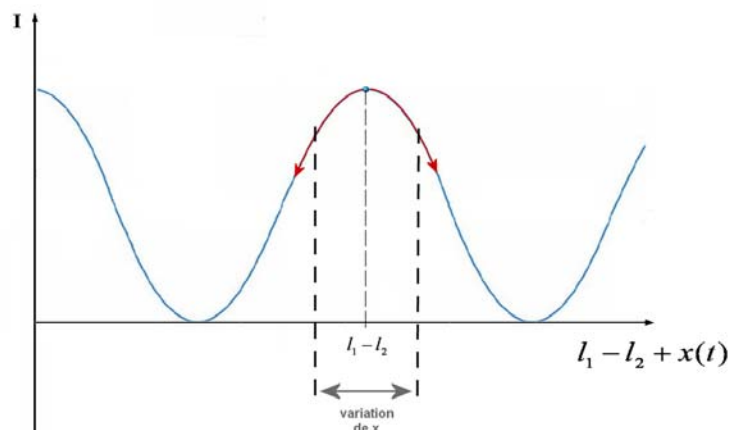
### 1<sup>er</sup> cas :

Dans ce cas,  $l_1-l_2$  est un point bien placé car le résultat d'une variation de  $x$  peut se modéliser par une droite. On a bien  $I = a.x$  où  $a$  est la pente correspondant à  $l_1-l_2$ . L'intensité évoluera donc en fonction du temps comme le fait la vibration  $x$ .



### 2<sup>ème</sup> cas :

Dans ce cas,  $l_1-l_2$  est mal placé car une variation positive ou négative de  $x$  produit toujours une diminution de l'intensité. Le signal envoyé au haut-parleur ne sera donc pas conforme à la vibration  $x(t)$ .



### (4) Interprétation des différentes contraintes qui s'opposent à l'expérience.

Les deux conditions précédentes expliquant en partie les difficultés de réalisation de l'expérience. Mais l'interférométrie laser s'avère un dispositif très sensible, une variation de longueur inférieure au micron produirait des effets audibles (variation de  $\frac{\lambda}{2}$ , et dans notre cas la longueur de notre laser est 633nm). Elle est donc sensible à de nombreuses perturbations, et en premier lieu, à celles produites par l'effet Larsen.

#### a) L'effet Larsen

Phénomène physique de rétroaction acoustique découvert par le physicien danois Søren Larsen, cet effet se produit principalement quand l'émetteur et le récepteur d'un système audio sont trop proches l'un de l'autre. Le son émis par l'émetteur est reçu par le récepteur qui le

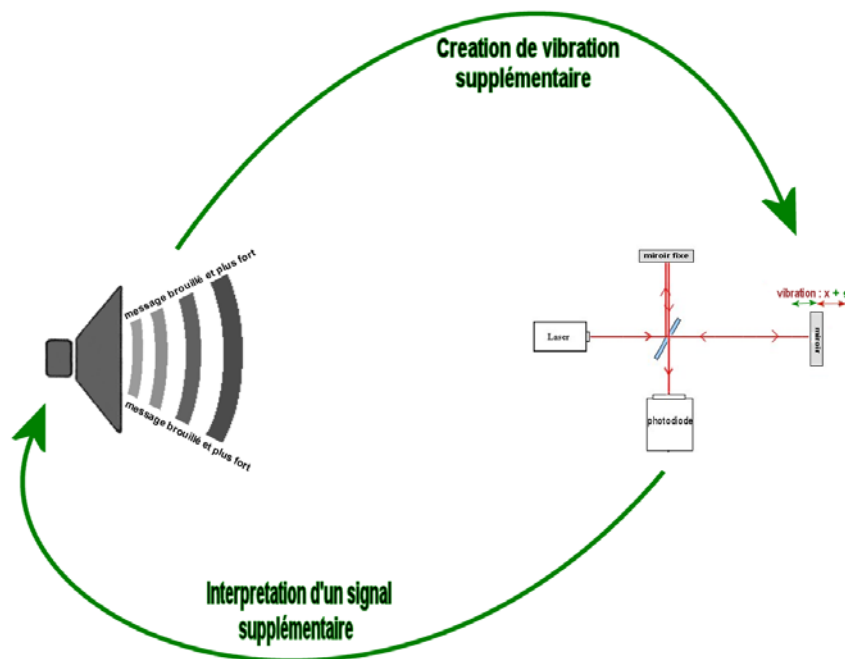


retransmet de façon amplifiée à l'émetteur. Cette boucle produit un signal auto-ondulatoire qui augmente progressivement en intensité jusqu'à saturer le système.

Ce phénomène est fréquent dans tout système de sonorisation et la fréquence du son résultant dépend des fréquences de résonance des composants mécaniques et électroniques du système audio, de la distance séparant émetteur et récepteur, des propriétés acoustiques du lieu d'écoute et du caractère directionnel du récepteur. Il peut aussi donner un son ondulateur dans un système où l'émetteur et le récepteur introduisent un délai entre le moment où le son est perçu et le moment où le son est émis (par exemple, deux téléphones en communication et proches).

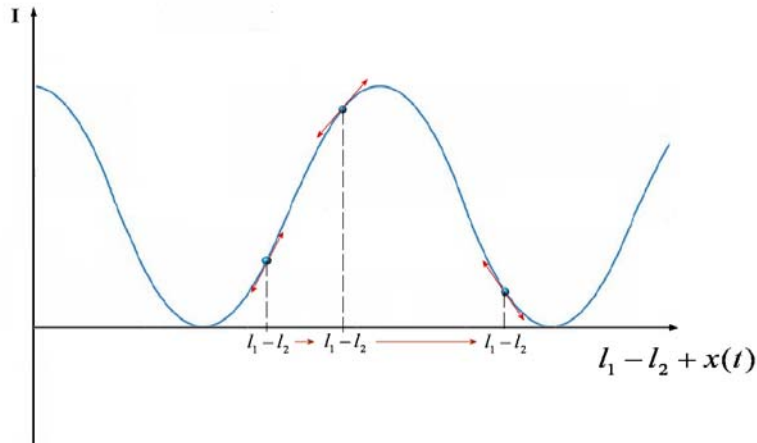
Dans notre cas, le son réémis par l'enceinte entraîne des perturbations dans l'espace environnant et peut faire vibrer les miroirs de l'interféromètre. Nous assisterons donc à une modification de la vibration de notre système, qui vient s'ajouter à celle que l'on cherche à décrypter. La photodiode analysera ce signal, qui sera retranscrit par l'enceinte. Nous obtenons ainsi un cercle vicieux qui peut conduire à l'apparition d'un son allant en s'amplifiant jusqu'à masquer complètement le message sonore que l'on cherche à reproduire.

L'effet est évidemment proportionnel au volume que l'on règle au haut-parleur. Mais notre "microphone laser" s'avérant de là particulièrement sensible, il nous faut soit isoler les deux parties (haut-parleur et micro) soit bien les éloigner, de quelques mètres, pour empêcher cet effet Larsen !



### b) Linéarité de la réponse :

Nous allons revenir dans cette section sur les deux conditions établies pour que l'intensité  $I$  détectée par la photodiode soit proportionnelle à la vibration  $x(t)$ . Nous avons précisé que  $I_1-I_2$  devait rester constant, ce qui n'est en général pas le cas. De nombreuses perturbations peuvent conduire à une variation de  $I_1-I_2$  sur une échelle de l'ordre de la longueur d'onde  $\lambda$  : bruits ambiants, dérives thermiques... Le point  $I_1-I_2$  n'est donc pas fixe en fonction du temps et parcourt la figure des franges d'interférences :

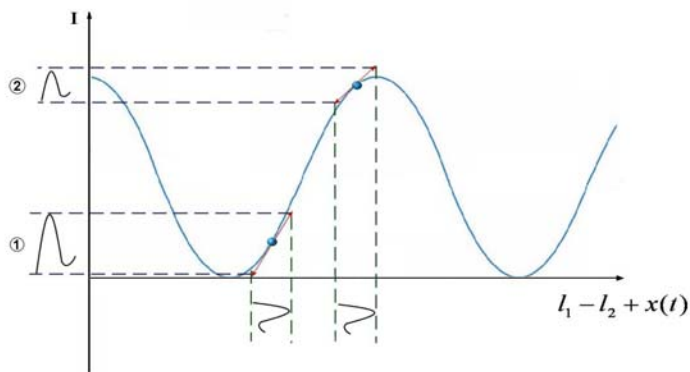


Ainsi les pentes de  $I$  en fonction de  $x(t)$  varient en fonction du temps. Pour faciliter l'explication, on va distinguer deux cas : le cas où la pente est nulle (au sommet des sinusoides) et le cas où la pente varie mais n'est pas nulle.

- Variation de la pente :

Si la pente dans la relation  $I=ax$  varie avec le temps, un message sonore  $x(t)$  va produire un signal d'intensité  $I(t)$  dont l'amplitude varie au cours du temps : si la pente est faible, le son qui sera envoyé à notre haut-parleur sera diminué. Par conséquent on aura une alternance au cours du temps (en fonction des déplacements de  $l_1-l_2$ ) du volume sonore obtenu sur le haut-parleur. Si la variation de  $l_1-l_2$  est lente, l'effet sera similaire à celui que l'on obtiendrait en faisant varier le bouton de volume de l'amplificateur précédent le haut-parleur. Par contre si la variation est plus rapide, cela peut brouiller le message sonore.

Schéma illustrant l'effet :



On prend comme exemple pour la variation de  $x$  une onde sonore donnée :

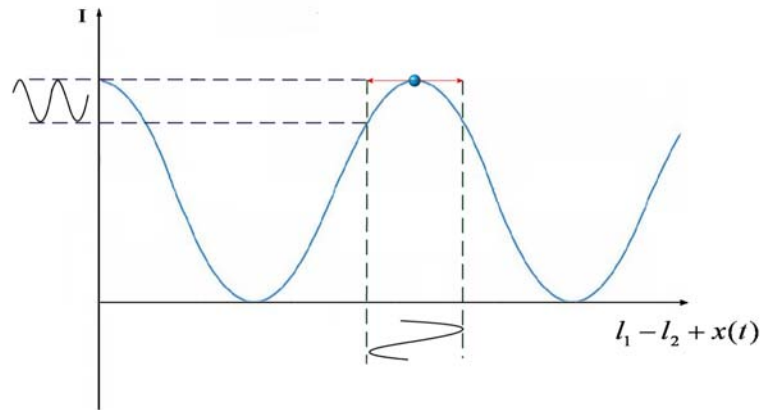


On obtient alors des variations d'intensité d'amplitudes différentes selon la pente : ① > ②

- Pente nulle :

Intéressons-nous maintenant au cas particulier où la pente est nulle. En ce cas précis, la variation de  $x$  n'est plus du tout assimilable à une droite, car on obtient une sorte de haut de parabole où pour une image donnée il y a plusieurs valeur de  $x$  possible. Ainsi, nous avons un dédoublement de l'onde initiale  $x$  en  $I$  :

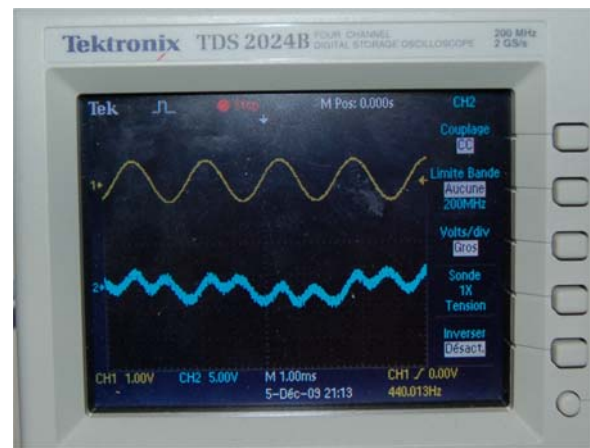
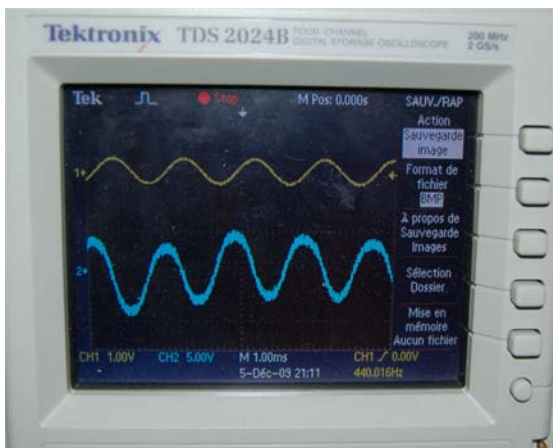
Schéma illustrant l'effet :



On prend comme exemple pour la variation de x une onde donnée :

On obtient bien alors une onde dédoublé par rapport à l'onde initial :

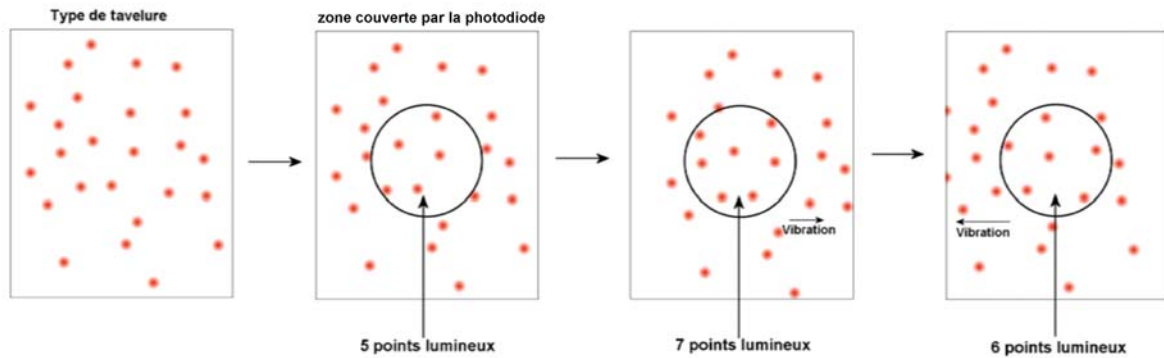
L'application de la formule  $I=ax$  avec  $a=0$  conduit à une variation d'intensité nulle, ce qui n'est pas correct d'après le schéma. En fait la dépendance de I en fonction de x ressemble au sommet d'une parabole, ce qui donne une relation de la forme  $I=bx^2$ . L'interféromètre élève au carré la vibration du miroir! Si la vibration est sinusoïdale à la fréquence f, il va en résulter un signal sur le haut parleur à la fréquence double 2f. Le message sonore devient donc inaudible.



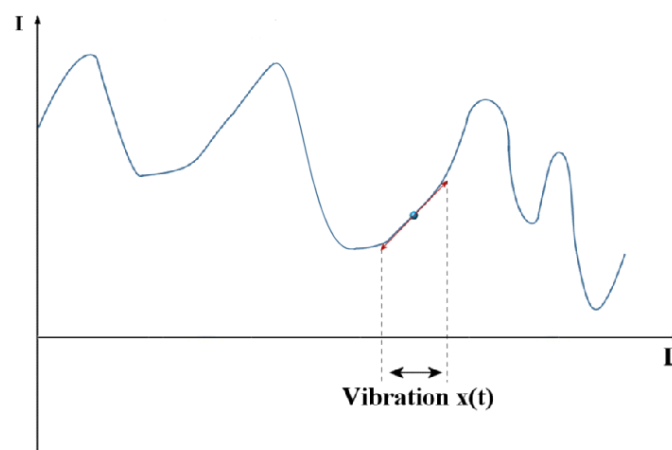
## 2 - Explication de l'interférométrie par speckle.

L'analyse théorique et la mise en équation de ce phénomène s'avèrent toutefois beaucoup plus difficile que dans le cas de l'interférométrie de Michelson. Pour ce dernier, la lumière arrivant sur la photodiode résulte de l'interférence entre les deux ondes se propageant dans les bras de l'interféromètre et nous avons pu mettre l'effet d'interférence en équation, faisant apparaître une intensité lumineuse qui dépend de la différence de chemin. Pour le cas qui nous intéresse maintenant, l'interférence résulte d'une infinité d'ondes que nous devons sommer entre elles, les différences de chemin dépendant de la rugosité du miroir. Il s'avère donc difficile, voire impossible de déterminer quels sont les points lumineux éteints à la surface de la photodiode, car cela dépend de la forme exacte du faisceau laser sur le miroir, de la rugosité précise à l'échelle de la longueur d'onde de ce dernier, et enfin de la position précise de la photodiode dans la lumière réfléchi. Si nous ne pouvons mettre en équation ce phénomène nous pouvons constater expérimentalement son existence, et visualiser ce réseau complexe de tâches

lumineuses (speckle) résultat des interférences des ondes multiples réfléchies sur la surface rugueuse du miroir. On peut alors se demander comment la photodiode est sensible aux vibrations du miroir. Lorsque le miroir se déplace, cela modifie la distance entre ce dernier et la photodiode. Le réseau complexe de tavelures à la surface de celle-ci s'en trouve alors modifié, impliquant un changement de l'intensité lumineuse mesurée.



Si nous montrons ainsi que l'intensité  $I$  mesurée dépend de la distance  $L$  au miroir, nous ne connaissons pas la forme exacte de la fonction  $I(L)$ , qui dépend de la structure précise du réseau de tavelures. Il est certain que cette fonction est beaucoup plus complexe que la dépendance en  $\cos^2$  que nous avons obtenue pour l'interféromètre de Michelson. Ceci ne pose pas de problème en pratique puisque nous avons montré que pour des petits déplacements  $x$  du miroir, la forme globale de la fonction  $I(L+x)$  importe peu : pour reproduire le message sonore seul compte la pente  $I=ax$  au point de fonctionnement choisi. Lorsque nous réalisons l'expérience, nous réglons « à l'oreille » la position du miroir dans le réseau de tavelures de façon à avoir une reproduction la meilleure possible, c'est-à-dire une pente  $a$  importante et stable vis-à-vis des perturbations (vibrations,...).

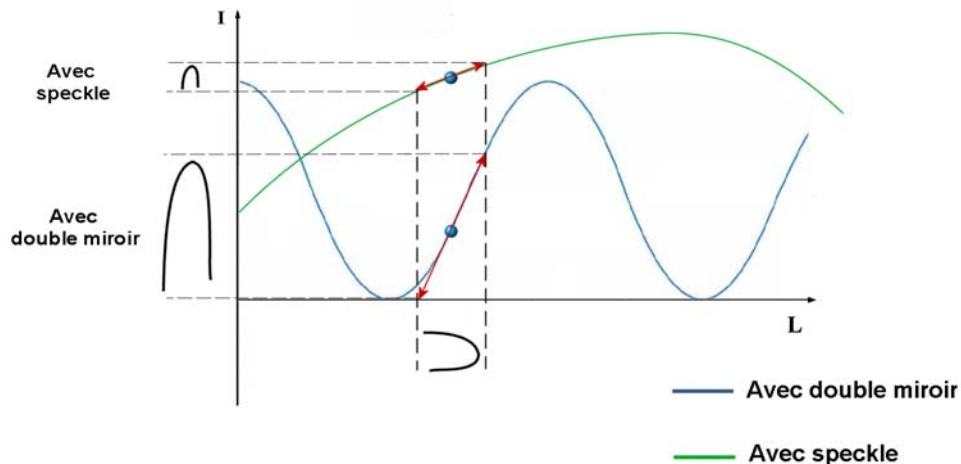


Nous avons constaté expérimentalement que la pente  $a$  est plus faible que dans le cas de l'interféromètre de Michelson : nous devons augmenter le volume de l'amplificateur pour obtenir le même niveau sonore dans l'enceinte. Cela signifie que l'interféromètre par speckle est moins sensible. Cela représente en fait un avantage : s'il suffit de perturbations correspondant à une fraction de longueur d'onde pour modifier du tout au tout la pente de l'interféromètre de Michelson, l'interféromètre par speckle s'avère beaucoup plus stable. On

est donc beaucoup moins sensible aux défauts que l'on avait notés avec l'interféromètre de Michelson, tels que l'effet Larsen ou la non linéarité de la réponse.

Comme nous allons le voir dans la section suivante présentant les résultats expérimentaux, l'interféromètre par speckle permet de réaliser un espion laser de conception plus simple et plus robuste.

Schéma : à la même échelle on devrait avoir une pente beaucoup plus faible avec le speckle comme ceci :



## 2) Du théorique à l'aspect pratique

On a vu que l'interféromètre de Michelson était soumis à de nombreuses contraintes: effet de non-linéarité, effet Larsen... qui contribuaient à l'intérêt physique de notre exposé. En revanche, son côté pratique s'en trouve diminué.

L'interféromètre de Michelson est un instrument très sensible, et c'est d'ailleurs cette sensibilité qui ruine son côté pratique et qui est la cause principale de ces contraintes, mais il est également un appareil délicat qui nécessite un réglage précis. Les interférences ne sont appréciables que lorsque les deux faisceaux issus des deux bras se recouvrent parfaitement sur la photodiode, ce qui est d'autant plus difficile à réaliser que la distance entre la lame séparatrice et le miroir mobile est grande. Une grande distance peut aussi signifier plus de vibrations, auxquelles l'interféromètre est particulièrement sensible. Ainsi nous avons pu reproduire le message sonore sur l'oscilloscope lorsque le bras faisait quelques centimètres de long, mais l'expérience devenait déjà délicate si la source sonore était éloignée de plusieurs dizaines de centimètre. Et notre expérience est à l'échelle réduite d'une maison de poupée : il paraît invraisemblable de réaliser un micro-espion à l'échelle réelle par cette technique d'interférométrie, capable d'espionner une discussion à plusieurs centaines de mètres de distance.

En revanche, l'interférométrie par speckle ne présente pas ces inconvénients. Nous avons constaté lors de nos expériences un bien meilleur robustesse de la méthode vis-à-vis des problèmes de non-linéarité ou d'effet Larsen. Nous avons également remarqué que le son reproduit paraît net, et cela quelque soit la distance où l'on se trouve du son que l'on cherche à capter. Le speckle peut se propager à relativement grande distance. Imaginons un espion qui

cherche à écouter une conversation située dans une pièce. Les vibrations sonores devraient être suffisantes pour faire vibrer légèrement les fenêtres de la pièce, fenêtres qui fourniraient une surface suffisante réfléchissante pour un faisceau laser (dans l'infrarouge bien sûr ! Pour ne pas être détecté). Un laser, une lame séparatrice, une photodiode et le tour est joué, toute la discussion est à portée de notre espion !

Peut-être, dans quelques années, lorsque le principe sera plus abouti, pourrons-nous trouver dans un film d'agent secret, ou bien même dans le commerce, un objet utilisant cette méthode. Qui sait...

*Ainsi, dans le cadre de cet exposé, nous avons été confronté aux contraintes liées aux conditions expérimentales qui se révèlent être bien souvent un barrage infranchissable vers la mise en pratique d'un concept théorique. Nous voulions construire un interféromètre-espion selon un principe utilisé à grande échelle pour traquer les étoiles lointaines avec des réseaux de radiotélescopes, ou encore pour explorer ces mystérieuses ondes gravitationnelles qui seraient produites par les étoiles mourantes ou les trous noirs, et dont le passage sur terre pourrait se révéler grâce à des interféromètres géants. Mais il semblerait finalement que qui peut le plus ne peut pas nécessairement le mieux, et si James Bond, un jour, utilise un laser pour espionner ces ennemis, ce sera sans doute avec un dispositif basé sur la technique plus simple et plus robuste de l'interféromètre par speckle. Si l'interférométrie laser est loin d'être le futur gadget high-tech exhibé par le séduisant Daniel Craig sur nos écrans de télévisions, elle n'en demeure pas moins une expérience pertinente à notre niveau en ce sens qu'elle nous a permis d'aborder la démarche scientifique, faite de confrontation des concepts théoriques à l'expérience, démarche qui revient en arrière, change de voie, et finalement aboutit. Et si un sceptique pourrait nous dire que notre dispositif est bien compliqué par rapport à la simple utilisation d'un microphone, nous répondrons qu'il est bien plus intrigant de faire porter le message sonore par l'onde lumineuse.*