

## **Interférences ultrasonores : apports d'une acquisition informatisée**

par Alain BALLORY  
Cité scolaire Roland Garros - Le Tampon - Réunion  
André DEIBER  
Lycée Fustel de Coulanges - 67000 Strasbourg  
et Olivier KEMPF  
UFM d'Alsace - Site de Strasbourg  
GRESEP Groupe de Recherche de l'IUFM d'Alsace  
et de l'Université Louis Pasteur

---

### **RÉSUMÉ**

*Un récepteur ultrasonore qui se déplace dans la zone d'interférences de deux sources synchrones explore l'équivalent acoustique de l'expérience optique des trous de Young. L'exploration d'une large partie du domaine d'interférences permet la construction de cartes d'intensité ultrasonore traitées en fausses couleurs à l'aide d'un tableur usuel. L'étude de ces interférences via une acquisition informatisée permet une analyse comparée de l'importance relative du facteur de phase et de la dépendance spatiale de l'amplitude émise par chaque source. De surcroît le calcul aisé des intensités acoustiques permet une vérification de la conservation de l'énergie dans un phénomène d'interférences, expérience plus difficile à réaliser en optique avec des moyens sommaires.*

### **1. EXPÉRIENCES ULTRASONORES : INTÉRÊT D'UNE ACQUISITION INFORMATISÉE**

Un système d'interfaçage est sensible à une tension continue ou du moins lentement variable dans le temps. Vu la fréquence élevée - 40 kHz - d'un signal ultrasonore, il est donc vain de relier directement le capteur ultrasonore à l'interface. Il faut au préalable extraire de la tension alternative aux bornes du capteur (image de l'amplitude instantanée de l'onde) l'amplitude au sens de la valeur maximale via un «capteur électronique d'amplitude».

Dans une expérience portant sur les interférences à deux sources ultrasonores synchrones, il est aisé de déterminer en déplaçant manuellement le capteur les positions d'interférences constructives ou destructives. L'acquisition informatisée de l'amplitude de l'onde ultrasonore en fonction de la position du capteur permet, quant à elle,

d'accéder à la relation explicite amplitude / position dans le champ d'interférences ce qui est loin d'être dénué d'intérêt même s'il ne faut pas s'attendre à une amélioration sensible de la mesure de l'interfrange par ce biais. En explorant le domaine d'interférence, il est donc possible de construire des cartes traitées en fausses couleurs qui donnent une vue d'ensemble du phénomène.

Le second intérêt de cette approche réside dans la possibilité d'enregistrer successivement le signal en provenance de chaque source seule, puis le résultat de la superposition des deux ondes en phase ou en opposition de phase. Vu le recouvrement partiel des cônes de diffraction, on peut ainsi montrer que les franges n'apparaissent que dans la zone de recouvrement. En optique, il est délicat voire quasi impossible dans une expérience de photométrie de fermer sélectivement l'une ou l'autre fente de Young avec le matériel disponible dans un lycée. La comparaison quantitative des différentes courbes ouvre la perspective de procéder à la vérification expérimentale de la conservation de l'énergie dans le phénomène d'interférences ultrasonores.

## 2. PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

### 2.1. Le capteur d'amplitude

Un capteur d'amplitude pour récepteur d'ondes ultrasonores à destination d'un système d'interfaçage produit une tension  $A$  image de l'amplitude du signal ultrasonore. Celle-ci doit être transformée en tension continue proportionnelle à cette amplitude afin de pouvoir être enregistrée par un système d'interface.

Ce dispositif décrit ci-dessous permet d'amplifier de manière satisfaisante la tension délivrée par le récepteur ultrasonore tout en supprimant efficacement les signaux de fréquence 50 Hz en provenance du secteur. Pour une amplitude ultrasonore constante, la tension de sortie est continue, l'ondulation résiduelle étant inférieure à un pas de conversion analogique-numérique pour un convertisseur 8 bits.

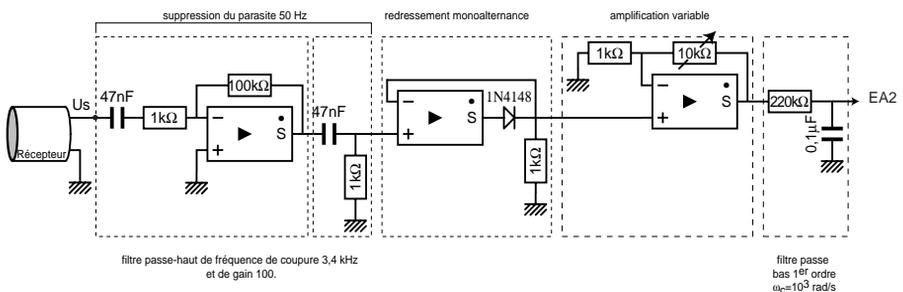


Figure 1 : Schéma du capteur.

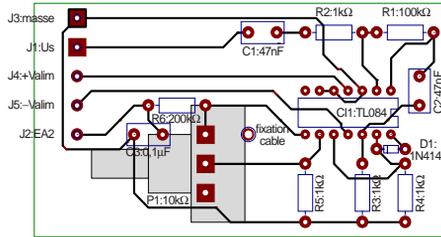


Figure 2 : Implantation des composants.

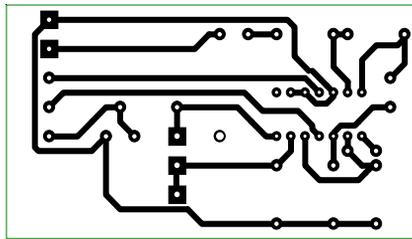


Figure 3 : Typon.

### 2.2. Position du capteur obtenue par déplacement contrôlé

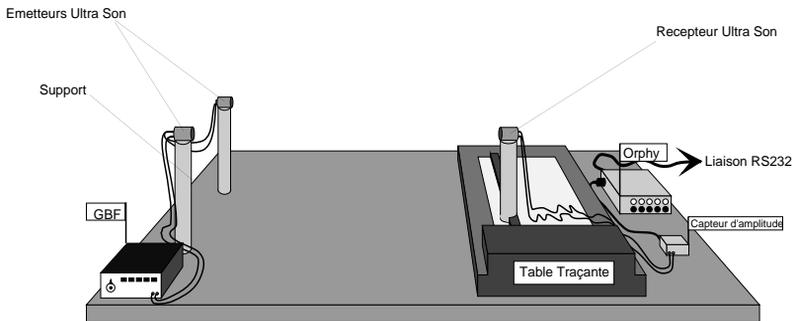


Figure 4

Le capteur se déplace suivant un mouvement rectiligne et uniforme sur un segment de droite parallèle à la droite Ox reliant les deux émetteurs.

Ce mouvement rectiligne uniforme du récepteur peut être obtenu à l'aide d'une table traçante ou de tout autre dispositif approprié (mobile en mouvement uniforme, train électrique, jouet...).

La tension de sortie du capteur d'amplitude est envoyée sur un système d'interfaçage avec une durée d'acquisition de quelques dizaines de secondes (à adapter suivant la vitesse de déplacement du capteur) de telle sorte que l'on obtienne 192 mesures par balayage du segment. Les données expérimentales sont stockées dans un tableau *via* un tableur.

A partir de la tension  $A(t)$  on peut passer à la tension  $A(x)$  en connaissant la vitesse  $v$  du récepteur supposée uniforme, obtenue aisément par chronométrage.

Il vient :

$$A(t - t_0) = A\left(\frac{x - x_0}{v}\right)$$

en calculant directement la position à l'aide du tableur par la relation :

$$x - x_0 = v(t - t_0)$$

Remarque : Afin d'éviter les réflexions parasites, il est nécessaire de surélever les transducteurs et recouvrir le plan d'un matériau isolant phonique (mousse, laine de verre).

### 2.3. Calcul de l'intensité acoustique *via* le tableur : analogie avec l'optique

Une différence essentielle entre les domaines acoustique et optique porte sur la nature du signal mesuré. En acoustique, on a accès à l'image de l'amplitude instantanée de l'onde, tandis qu'en optique le capteur ne délivre qu'une valeur quadratique moyenne de l'intensité lumineuse ou éclairement sur une durée grande devant la période.

Pour une onde sonore plane progressive, l'intensité acoustique est proportionnelle au carré de l'amplitude de l'onde.

Dans l'expérience réalisée, on ne se trouve pas a priori dans ce cas de figure. Mais comme la distance récepteur-émetteur est grande devant la longueur d'onde, on peut négliger les composantes non propagatrices de l'onde ultrasonore. Dans la zone de champ lointain ( $r \gg \lambda$ ), la pression et la vitesse du fluide sont en phase comme dans l'onde sonore plane progressive. Par conséquent, il suffit d'élever au carré *via* le tableur les tensions  $A_i$  pour obtenir les images des intensités acoustiques. Il faut donc prendre garde par la suite au type de courbe étudiée (amplitude ou intensité) pour les ondes ultrasonores.

#### 2.4. Principe de la réalisation des cartes en fausses couleurs

Afin d'exploiter au maximum les possibilités de cette expérience, nous avons procédé à deux séries de 16 coupes parallèles comportant chacune 192 points de mesures pour un émetteur seul puis pour les deux émetteurs en phase. Chaque série aboutit à un tableau de  $16 \times 192 = 3072$  cellules du tableau.

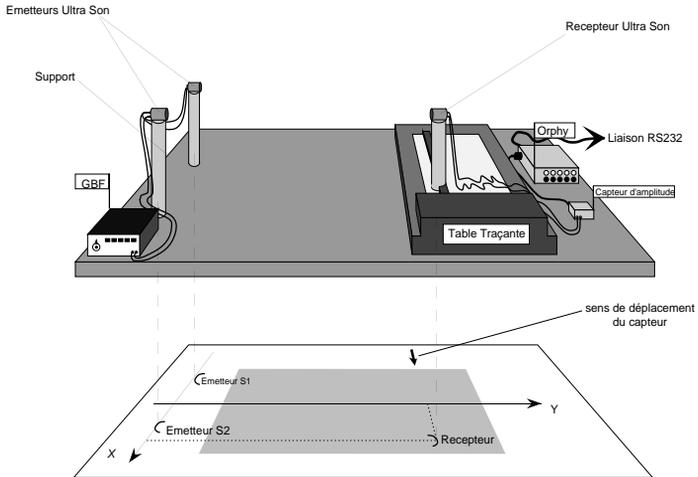


Figure 5

Le rectangle exploré s'étend de  $y = 10$  cm à  $y = 62$  cm pour  $x$  allant de  $-15$  cm à  $+15$  cm. Le contenu d'une cellule du tableau est l'amplitude ultrasonore mesurée au centre d'un pixel d'extension  $(\Delta x = 6 \text{ mm}) \times (\Delta y = 20 \text{ mm})$ .

Le tableau Excel présente des fonctionnalités intéressantes et très aisées à exploiter dans le domaine de la représentation tridimensionnelle traitée en fausses couleurs. Ce logiciel trace une surface dont les coordonnées de la projection d'un point sur le plan de base correspondent à une case du tableau et l'altitude de ce point au contenu de cette cellule. Malgré la forme allongée d'un pixel, le logiciel recherche les lignes de niveau (donc à la fois les lignes d'isoamplitude et d'isointensité) et traite la surface comprise entre deux lignes consécutives d'une seule couleur. Comme il est possible de changer de point de vue sur cette surface, on découvre une carte de l'amplitude en fausses couleurs en se plaçant en vue de dessus.

### 3. ÉTUDE D'UN SEUL ÉMETTEUR

#### 3.1. Amplitude émise par une source ultrasonore

Pour un seul émetteur en service on aboutit aux représentations ci-dessous (cf. figure 6).

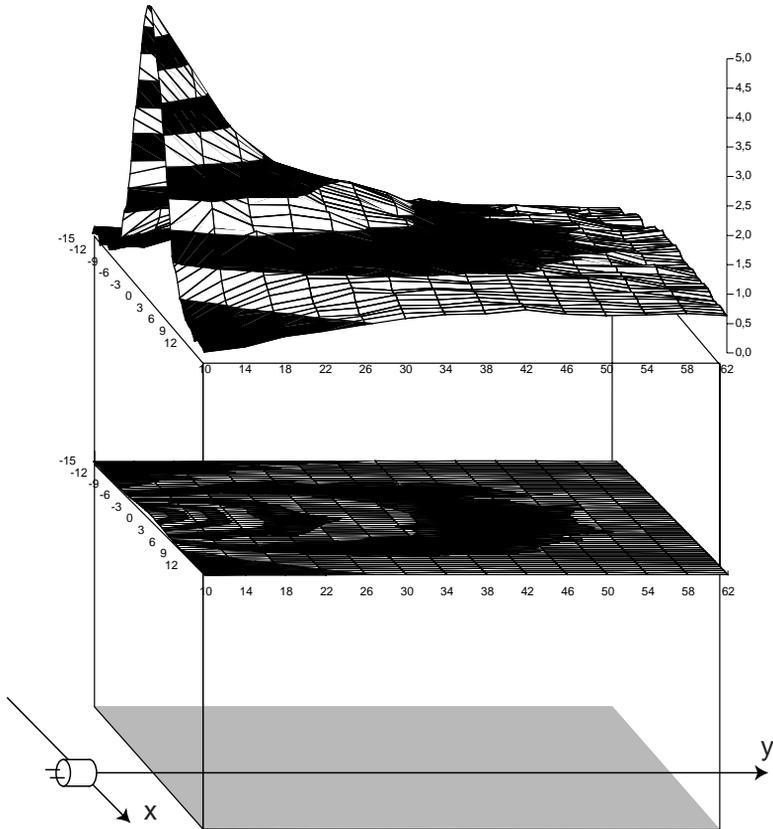
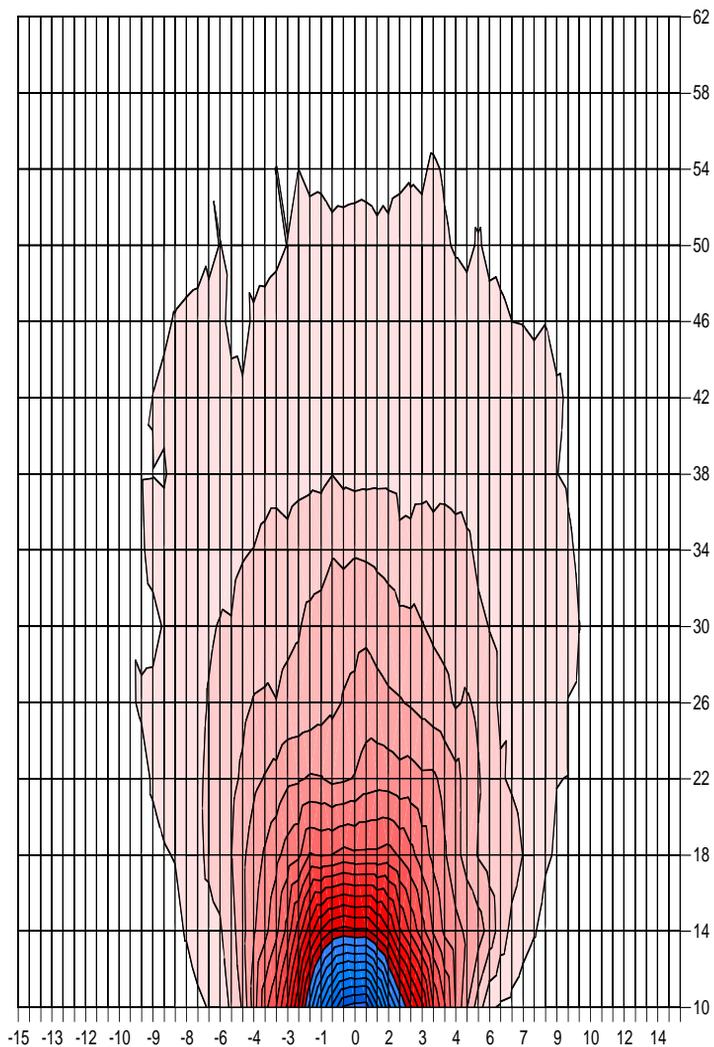


Figure 6

L'allure des lignes d'isoamplitude montre l'existence d'une direction d'émission privilégiée qui n'est autre que l'axe de révolution de la pastille émettrice. Notons qu'en toute rigueur il aurait fallu corriger les mesures en tenant compte de la rotation du récepteur par rapport à l'axe de l'émetteur durant son déplacement, mais la correction s'avère en pratique minime.

En élevant au carré le contenu de chaque cellule du tableau, on obtient l'image de l'intensité acoustique.



**Figure 7 :** Carte en intensité.

Par la suite, afin de ne pas introduire de confusion vu l'analogie entre l'optique et l'acoustique, nous ne comparerons plus que les intensités.

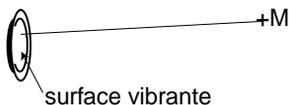
### 3.2. Analogie optique / acoustique : influence de la taille de la source

La décroissance de l'amplitude en  $1/r$  combinée avec un fort étalement angulaire explique l'allure de cette carte. En effet, une fente de largeur  $e$  éclairée de manière uniforme par une lumière monochromatique produit une figure de diffraction, que l'on peut caractériser par un étalement angulaire  $\alpha$  qui vaut sensiblement  $\alpha = 2 \frac{\lambda}{e}$ .

De même, un émetteur ultrasonore est constitué par une pastille ronde piézo-électrique de surface  $S$ , siège d'une onde stationnaire mécanique entretenue par le générateur électrique associé à l'émetteur *via* l'effet piézo-électrique.



**Figure 8** : Photographie d'un émetteur ultrasonore.



**Figure 9** : Schéma de la zone de vibration.

Chaque élément de surface de cette pastille constitue une source ultrasonore dont l'amplitude (voire la phase) varie avec le point de la pastille émettrice. Un récepteur supposé ponctuel placé en un point  $M$  est sensible à l'onde résultante obtenue par superposition des amplitudes provenant des divers points de la source étendue, par application du principe de Huygens-Fresnel aux ondes sonores. L'émetteur ultrasonore peut donc être comparé à une fente source en optique non uniformément éclairée. Or on sait que l'introduction d'un facteur de transmittance optique en amplitude et en phase modi-

fié la figure de diffraction de la fente source (on parle dans certain cas d'apodisation), mais que néanmoins l'étalement angulaire reste de l'ordre du rapport longueur d'onde/diamètre de la source.

Comparons les ordres de grandeurs de ce rapport  $\alpha$  :

	Diamètre de la source	Longueur d'onde	Étalement angulaire $\alpha$ en °
Optique	50 $\mu\text{m}$	0,6 $\mu\text{m}$	0,7
Ultrasonore	9 mm	8,5 mm	43

Tableau 1

A *contrario* de l'optique, pour une onde ultrasonore on obtient une amplitude importante même si le récepteur est nettement en dehors de l'axe de révolution de l'émetteur comme l'illustre bien la carte en fausses couleurs vue plus haut.

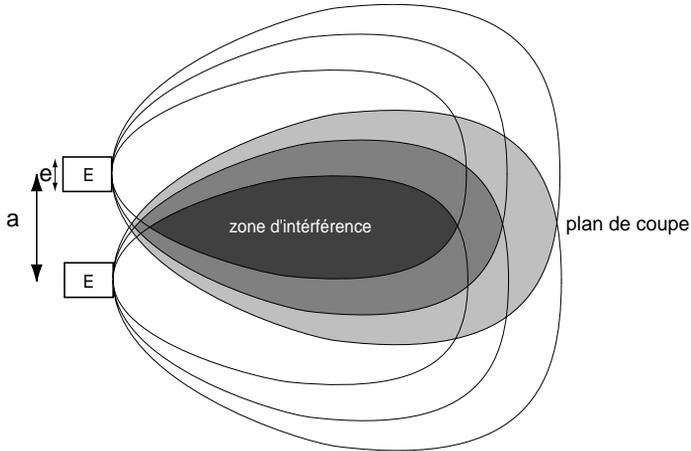
#### 4. INTERFÉRENCE À DEUX SOURCES : VUE D'ENSEMBLE

##### 4.1. Espacement des sources et recouvrement des figures de diffraction

En onde monochromatique l'espacement  $a$  des sources intervient dans l'interfrange et dans le nombre de franges visibles. Comparons la largeur de la tache de diffraction obtenue dans un plan placé à la distance  $D$  des sources et l'espacement  $a$  entre les sources.

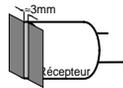
En optique une valeur typique de  $a$  est 0,1 mm ; ce qui est très petit devant  $\frac{\lambda}{e} \times D \approx 1,2$  cm (pour  $D = 1$  m). Les figures de diffraction des deux fentes se recouvrent quasi complètement et le phénomène d'interférence optique s'inscrit pratiquement dans la tache de diffraction d'une quelconque des deux sources.

En acoustique vu la large distribution angulaire on ne peut négliger l'intervention du facteur en  $1/r$  de l'amplitude rayonnée. Même si la largeur de la tache de diffraction est sensiblement inférieure à  $\frac{\lambda}{e} \times D \approx 1$  m, le recouvrement des cônes de diffraction n'est que partiel car  $a$  reste de l'ordre de  $\frac{\lambda D}{e}$ .



**Figure 10** : Zone d'interfaçage

En acoustique, comme en optique [1], la taille du récepteur doit être prise en compte. Il est souhaitable de placer un diaphragme en forme de fente de 3 mm de large devant le récepteur afin d'améliorer le contraste des franges ultrasonores. En effet dans les deux cas le récepteur indique une valeur moyenne de la grandeur mesurée prise sur la surface sensible ; si la taille du récepteur est de l'ordre de l'interfrange la visibilité des franges en sera sérieusement affectée.



**Figure 11** : Adaptation de la cellule ultrasonore.

#### 4.2. Précaution expérimentale

Pour une exploitation quantitative des résultats, il faut veiller à maintenir constante la valeur efficace de la tension aux bornes des deux émetteurs d'une série de mesures à l'autre. En effet pour certains générateurs dédiés à l'émission ultrasonore, la tension délivrée chute lors du branchement d'un second émetteur. Dans ce cas, il faut augmenter la tension de sortie du générateur de fréquence 40 kHz pour retrouver le niveau de départ.

#### 4.3. Cartes en fausses couleurs de l'interférence ultrasonore à deux sources, y-a-t-il addition des intensités ?

La carte en intensité obtenue pour deux émetteurs est très différente de celle correspondant à une source.

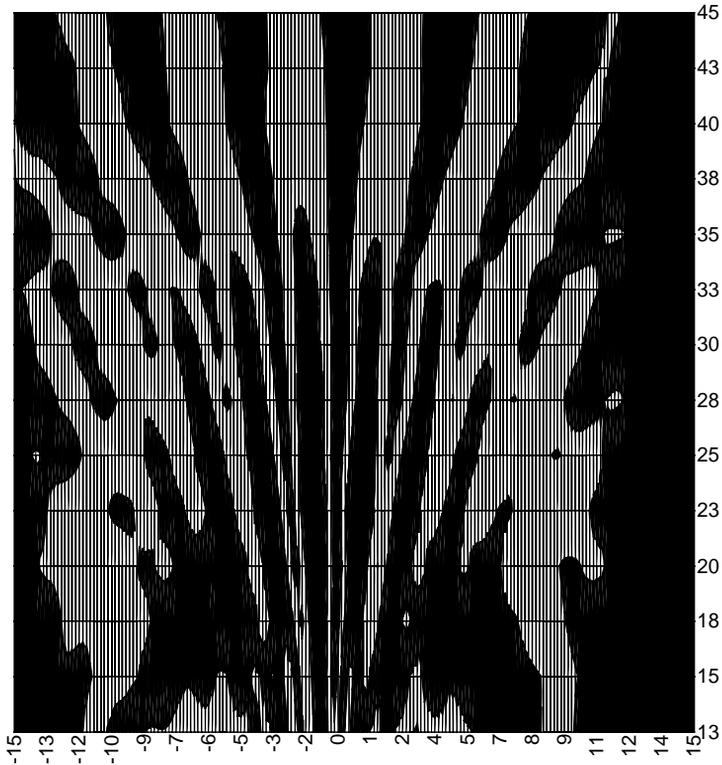


Figure 12

On voit nettement apparaître les lignes d'interférence constructive et d'interférence destructive (les classiques lignes hyperboliques  $(d_1 - d_2 = cte)$ ). Au voisinage des sources la carte présente une allure très tourmentée car le déphasage entre les deux ondes varie très rapidement.

Cette carte comparée au cas d'un seul émetteur montre de manière très visuelle que la superposition de deux ondes cohérentes diffère notablement d'une simple somme des intensités.

## 5. QUELLES EST LA RELATION ENTRE L'INTENSITÉ RÉSUULTANTE ET LES INTENSITÉS ÉMISES PAR CHACUNE DES SOURCES ?

### 5.1. Analyse dans un plan de coupe

On désire étudier le phénomène d'interférences sur un segment placé dans le plan contenant les axes de révolution des deux sources et parallèlement à la droite les reliant. Le domaine étudié n'est pas placé de manière symétrique par rapport à la médiatrice  $S_1S_2$  mais englobe la majeure partie du domaine de recouvrement.

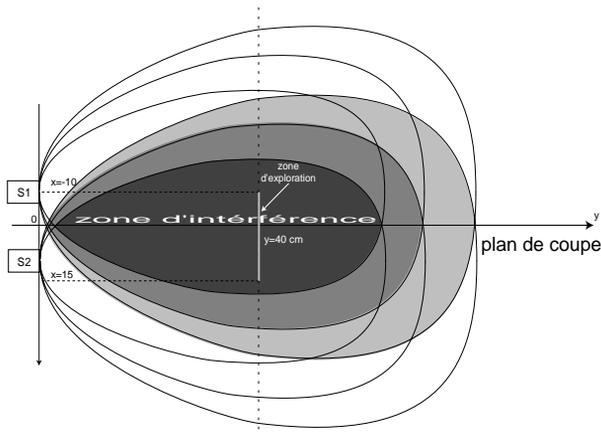


Figure 13 : Zone d'exploration

On peut étudier successivement la tension de sortie du capteur d'amplitude en fonction de la position, dans les quatre cas suivants :

- un seul émetteur est alimenté  $A_1(x)$ ,
- l'autre émetteur est alimenté  $A_2(x)$ ,
- les deux émetteurs sont alimentés en phase  $A_{pha}(x)$ ,
- les deux émetteurs sont alimentés en opposition de phase  $A_{opp}(x)$  (étude complémentaire pour laquelle il suffit de permuter les deux bornes d'un seul émetteur).

On obtient ainsi un tableau de 4 colonnes et 192 lignes exploitable avec Excel par exemple. La superposition des courbes en intensité acoustique (obtenues en élevant au carré) obtenue dans les quatre cas décrits donne le résultat suivant (cf. figure 14).

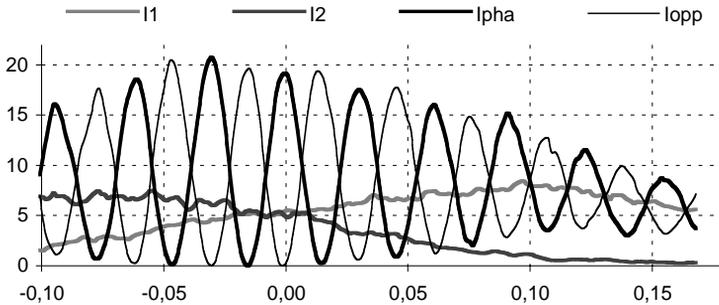


Figure 14

On peut d'emblée faire plusieurs remarques :

- Les courbes  $I_1(x)$  et  $I_2(x)$  correspondent à «la tache de diffraction des sources  $S_1$  et  $S_2$ ».
- Le phénomène d'interférences apparaît nettement dans la zone de recouvrement des cônes d'émission des deux émetteurs.
- Dans cette zone l'intensité détectée peut varier de manière brutale en aboutissant à des points quasi anguleux du moins en apparence.
- Un maximum pour une émission en phase correspond à un minimum pour une émission en opposition de phase et vice versa.

## 5.2. Exploitation des courbes

### 5.2.1. Enveloppe du signal obtenu par interférence

La figure 14 montre que l'intensité de l'onde résultante peut être très faible ou au contraire très élevée, lorsque les intensités des sources sont sensiblement égales.

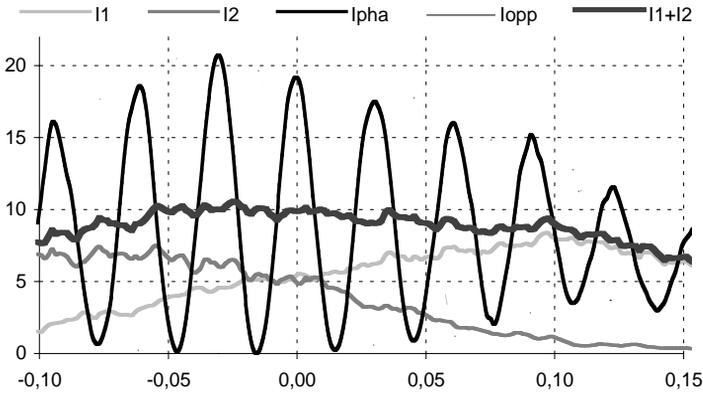


Figure 15

Pour certaines positions du capteur, l'intensité résultante  $I_{res}$  dépasse nettement la somme des deux intensités  $I_1$  et  $I_2$ . Un fil conducteur possible pour l'exploitation de ces courbes consiste à admettre que l'amplitude résultante est la somme des deux amplitudes en provenance de chaque source. Il doit donc y avoir une relation entre les valeurs maximales de ces amplitudes soit  $\sqrt{I_{res}}$ ,  $\sqrt{I_1}$  et  $\sqrt{I_2}$ . Dans ce contexte, créons deux variables  $I_{max} = (\sqrt{I_2} + \sqrt{I_1})^2$  et  $I_{min} = (\sqrt{I_2} - \sqrt{I_1})^2$ .

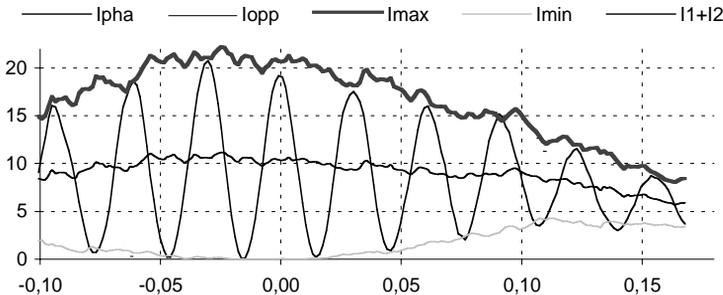


Figure 16

Ces courbes mettent en évidence un encadrement de l'intensité résultante. L'amplitude maximale résultant de la superposition de deux ondes ne saurait être supérieure à la somme des deux amplitudes maximales ni inférieure à la valeur absolue de leur différence.

$$|A_1 \max - A_2 \max| \leq A_{res} \max \leq |A_1 \max + A_2 \max| \Rightarrow (\sqrt{I_1} - \sqrt{I_2})^2 \leq I_{res} \leq (\sqrt{I_1} + \sqrt{I_2})^2$$

**5.2.2. Le facteur de phase détermine la position des franges**

Le déphasage entre les ondes issues des deux sources et interférant en M varie rapidement avec la position x du capteur. On peut donc se demander dans quelle mesure c'est bien cette variation rapide de déphasage qui détermine la position des franges (c'est-à-dire des *extrema* des courbes  $I_{pha}(x)$  et  $I_{opp}(x)$ ). Dans l'hypothèse simplificatrice d'égalité des deux amplitudes (de manière plus précise, la variation suffisamment lente des «deux amplitudes» devant celle du déphasage) interférant en M en provenance des deux sources, on obtient classiquement :

$$A_{\text{phase(théo)}} = A_0 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}(d_2 - d_1)\right) \Rightarrow I_{\text{res(théo)}} = I_0 \cos^2\left(\frac{2\pi}{\lambda}(d_2 - d_1)\right)$$

On peut représenter cette fonction théorique dans la mesure où tous les paramètres de position sont connus ou calculables (il suffit de prendre  $A_0 = 1$  car on ne s'intéresse qu'aux abscisses) et la comparer à la courbe expérimentale ( $A_{\text{pha}}$  et  $A_{\text{opp}}$ ). Dans notre protocole expérimental, la distance entre les deux sources valait  $a = 10$  cm.

Pour cela, on crée à l'aide du tableur les variables :

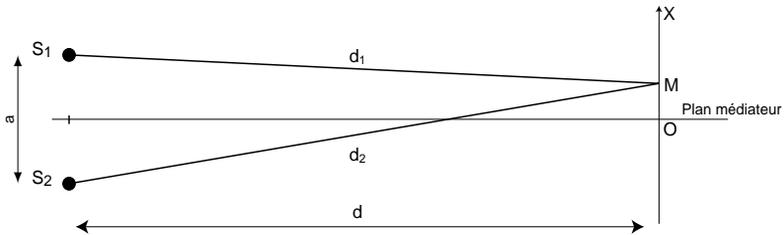
$$d_1 = \sqrt{d^2 + \left(x - \frac{a}{2}\right)^2} \quad \text{et} \quad d_2 = \sqrt{d^2 + \left(x + \frac{a}{2}\right)^2}$$

avant de calculer :

$$A_{\text{phase(théo)}} = A_0 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}(d_2 - d_1)\right)$$

puis :

$$I_{\text{phase(théo)}}$$



**Figure 17**

Notons que pour calculer aisément  $d_1$  et  $d_2$ , on peut remarquer que le plan médiateur des deux sources émettant en phase contient un maximum d'amplitude, ce qui permet d'ajuster l'origine de l'abscisse x du capteur - encore faut-il ne pas se tromper dans

le choix de la frange d'amplitude maximale -. On aurait pu penser que le plan médiateur de  $S_1S_2$  coïncide avec le plan de symétrie de l'ensemble des deux courbes  $I_1(x)$ ,  $I_2(x)$ . Mais les tolérances de fabrication des émetteurs sont telles que la direction d'émission maximale peut différer sensiblement de l'axe de révolution du cylindre encapsulant l'émetteur.

On constate que les abscisses des *extrema* des courbes  $I_{(pha)exp}$  et  $I_{(pha)(théo)}$  coïncident du moins dans la zone où le recouvrement est important. Ce qui montre que c'est bien le facteur de phase qui détermine pour l'essentiel la position des franges. En ajoutant dans le modèle théorique, un terme de phase supplémentaire égal à  $\pi$ , on explique la position des *extrema* de  $I_{opp}$ .

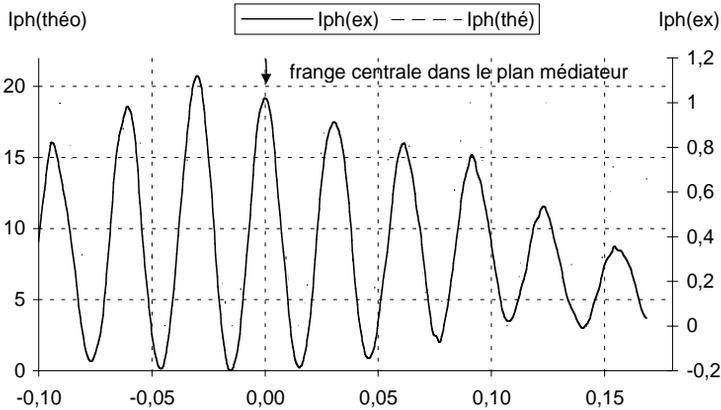


Figure 18

5.2.3. **Prise en compte de tous les facteurs physiques**

L'élongation instantanée  $s$  de l'onde, que l'on peut représenter par une amplitude combinant le facteur de phase et la variation de l'amplitude avec le point est du type :

$$s_i(M) = A(M) \cos(\omega t - \phi_i(M))$$

ou :

$$s_i(M) = A(M) \cos \left( \omega \left( t - \frac{d_{S_i M}}{c} \right) \right)$$

La courbe réelle  $I_{pha(exp)}$  peut être confrontée à la courbe théorique découlant du principe de superposition en intégrant à la fois le facteur de phase responsable de la position des franges et l'évolution de l'amplitude avec le point.

La relation classique :

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1}\sqrt{I_2} \cos\left(2\pi\left(\frac{d_2 - d_1}{\lambda}\right)\right)$$

s'accorde bien avec les résultats expérimentaux comme le montre la figure 19.

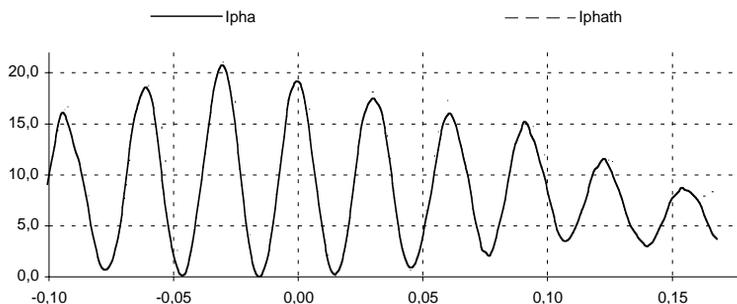


Figure 19 : Courbe d'intensité.

## 6. BILAN ÉNERGÉTIQUE D'UN PHÉNOMÈNE D'INTERFÉRENCES

### 6.1. Les interférences induisent une nouvelle répartition de l'énergie

L'existence d'interférences destructives peut faire croire, qu'il y a disparition d'énergie acoustique ou lumineuse suivant le cas. La comparaison des courbes donnant les diverses intensités acoustiques s'avère pertinente, pour montrer que le phénomène d'interférence à deux sources cohérentes se traduit par une nouvelle répartition spatiale de l'énergie, avec conservation de l'énergie totale.

Pour faire le bilan énergétique, représentons les intensités  $I_1$  (émetteur 1),  $I_2$  (émetteur 2)  $I_{pha}$  (interférences avec les deux émetteurs en phase) et  $I_{opp}$  (on inverse les deux bornes d'un émetteur).

Comparons de manière plus précise  $I_{pha}$  et  $I_1 + I_2 = I_{tot}$  afin d'en dégager l'aspect énergétique (cf. figure 20).

La conservation de l'énergie sur tout le domaine étudié (qui englobe la quasi totalité des franges d'interférences) se traduit par l'égalité des zones hachurées placées au-dessus de  $I_1 + I_2$  et des aires hachurées situées en dessous. En d'autres termes, l'intensité moyenne (obtenue par intégration ou calcul d'aire) du signal résultant est égale à la somme des intensités moyennes des deux sources si on intègre sur l'ensemble du domaine de recouvrement. Le phénomène d'interférence localise l'énergie au niveau des franges brillantes au détriment des franges sombres mais conserve l'énergie globale.

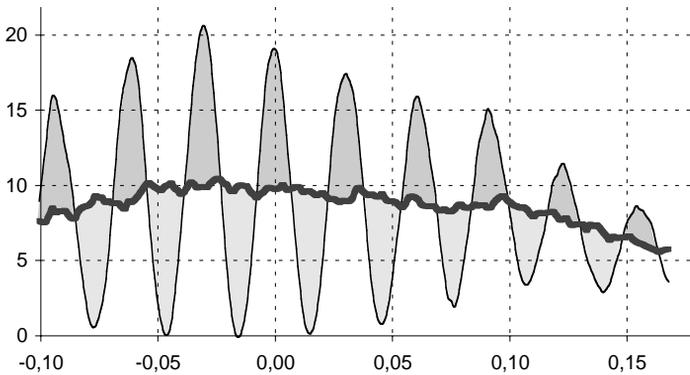


Figure 20

## CONCLUSION

Le nombre élevé de mesures que peut contenir une expérimentation assistée par ordinateur induit un retour aux sources. L'expérience en tant que situation réelle exprime par ce biais toute la richesse de sa complexité. Pour qui veut en appréhender le contenu physique, il faut poser des hypothèses simplificatrices en construisant un modèle par approximations successives. Comme la réalisation de cette expérience a nécessité beaucoup de temps, nous avons jugé utile, pour remédier à cet inconvénient, de mettre à disposition de toute personne intéressée l'ensemble des résultats expérimentaux (tableaux de données numériques, schémas, graphes, images) sur Internet sur le site de l'UdP <http://www.cnam.fr/hebergement/udp> Il suffit donc d'un mouvement de souris pour récupérer les fichiers correspondants et les exploiter à votre guise.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] F. PAVIET-SALOMON : «Influence de la taille de la cellule de détection en optique» - BUP n° 759, décembre 1993.