

## 1. Rappels sur les phénomènes d'interférences

Il ne s'agit pas dans cette partie du livre de décrire en détail les phénomènes ondulatoires et les interférences, car ceci est fait dans de nombreux ouvrages universitaires<sup>2,3,4</sup>. Cependant, il n'est pas possible de vouloir faire une analogie complète entre interférences électroniques et interférences lumineuses si les notions les plus élémentaires et les plus couramment utilisées en optique ne sont pas brièvement rappelées.

### 1.1. Ondes – Caractéristiques et propagation

Jetons un caillou dans l'eau à l'instant  $t = 0$ . Lorsqu'il pénètre dans l'eau, il provoque l'apparition d'une onde qui se propage sous la forme d'une vague concentrique sur la surface de l'eau, à partir de l'endroit où le caillou est tombé (Figure I.1). Une onde est définie par la propagation d'une déformation ou d'une variation locale, qui se transmet de proche en proche sans transport de matière.



Fig. I.1 : Onde provoquée par la chute d'un caillou sur la surface de l'eau.

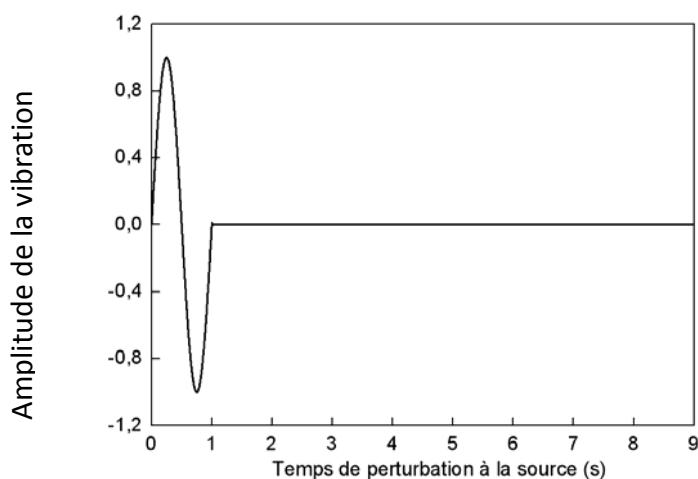


Fig. I.2 : Forme typique simplifiée de l'impulsion originelle.

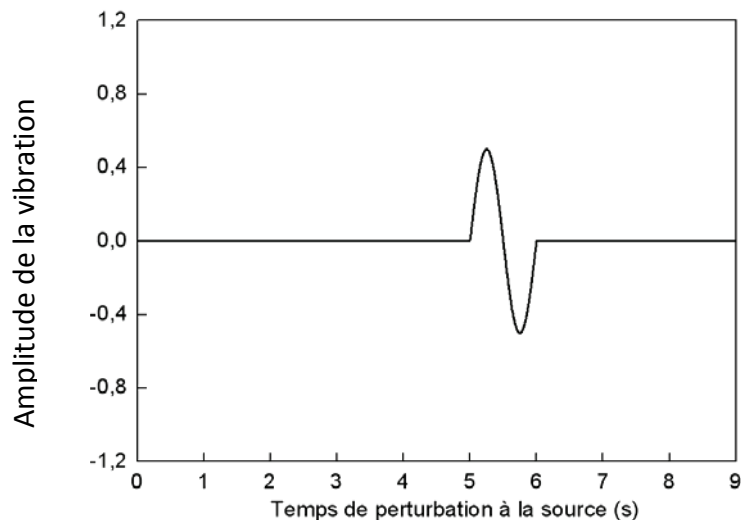
<sup>2</sup> J.-P. Perez, *Optique, fondements et applications*, Ed. Masson, 5<sup>ème</sup> édition (1996)

<sup>3</sup> M. Bertin, J.-P. Faroux, J. Renault, *Optique et physique ondulatoire*, Ed. Dunod Université, 3<sup>ème</sup> édition (1986)

<sup>4</sup> D. C. Giancoli, *Ondes, optique et physique moderne*, Ed. DeBoeck Université (1989)

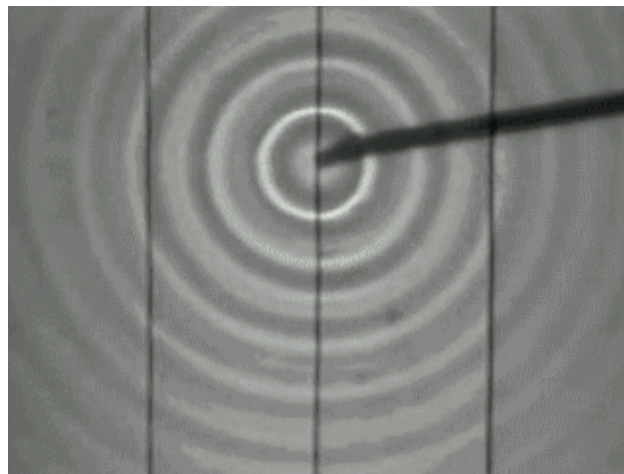
L'impulsion initiale donnée à l'eau est communiquée aux points voisins qui vont, à un instant donné, se soulever puis s'abaisser. Supposons pour simplifier que cette impulsion initiale dure 1s, et qu'elle a la forme présentée, entre  $t = 0$  et  $t = 1$  s sur la Figure I.2.

Au cours du temps, la vibration de départ se décale dans l'espace. En un point donné, la forme de la vibration sera identique à l'impulsion première, mais sera observée décalée dans le temps (Figure I.3.). Remarquons que l'amplitude de l'onde sera plus faible que l'amplitude à  $t = 0$  car la propagation s'effectue sur une surface et s'atténue.



**Fig. I.3 :** Amplitude de l'onde en un point  $M$  à une certaine distance de l'origine de l'impulsion.

Au lieu d'une impulsion unique, on crée maintenant en un point  $O$  sur l'eau une suite d'impulsions périodiques sinusoïdales, par exemple au moyen d'un vibreur mécanique (Figure I.4).

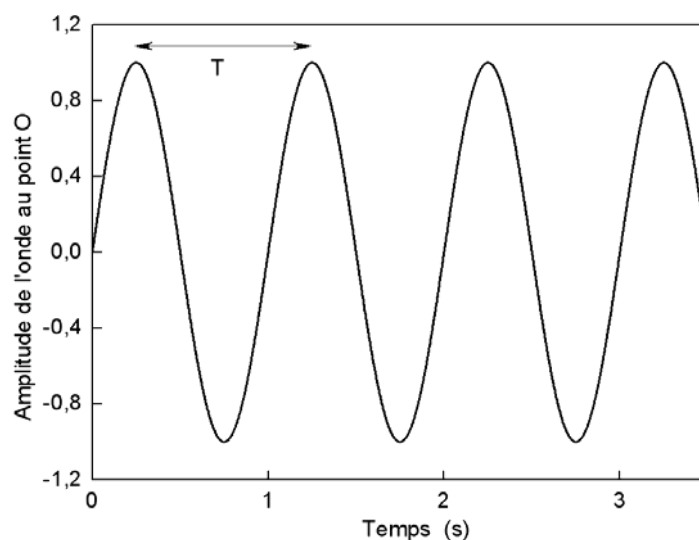


**Fig. I.4 :** Onde périodique sinusoïdale à la surface de l'eau provoquée par un vibreur.

Mathématiquement, l'amplitude de cette onde au point origine  $O$  peut s'écrire :

$$y(O) = a \cos \omega t \quad (I.1)$$

où  $a$  est l'amplitude de la vibration,  $\omega$  la pulsation. Le point  $O$  vibre dans le temps de la manière suivante (Figure I.5).



**Fig. I.5 :** Forme mathématique de l'amplitude de la vibration engendrée par la variation périodique du vibreur.

La quantité  $T$  indiquée sur la Figure I.5. est le temps entre deux maxima (ou deux minima) et est appelée période temporelle. Elle est reliée à la pulsation  $\omega$  par  $T = 2\pi / \omega$ . Un point  $M$  situé à une distance  $x$  de  $O$  oscillera de la même manière que le point  $O$ , mais en retard par rapport à  $O$ . L'expression de l'amplitude en  $M$  est :

$$y(M) = a' \cos \omega \left( t - \frac{x}{v} \right) \quad (1.2)$$

où  $v$  représente la vitesse de propagation de l'onde. S'il n'y a pas de dispersion d'énergie, l'amplitude  $a'$  de l'onde en  $M$  est égale à l'amplitude  $a$  de l'onde originelle à condition que la propagation se fasse sur une dimension. Le terme  $\omega x/v$  est appelé déphasage.

## 1.2. Interférences avec de la lumière

### 1.2.1. Analogie avec les interférences sur l'eau

La lumière peut être décrite comme une onde électromagnétique (cf. Chap I, § B.III.3), résultant de la vibration périodique dans le temps et dans l'espace d'un champ électrique et d'un champ magnétique. Soient  $S_1$  et  $S_2$  deux sources de lumière délivrant des ondes monochromatiques d'amplitude maximum  $A_0$ , de même fréquence  $\nu$  (la fréquence d'une onde est l'inverse de la période  $T$ , et est exprimée en Hertz). Les ondes issues de  $S_1$  et  $S_2$  se superposent et interfèrent. Contrairement aux ondes sur l'eau, l'amplitude résultante ne peut pas être observée, à cause des fréquences très élevées des ondes lumineuses. On montre que l'intensité de la lumière reçue sur l'écran en un point  $M$  quelconque est proportionnelle au carré de l'amplitude du champ électromagnétique, et est de la forme :

$$I = 2I_0 \cos^2 \frac{2\pi\delta}{\lambda} \quad (1.3)$$

Dans cette expression,  $\lambda$  est la longueur d'onde, ou période spatiale, et est reliée à  $T$  par  $\lambda = cT$ ,  $c$  étant la vitesse de la lumière dans le milieu où s'effectue l'expérience. La quantité  $\delta$  est égale à  $S_1M - S_2M$ , et est appelée différence de marche entre les chemins  $S_1M$  et  $S_2M$ .

### 1.2.2. Deux dispositifs expérimentaux classiques d'interférométrie

Dans ce paragraphe, nous allons simplement décrire deux dispositifs classiques en interférométrie, bien qu'il en existe beaucoup d'autres. Le dispositif des trous d'Young est le premier dispositif historiquement connu (cf. Chap. 1 §B.). De plus, comme nous le verrons au Chap. 2, les expériences d'interférences réalisées soit avec un faisceau d'électrons, soit avec des électrons envoyés un par un, se réfèrent à cette célèbre expérience, d'où la nécessité de décrire, même brièvement, ce dispositif.

Le dispositif interférométrique de Michelson est aussi présenté parce qu'il constitue une méthode différente de celle des trous d'Young pour induire des interférences, et parce qu'il a été, et est encore, très utilisé à la fois en physique fondamentale et en physique appliquée.

#### a) Expérience des trous d'Young

Une source  $S$  produit des ondes lumineuses monochromatiques de longueur d'onde  $\lambda$ . Ces ondes éclairent un écran opaque percé de deux trous distants de  $a$ . Chacun de ces trous devient lui-même une source secondaire à partir de laquelle une onde est produite (Figure 1.6). L'onde résultant de la superposition des deux ondes issues de  $S_1$  et  $S_2$  éclaire un écran d'observation situé à une distance  $D$  de l'écran percé. Sur l'écran apparaissent alternativement des franges brillantes et sombres, signant le phénomène d'interférences. Les franges sombres sont le résultat d'une interférence destructive car l'amplitude résultante est la superposition de deux ondes dont les amplitudes sont opposées (déphasées de  $\pi$ ), alors que les franges brillantes résultent de deux ondes dont les amplitudes sont à chaque instant égales et en phase.

L'amplitude totale résultante en  $M$  est

$$\begin{aligned} y &= a \cos \omega \left( t - \frac{S_1M}{c} \right) + a \cos \omega \left( t - \frac{S_2M}{c} \right) \\ &= 2a \cos \omega \left( 2t - \frac{S_1M+S_2M}{c} \right) \cos \omega \left( \frac{S_1M-S_2M}{c} \right) \end{aligned}$$

L'intensité totale est proportionnelle au carré de l'amplitude résultante, et s'écrit donc

$$I = 4a^2 \cos^2 \omega \left( 2t - \frac{S_1M+S_2M}{c} \right) \cos^2 \omega \left( \frac{S_1M-S_2M}{c} \right)$$

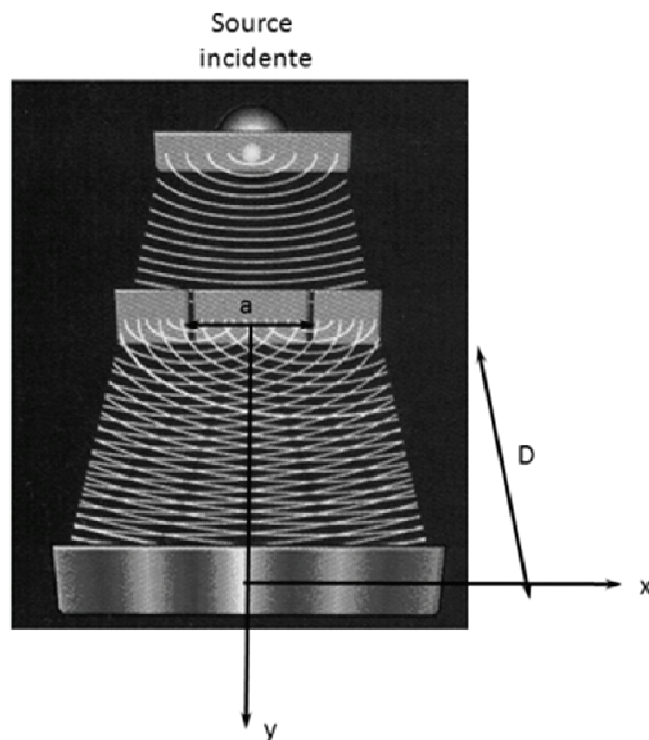
Le terme  $\omega \left( \frac{S_1M-S_2M}{c} \right)$  est appelé déphasage entre les ondes et est noté  $\varphi(M)$ .

La fréquence de l'onde optique étant très grande ( $\sim 10^{14}$  Hz), le terme  $\cos^2 \omega \left( 2t - \frac{S_1 M + S_2 M}{c} \right)$  doit être moyenné dans le temps, donnant ainsi 1/2.

Lorsque  $D$  est très grand devant  $a$ ,  $x$  et  $y$ , l'intensité totale en un point  $M(x, y, D)$  quelconque de l'écran est

$$I = 2I_0 \left( 1 + \cos \frac{2\pi x a}{\lambda d} \right) \quad (1.4)$$

L'interfrange, défini comme la distance entre deux maxima ou deux minima vaut  $i = \lambda D / a$ . Pour une longueur d'onde typique de  $0,5 \mu\text{m}$ ,  $D = 1 \text{ m}$  et  $a = 0,1 \text{ mm}$ , on trouve un interfrange de  $5 \text{ mm}$ , ce qui est amplement suffisant pour une observation visuelle.



**Fig. 1.6 :** Figure d'interférences obtenue après diffraction de la lumière sur deux fentes.

#### b) Interféromètre de Michelson

L'interféromètre de Michelson (Figure 1.7) est constitué d'une source lumineuse, d'une lame semi-réfléchissante, de deux miroirs totalement réfléchissants, et d'un écran. Une partie de la lumière issue de la source traverse la lame semi-réfléchissante pour aller, par l'intermédiaire du bras 1, vers le miroir 1. L'autre partie de la lumière est réfléchie sur la lame et se dirige, par l'intermédiaire du bras 2, vers le miroir 2.

Les deux miroirs réfléchissent la lumière qui se dirige, encore une fois grâce à la lame semi-réfléchissante, vers l'écran. Le miroir 2 est immobile, alors que le miroir 1 peut être

translaté, parallèlement à son axe (bras 1). Lorsque le miroir 1 se déplace, un éclaircissement alternativement sombre puis brillant apparaît sur l'écran.

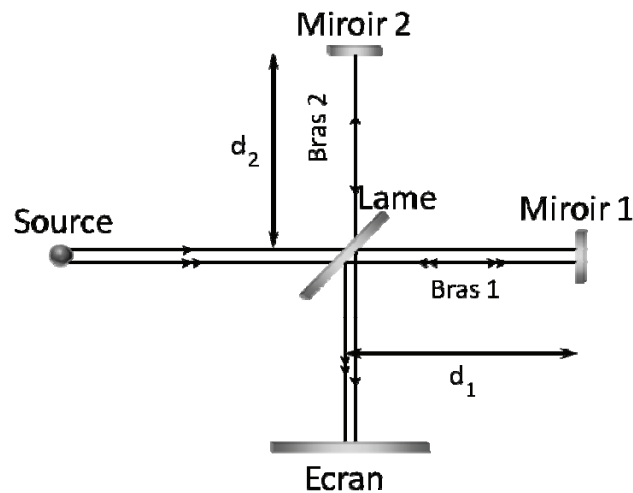


Fig. 1.7 : Principe de base de l'interféromètre de Michelson.

Supposons que l'interféromètre soit éclairé par une onde incidente plane monochromatique. Un calcul similaire à celui fait pour les trous d'Young conduit à l'expression de l'intensité totale  $I$  au centre de l'écran.

$$I = 2I_o \left( 1 + \cos \frac{4\pi}{\lambda} (d_1 - d_2) \right) \quad (1.5)$$

On montre ainsi qu'en déplaçant le miroir 1, l'intensité sur l'écran varie et qu'un déplacement de  $\lambda/4$  permet de passer par exemple d'une frange sombre à une frange brillante. On voit donc que cet appareil est un outil de précision pour mesurer des distances. En effet, avec une lumière rouge par exemple,  $\lambda$  est de l'ordre de 600nm, on peut donc mesurer une distance à 150 nm près. A l'inverse, connaissant précisément le déplacement du miroir, on peut remonter à la longueur d'onde de la source.

### 1.3. Applications liées aux interférences

Même si le paragraphe qui suit n'a pas d'incidence sur la suite du livre, et spécialement sur l'analogie entre les interférences avec de la lumière et avec des électrons, il est cependant important dans la mesure où il montre la diversité des expériences possibles en interférométrie. L'objectif n'étant pas d'être exhaustif, seuls quelques exemples ont été sélectionnés.

#### 1.3.1. Expérience de Michelson et Morley

L'expérience de Michelson et Morley<sup>5</sup> est l'exemple type d'utilisation des interférences pour comprendre certaines lois de la physique, pour infirmer ou confirmer des hypothèses. Michelson et Morley ont tenté, en 1887, une expérience dans le but de

<sup>5</sup> A. A. Michelson and E. W. Morley, *Philos. Mag. S.5*, **24** 449 (1887)

mesurer le déplacement de la Terre dans l'éther, l'éther étant supposé, à cette époque, être un support invisible et impalpable, mais nécessaire à la propagation des ondes électromagnétiques.

Un calcul élémentaire montre que, suivant la position de l'interféromètre, les deux ondes issues de la lame semi-transparente devraient subir après un aller-retour un déphasage différent à cause de la vitesse du vent d'éther, induisant ainsi des différences dans la figure d'interférences. Cette expérience cruciale fut considérée comme un échec puisque aucune différence dans les figures ne fut observée lorsque l'orientation de l'interféromètre fut modifiée.

Ce résultat inattendu amena les physiciens à, d'une part, renouveler l'expérience pour être sûr du résultat et, d'autre part, trouver une explication convaincante. Au final, deux conclusions fondamentales, extraordinaires pour l'époque, s'imposèrent : une onde électromagnétique n'a pas besoin, contrairement à d'autres ondes, de support matériel pour se propager. La notion d'éther peut donc être définitivement rejetée. D'autre part, la vitesse d'une onde électromagnétique mesurée par un observateur ne dépend pas du mouvement de cet observateur.

### 1.3.2. A la recherche d'ondes gravitationnelles

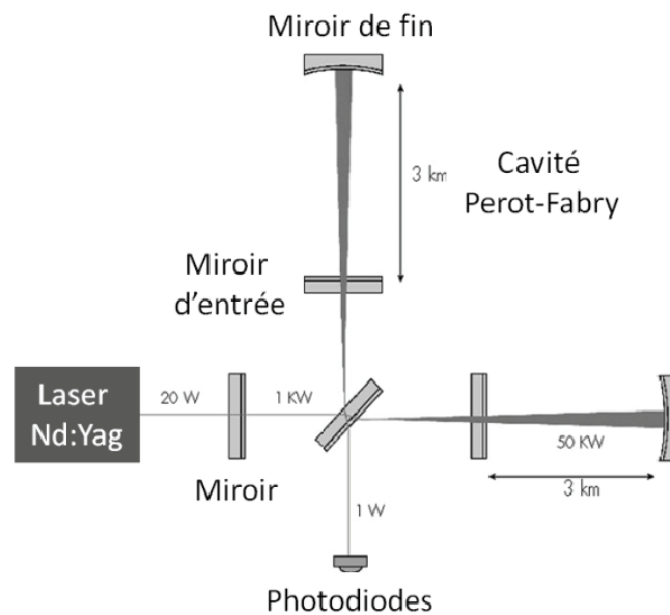
L'interférométrie de type Michelson est utilisée pour la mise en évidence de l'existence des ondes gravitationnelles (projet franco-italien Virgo). De la même manière qu'une particule chargée qui accélère émet une onde électromagnétique (champs électrique et magnétique couplés), une masse pourrait, si on l'accélérait, émettre des ondes appelées ondes gravitationnelles. Si une telle onde existe, elle perturbe malheureusement très peu l'environnement qu'elle traverse. Par exemple, si une grosse étoile explosait, les ondes gravitationnelles émises perturberaient l'environnement de seulement un millième de millimètre sur une distance de 150 millions de km.

Si une onde gravitationnelle passe au voisinage d'objets possédant une masse, elle va déformer l'environnement de la masse, l'obligeant ainsi à se déplacer. Si l'on prend deux masses au lieu d'une, la distance entre les deux masses variera, augmentant et diminuant alternativement, puisque l'amplitude de l'onde gravitationnelle varie elle-même alternativement dans le temps, comme n'importe quelle autre onde.

Concrètement, des masses-miroirs sont maintenues en suspension dans deux cavités, insérées dans les bras d'un interféromètre (Figure I.8). Un laser éclaire un miroir séparateur qui divise le faisceau incident vers les deux bras de l'interféromètre. Ces deux bras ont une longueur d'environ 3 km (Figure I.8). Les deux faisceaux lumineux provenant des deux bras sont recombinaés sur un détecteur (photodiode). Les longueurs respectives des bras sont choisies de telle façon que les deux ondes qui se recombinaent sur le détecteur soient en opposition de phase.

Ainsi, une intensité nulle est mesurée sur le détecteur. La très petite variation de phase causée par la variation de distance entre les miroirs se traduit par une très légère variation du flux lumineux, proportionnelle à l'amplitude de l'onde gravitationnelle. Les deux cavités insérées (appelées Fabry-Perot sur la Figure I.8) ont pour rôle d'augmenter considérablement la distance de parcours de la lumière grâce à des allers et retours multiples entre les miroirs d'entrée et de fond de chaque cavité (environ 120 km pour une distance réelle de 3 km entre les miroirs d'entrée et de fin). On augmente ainsi la

sensibilité de l'appareil. L'expérience constitue un véritable défi technologique, dans la mesure où les déplacements attendus sont de l'ordre de  $10^{-18}$  m.



**Fig. 1.8 :** Principe de la détection d'ondes gravitationnelles, basé sur l'interférométrie de Michelson. (<http://www.ego-qw.it/>).

### 1.3.3. Mesures d'indices de réfraction

L'interféromètre de Michelson est un outil permettant également la mesure d'indices de réfraction. L'indice de réfraction d'un milieu transparent est  $n = c/v$ , où  $v$  est la vitesse de la lumière dans le milieu, et  $c$  est la vitesse de la lumière dans le vide. Sur un des bras de l'interféromètre est disposée une cellule dans laquelle un gaz peut être introduit. En présence du gaz, le chemin optique parcouru par la lumière est modifié, ce qui entraîne un changement de la figure d'interférences. Concrètement, le gaz est inséré petit à petit au cours du temps. L'indice de réfraction du gaz étant proportionnel au nombre de particules de gaz entrant dans la cellule, la variation du nombre de particules dans la cellule est proportionnelle au nombre de maxima qui défilent sur l'écran. Un indice de réfraction peut être mesuré ainsi avec une incertitude absolue d'environ  $10^{-6}$ , c'est-à-dire environ au millionième près.

### 1.3.4. Mesures de déplacements

L'interféromètre de Michelson est aussi utilisé dans les ateliers de métrologie mécanique pour mesurer, par comptage des franges d'interférences, le déplacement d'une machine ou d'une pièce à usiner. La source de lumière est un Laser. L'incertitude sur le déplacement est de l'ordre du micromètre par mètre. Elle peut être diminuée si les conditions d'environnement (température, indice de réfraction de l'air) sont bien connues, afin d'avoir une mesure précise de la longueur d'onde de la source.