

Projet Rétinac

— Peut-on voir le son ? —
2017 - 2019

Ambre Deshayes

Violette Kubiaczyk

Professeurs référents: JC. Jouan Y. Chriqui



Lycée Militaire de Saint-Cyr L'Ecole



Table des matières

1	Introduction	3
2	Quelques notions sur le son	3
2.1	La fréquence	4
2.2	L'amplitude	4
2.3	Longueur d'onde	4
3	Description et fonctionnement du montage	5
3.1	Acquisition	5
3.2	Déplacement	7
3.3	Traitement des données	8
4	Application du montage à l'étude de phénomènes physiques liés au son	9
4.1	Interférences	9
4.1.1	Franges d'interférences	9
4.1.1.1	Description de l'expérience	9
4.1.1.2	Résultats expérimentaux	10
4.1.2	Anneaux d'interférences	12
4.1.2.1	Description de l'expérience	12
4.1.2.2	Résultats expérimentaux	12
4.2	Diffraction	14
4.2.1	Franges de Grimaldi	15
4.2.1.1	Description de l'expérience	15
4.2.1.2	Résultats expérimentaux	15
4.2.2	De la diffraction de Fresnel à la diffraction de Fraunhofer . . .	17
5	Conclusion	20
6	Annexes	21
6.1	Annexe 1 : absorption des ultrasons dans l'air	21

Résumé

Nous proposons un montage permettant de rendre visible les phénomènes sonores. Le montage permet de visualiser la répartition spatiale de l'intensité sonore dans l'espace. Le montage est ensuite utilisé pour visualiser et étudier les phénomènes d'interférences et de diffraction dans le domaine des ultrasons.

1 Introduction

Peut-on voir le son ? Peut-on obtenir une image de notre environnement sonore ? Tel est le point de départ de notre réflexion.

Réaliser une telle image nécessiterait de localiser les sources sonores dans notre environnement et de faire l'analyse de leur contenu spectral à l'instar de l'œil pour le traitement de l'information lumineuse.

La première étape consisterait à réaliser un écran acoustique constitué d'une matrice de détecteurs sonores, analogue de la rétine, d'où le nom Rétinac que nous avons donné à notre projet.

Plusieurs solutions techniques ont été envisagées, comme la réalisation d'un écran avec un grand nombre de micros. Au final nous avons choisi de travailler avec un nombre restreint de micros que l'on déplace dans l'espace. La solution technique retenue nous permet à la fois de gérer le déplacement, l'acquisition ainsi que le traitement des données à partir de la même interface.

A l'aide du montage, nous avons pu revisiter les expériences classiques d'interférences et de diffraction dans le domaine acoustique. Il y a deux cents ans, Augustin Fresnel présentait son mémoire sur la nature ondulatoire de la lumière devant l'Académie des Sciences. Suivant ses pas, nous sommes parties à la recherche de l'équivalent acoustique du point brillant de Poisson.

2 Quelques notions sur le son

Le son est une onde mécanique produite par une vibration mécanique : celle de la membrane d'un haut-parleur par exemple. Le déplacement de la membrane comprime la tranche d'air en contact avec elle. Celle-ci comprime à son tour la tranche d'air voisine et ainsi de suite.

La propagation du son s'accompagne de variations de pression que l'on peut détecter et transformer en signal électrique à l'aide d'un microphone.

Dans le cas d'une onde sonore sinusoïdale (celle produite par un diapason par exemple ; on parle dans ce cas de son pur) le microphone détecte des variations de pression sinusoïdales, représentées figure 1, et qui s'écrivent :

$$p(t) = p_m \cos(2\pi f \times t + \Phi) \quad (1)$$

où

- p_m est l'amplitude du signal en Pa ;
- f la fréquence du signal en Hz ;
- Φ la phase initiale du signal en rad.

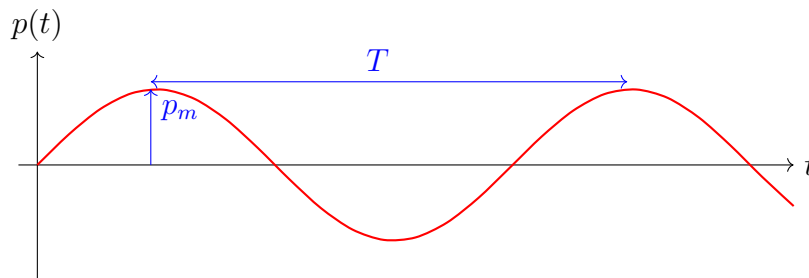


FIGURE 1 – Evolution de la pression de l’air au cours du temps pour une position donnée du micro. $\Phi = -\pi/2$

2.1 La fréquence

La fréquence correspond au nombre de motifs reçus par le micro par seconde. Elle est liée à la période T (plus petite durée au bout de laquelle le signal se répète identique à lui même) par la relation 2 :

$$f = \frac{1}{T} \quad (2)$$

Les sons audibles ont des fréquences comprises entre 20 Hz et 20 kHz. Les ultrasons ont des fréquences supérieures à 20 kHz et les infrasons des fréquences inférieures à 20 Hz.

2.2 L’amplitude

L’amplitude correspond à la valeur maximale du signal. L’amplitude est liée à l’intensité sonore I (en $W.m^{-2}$) qui représente l’énergie acoustique reçue par unité de temps et de surface. Plus précisément, l’intensité acoustique est proportionnelle au carré de l’amplitude.

L’oreille humaine étant un détecteur logarithmique, on caractérise la sensation sonore par le niveau acoustique L_{dB} .

$$L_{dB} = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (3)$$

où $I_0 = 10^{-12} W.m^{-2}$ est une intensité de référence correspondant au seuil d’audibilité de l’oreille humaine.

A titre d’exemple, une conversion normale correspond à un niveau acoustique de $L = 60$ dB et des surpressions acoustiques de l’ordre de $2 \times 10^{-4} Pa$.

2.3 Longueur d’onde

L’onde sonore sinusoïdale est également caractérisée par sa **longueur d’onde** λ (en m) qui représente la plus petite distance au bout de laquelle l’onde se répète dans l’espace.

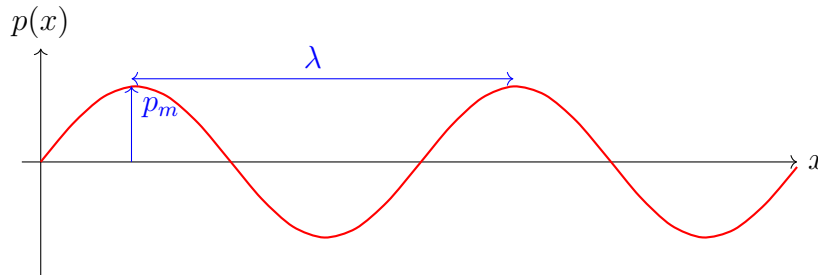


FIGURE 2 – Evolution de la pression de l'air en fonction de la distance à un instant donné.

La longueur d'onde est liée à la fréquence par la relation 4 :

$$\lambda = c \times T = \frac{c}{f} \quad (4)$$

où c est la célérité du son dans le milieu.

Pour l'air ($T = 25\text{ }^\circ\text{C}$; $P = 1\text{ bar}$), c vaut 343 m s^{-1} .

Les sons de fréquence 20 Hz , ont des longueurs d'onde $\lambda = 17\text{ m}$; ceux de fréquences 20 kHz des longueurs d'onde $\lambda = 1,7\text{ cm}$.

Dans le cadre de notre projet, nous cherchons à mesurer l'intensité sonore liée à la grandeur p_m .

Nous travaillons à fréquence fixe dans le domaine des ultrasons : le son étant produit par un émetteur piézoélectrique de fréquence 40 kHz ($\lambda = 8\text{ mm}$) et capté par un récepteur piézoélectrique.

Le choix des ultrasons s'est vite imposé à nous pour plusieurs raisons. Tout d'abord pratique, les ultrasons sont faciles à mettre en oeuvre avec le matériel disponible au lycée et permettent de faire de l'acoustique sans fatigue auditive pour l'oreille humaine. Travailler dans le domaine ultrasonique permet de plus de s'affranchir des perturbations dues au bruit ambiant. Leur longueur d'onde de l'ordre du centimètre permet de mettre en évidence facilement les phénomènes d'interférence et de diffraction comme nous le verrons dans la suite. Il faudra cependant tenir compte de leur atténuation lors de leur propagation dans l'air comme le montre la courbe de l'annexe 6.1.

3 Description et fonctionnement du montage

3.1 Acquisition

Nous avons tout d'abord réalisé l'acquisition de la tension aux bornes d'un seul micro.

Faire une acquisition consiste à mesurer la valeur de la tension à intervalle de temps régulier appelé période d'échantillonnage et notée T_e . La durée d'acquisition et le nombre N de points de mesure sont reliés par la relation :

$$\text{durée d'acquisition} = N \times T_e$$

Dans le cas des ultrasons, de fréquence $f = 40,0$ kHz (période $T = 25 \mu\text{s}$), pour avoir $N = 10$ points de mesure par période, il faut choisir une période d'échantillonnage de $T_e = 2,5 \mu\text{s}$ soit une fréquence d'échantillonnage de $f_e = 400$ kHz comme le montre la figure ci-dessous.

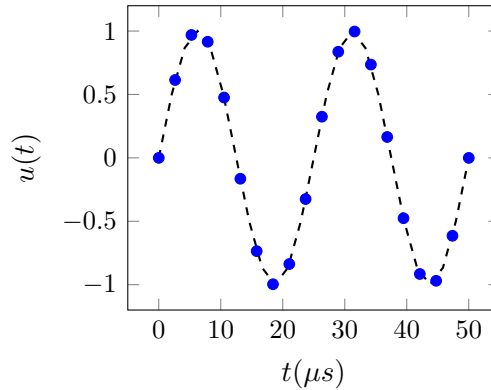


FIGURE 3 – Fonction sinusoïdale échantillonnée : en tirets, le signal non échantillonné

Pour l'acquisition nous avons utilisé la carte d'acquisition SYSAM SP5 (Eurosmart) disponible au lycée. C'est un CAN (convertisseur analogique numérique) 12 bits dont la fréquence d'échantillonnage maximale est de 500 kHz (quand plusieurs voies sont utilisées) ce qui est largement suffisant pour échantillonner un signal à 40 kHz.

L'acquisition est pilotée par le langage Python et la bibliothèque Pycanum écrite par F. Legrand ce qui nous permet de récupérer les N valeurs u_i de la tension échantillonnée afin de pouvoir les traiter par la suite. L'acquisition est faite sur une durée de 0,10 ms avec une fréquence d'échantillonnage de 500 kHz ce qui correspond à $N = 50$ points de mesure.

La valeur efficace de la tension (root mean square) est ensuite calculée par la relation 5 :

$$u_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N u_i^2} \quad (5)$$

Dans le cas d'un signal sinusoïdal, la valeur efficace est liée à l'amplitude u_m par la relation 6 :

$$u_{rms} = \frac{u_m}{\sqrt{2}} \quad (6)$$

Dans un deuxième temps, nous avons réalisé 7 acquisitions successives sur 7 micros reliés aux 7 entrées analogiques de la carte d'acquisition et extrait les valeurs efficaces pour chacun des micros ce qui nous a permis d'observer une première figure d'interférences à l'aide du premier prototype de la figure 4.

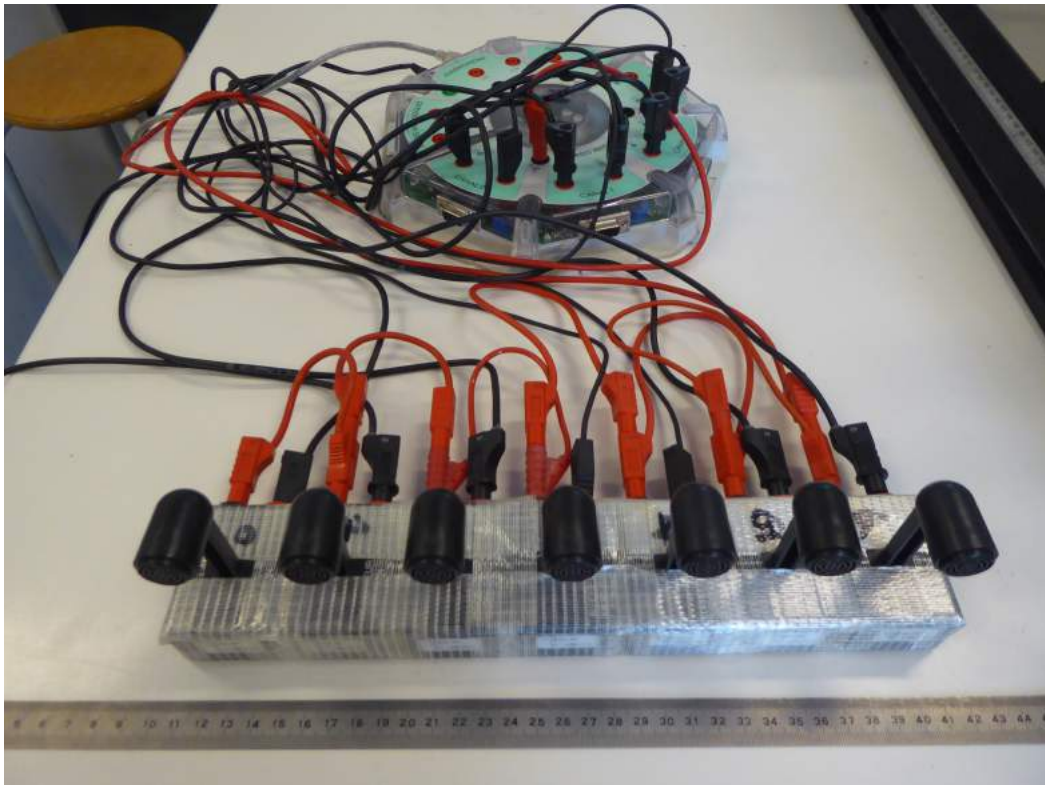


FIGURE 4 – Premier prototype

Ce premier montage présente plusieurs limitations. La première est liée au nombre limité de micros, lui-même lié au nombre limité d'entrées de la carte d'acquisition. La seconde est la faible résolution spatiale liée à l'encombrement des boîtiers supports des micros.

Nous avons dépassé ces limitations en achetant des micros de plus petite taille et augmenté artificiellement le nombre de micros en déplaçant la barrette de micros dans l'espace ce qui a pour effet d'améliorer la résolution spatiale comme nous le verrons dans la suite.

3.2 Déplacement

Le déplacement de la barrette se fait grâce à un moteur pas à pas (NEMA 17). Le moteur est piloté par le langage Python et la bibliothèque pycanum (F. Legrand) via la carte d'acquisition SYSAM SP5 et son boîtier bologic. Le boîtier bologic est connecté à un pont en H (circuit L298N) lui-même connecté au moteur.

Le chariot de déplacement sur lequel est fixée la barrette de micros est un chariot d'imprimante 3D autorépliquante dont on trouve les plans (fichiers.scad) sur Internet (voir par exemple rebrap PrusaMendel). Le chariot et les supports du rail de guidage ont été réalisés en impression 3D avec l'imprimante du lycée. Le rail permet un déplacement sur une distance maximale de 1,0 m. Mais en pratique, nous réalisons des enregistrements sur des distances de l'ordre de 30,0 cm.

La résolution horizontale est de 0,8 mm. Cette distance correspond à un pas du moteur. La résolution verticale est quant à elle limitée par la taille des micros (1 cm

de diamètre). Dans la barrette réalisée, les micros sont distants de 1,6 cm.



FIGURE 5 – Photo du montage sur laquelle on peut voir la barrette de micros.

3.3 Traitement des données

Pour chaque position de la barrette, les valeurs efficaces des tensions aux bornes de chacun des micros sont calculées puis stockées dans un tableau.

Nous utilisons la fonction `imshow` de la bibliothèque `Matplotlib` pour afficher une image en 256 niveaux de gris à partir des valeurs du tableau. Le niveau de gris 0 est affecté à la valeur minimale du tableau et le niveau 255 à la valeur maximale.

L'image est ensuite filtrée par un algorithme de lissage (`lanczos`) ce qui a pour effet de faire disparaître la pixellisation et de rendre l'image plus lisible.

Nous avons été par ailleurs confrontées à une autre difficulté. En effet, nous avons constaté que pour une même intensité, les microphones n'avaient pas la même réponse et ne donnaient pas la même valeur efficace. Nous avons dû normaliser les réponses des microphones, en divisant la valeur de la tension efficace mesurée par une valeur de référence correspondant à la valeur efficace mesurée par le micro placé à distance nulle de l'émetteur.

4 Application du montage à l'étude de phénomènes physiques liés au son

Le montage réalisé nous a permis de visualiser et d'étudier des phénomènes stationnaires pour les lesquels il y a une modulation spatiale de l'intensité sonore tels que les interférences et la diffraction.

4.1 Interférences

Le phénomène d'interférences résulte de la superposition de deux ondes cohérentes. Il se traduit par un modulation spatiale de l'intensité sonore. Si les signaux qui se superposent sont en opposition de phase, alors l'amplitude du signal résultant est minimale. On dit que les interférences sont **destructives**. Au contraire, quand les signaux qui interfèrent sont en phase alors l'amplitude du signal résultant est maximale et les interférences **constructives**.

On se propose de rendre le phénomène visible dans le cas des ondes sonores.

4.1.1 Franges d'interférences

4.1.1.1 Description de l'expérience Les ondes sonores sont produites par deux émetteurs E_1 et E_2 distants de a et alimentés par le même GBF. On observe la figure d'interférence dans un plan parallèle à la droite (E_1E_2) , à la distance D , comme le montre la figure 6. La barrette est déplacée sur une distance de 30,0 cm avec un pas de 8 mm.

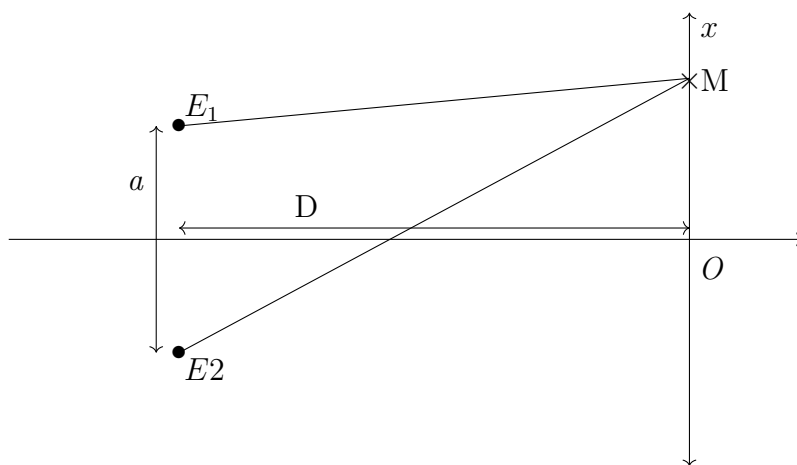
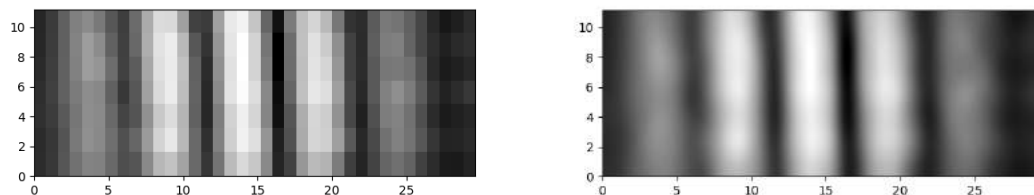


FIGURE 6 – Schéma du dispositif des interférences



(a) sans lissage

(b) avec lissage

FIGURE 7 – Figures d’interférences ; $a=5,2$ cm ; $D = 30,0$ cm ; les échelles des axes sont en cm

4.1.1.2 Résultats expérimentaux Le graphique ci-dessous représente l’évolution de la valeur efficace en fonction de sa position, pour le micro central numéro 4. La valeur efficace a été divisée par la plus grande valeur mesurée par le micro lors du déplacement.

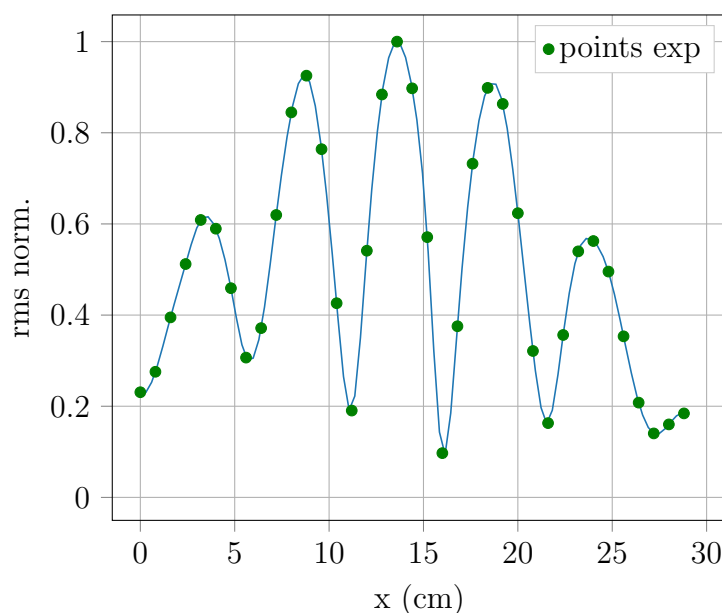


FIGURE 8 – Tension efficace relative en fonction de la position

On superpose la courbe théorique aux résultats expérimentaux.

Dans le cas d’une interférence à deux ondes, l’amplitude du signal au point M d’abscisse x (cf figure 6) est donnée par :

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos\left(\frac{2\pi\delta}{\lambda}\right) \quad (7)$$

avec

- A_1 et A_2 , amplitudes au point M des signaux émis par E_1 et E_2 respectivement ;
- δ , différence de marche au point M donnée par :

$$\delta = E_2M - E_1M = \sqrt{D^2 + \left(x + \frac{a}{2}\right)^2} - \sqrt{D^2 + \left(x - \frac{a}{2}\right)^2}$$

Dans l'hypothèse où, les deux ondes ont la même amplitude, on obtient :

$$A^2 = 2A_1^2 \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi\delta}{\lambda} \right) \right] \quad (8)$$

On superpose aux points expérimentaux, la courbe $\frac{A(x)}{2A_1}$ que l'on a pris soin de centrer autour de la position $x = 13,5$ cm (figure 9).

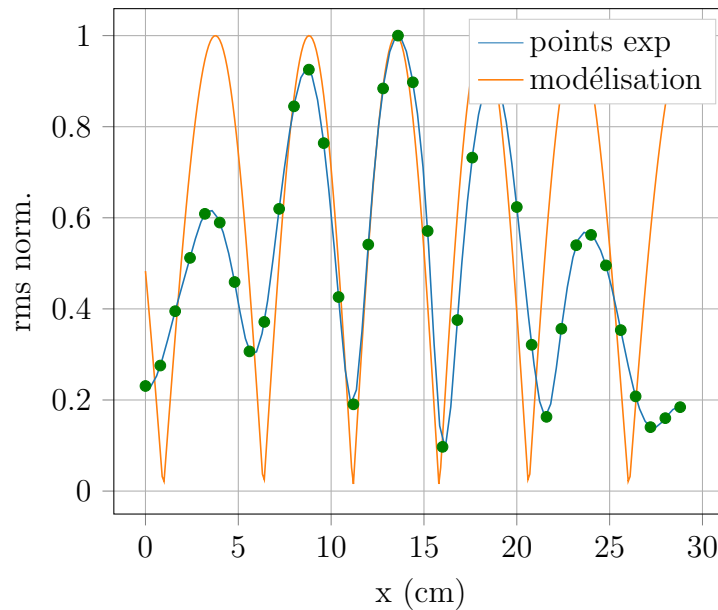


FIGURE 9 – valeur efficace relative en fonction de la position

Les points expérimentaux montrent une diminution du contraste des franges à cause de la différence d'amplitude des signaux que l'on superpose au point M : $A_1 \neq A_2$. On pourrait améliorer notre modèle en prenant en compte l'atténuation de l'onde lors de sa propagation. Les amplitudes A_1 et A_2 dépendent ainsi de la distance parcourue selon la relation et les paramètres tirés de la courbe de l'annexe 6.1.

Le nouvel ajustement de courbe est représenté à la figure 10. On constate une diminution de l'amplitude plus en accord avec nos valeurs expérimentales.

Cependant, l'interfrange expérimental augmente quand on s'éloigne du centre de la figure ce qui n'est pas le cas pour l'interfrange théorique qui reste constant. Nous n'avons pas à ce stade de la rédaction de ce rapport d'explication à cet écart.

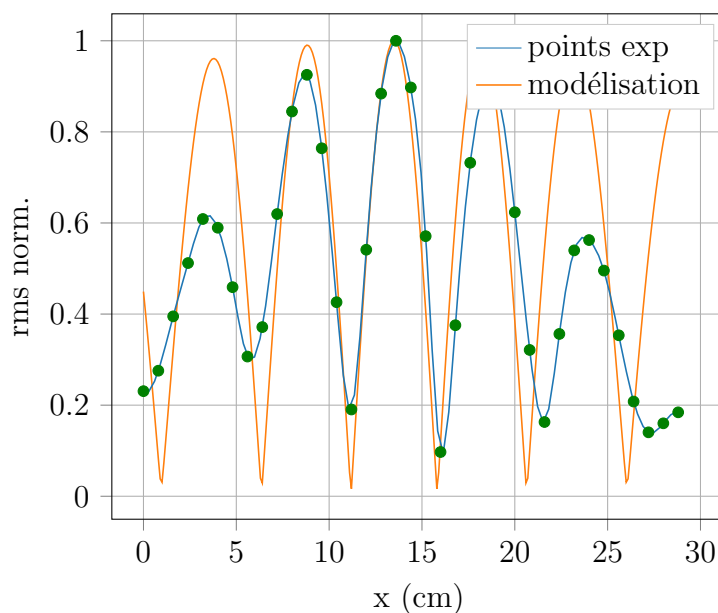


FIGURE 10 – Valeur efficace relative en fonction de la position et modélisation tenant compte de l’atténuation des ultrasons.

4.1.2 Anneaux d’interférences

4.1.2.1 Description de l’expérience On observe maintenant la figure d’interférence dans un plan perpendiculaire à la droite (E_1E_2) . E_1 et E_2 étant distants de a et l’écran d’observation placé à la distance D de E_1 .

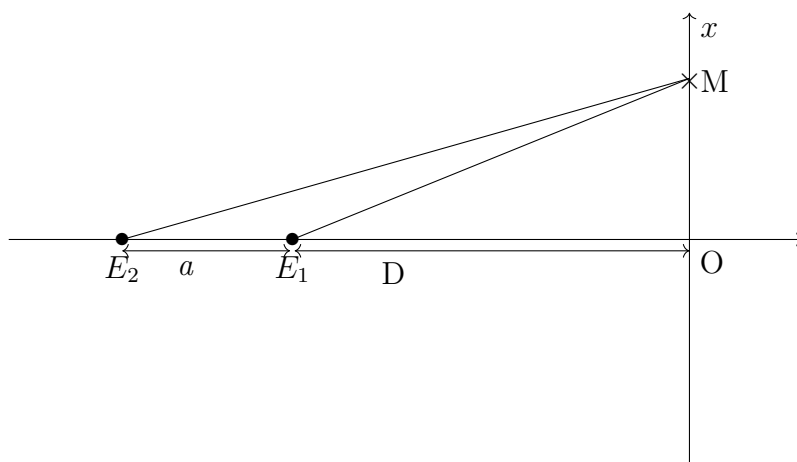
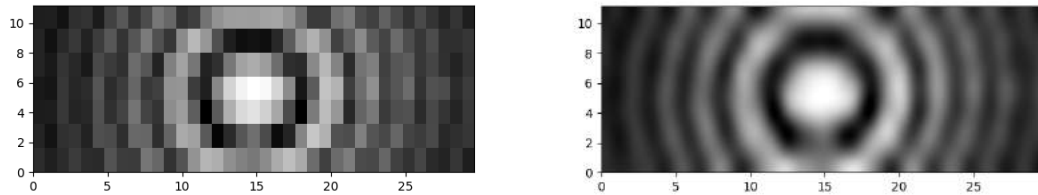


FIGURE 11 – Schéma du dispositif des anneaux

4.1.2.2 Résultats expérimentaux Le graphique de la figure 13 représente l’évolution de la valeur efficace en fonction de la position, pour le micro central numéro 4. La valeur efficace a été divisée par la plus grande valeur mesurée par le micro lors de son déplacement.



(a) sans lissage

(b) avec lissage

FIGURE 12 – Figures d’interférences ; $a=20,0$ cm ; $D = 10,8$ cm ;

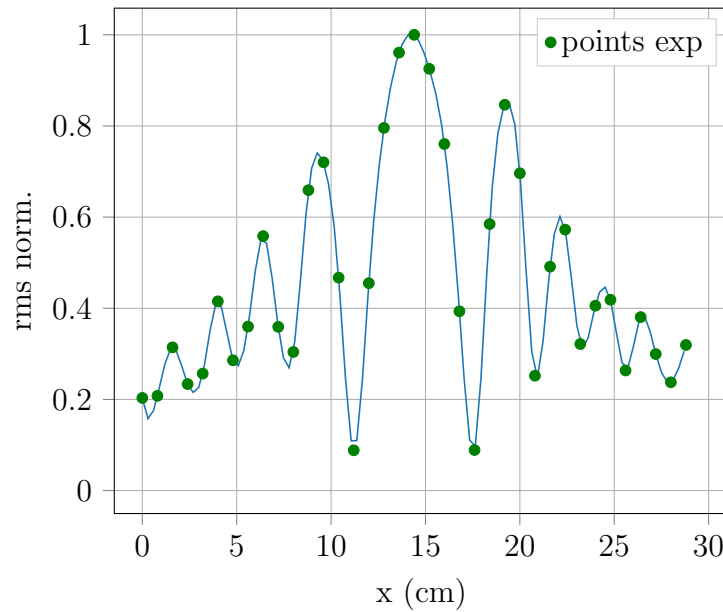


FIGURE 13 – Valeur efficace relative en fonction de la position.

On superpose aux résultats expérimentaux, la courbe théorique donnée par la relation 8 en adaptant l’expression de la différence de marche δ (équation 9), et en recentrant autour de la position $x = 14,0$ cm (figure 14).

$$\delta = E_2M - E_1M = \sqrt{x^2 + (D + a)^2} - \sqrt{x^2 + D^2} \quad (9)$$

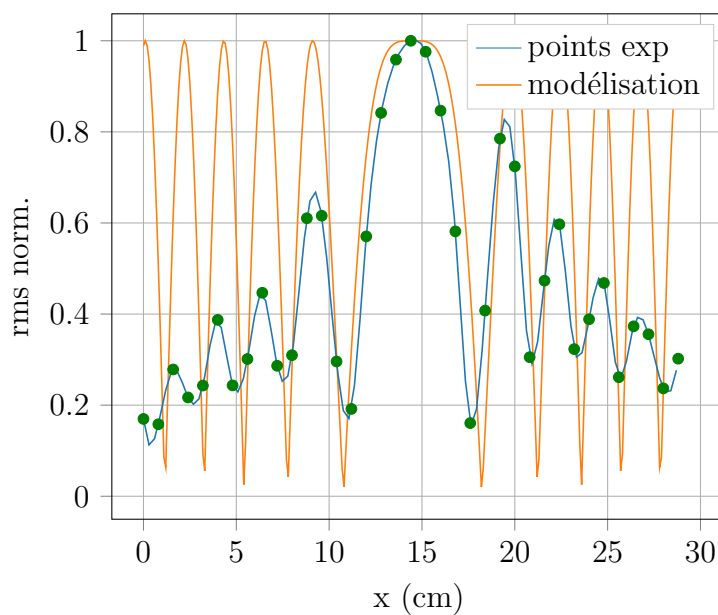


FIGURE 14 – Valeur efficace relative en fonction de la position.

Pour améliorer la modélisation, il faudrait aussi tenir compte de l'effet de diffraction de l'émetteur E_1 sur l'onde émise par E_2 . En effet, les émetteurs ont une dimension de l'ordre de la longueur d'onde des ultrasons.

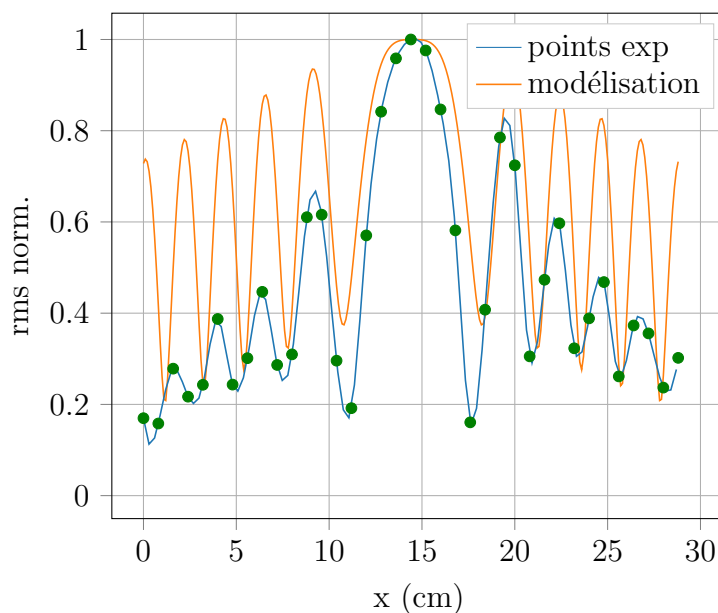


FIGURE 15 – Valeur efficace relative en fonction de la position et modélisation tenant compte de l'atténuation des ultrasons.

4.2 Diffraction

Le phénomène de diffraction se manifeste lorsqu'une onde rencontre un obstacle ou une ouverture dont les dimensions sont comparables à sa longueur d'onde. Il se

traduit par un éparpillement spatial de l'intensité sonore derrière l'obstacle.

Le phénomène se manifeste également quand l'onde rencontre un bord rectiligne. Ce sont les franges de Grimaldi (1618-1663), qui fut le premier à décrire le phénomène et à qui l'on doit le nom de diffraction.

4.2.1 Franges de Grimaldi

4.2.1.1 Description de l'expérience L'émetteur est placé devant le bord rectiligne d'un écran métallique, à la distance d de celui-ci. L'observation est faite à la distance D de l'écran. La barrette de micros est déplacée sur une distance de 20 cm avec un pas de 4 mm.

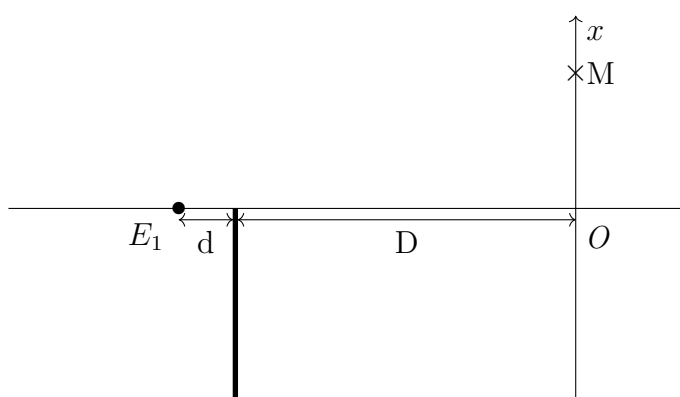


FIGURE 16 – Schéma du dispositif des franges de Grimaldi vu du dessus

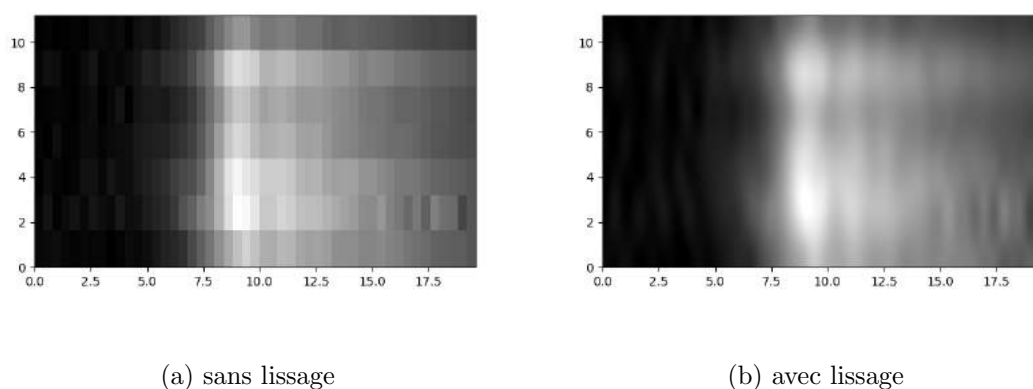


FIGURE 17 – Franges de Grimaldi ; $d = 22,0$ cm ; $D = 4,0$ cm

4.2.1.2 Résultats expérimentaux Le graphique de la figure 18 représente l'évolution de la valeur efficace en fonction de la position, pour le micro central numéro 4. La valeur efficace a été divisée par la plus grande valeur mesurée par le micro lors de son déplacement.

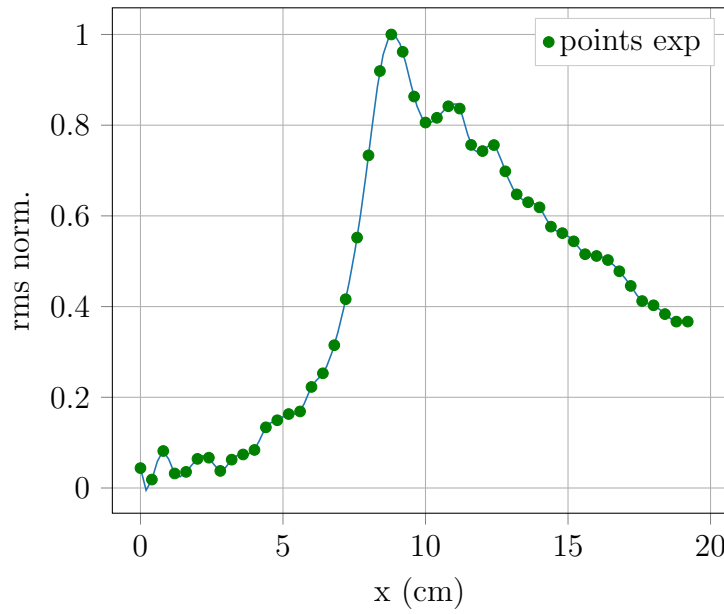


FIGURE 18 – valeur efficace relative en fonction de la position

On superpose aux points expérimentaux, la courbe théorique donnée par [3] :

$$A^2 = \frac{A_0^2}{2} \left\{ \left[\frac{1}{2} - C \left(-x \sqrt{\frac{2}{D\lambda}} \right) \right]^2 + \left[\frac{1}{2} - S \left(-x \sqrt{\frac{2}{D\lambda}} \right) \right]^2 \right\} \quad (10)$$

où C et S sont les intégrales de Fresnel dont les valeurs sont calculées avec Python.

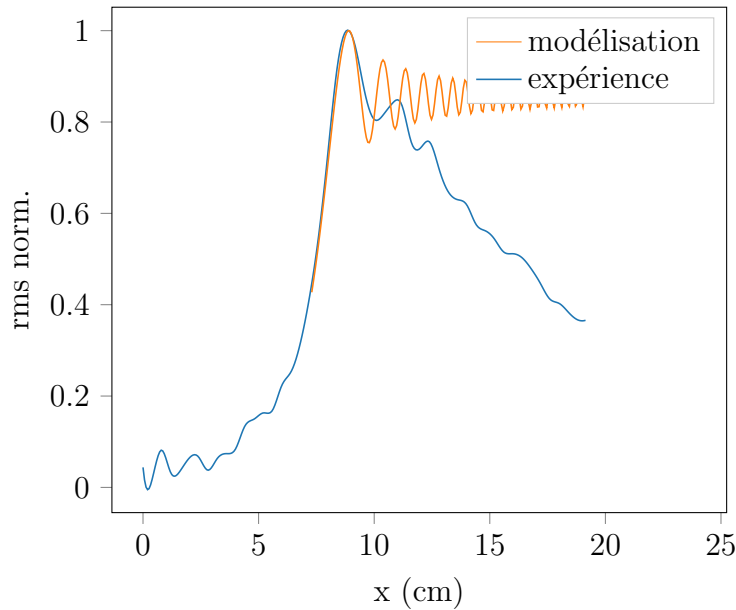


FIGURE 19 – valeur efficace relative en fonction de la position et modélisation

On retrouve un profil de courbe similaire. En revanche, les franges de la modélisation sont plus resserrées. L'origine de cet écart peut venir du fait que la formule

précédente est valable dans le cas d'un émetteur qui serait placé à grande distance devant le bord diffractant.

4.2.2 De la diffraction de Fresnel à la diffraction de Fraunhofer

Pour finir, nous nous sommes intéressées à la diffraction par des ouvertures circulaires et des obstacles sphériques. Nous présentons ici les résultats obtenus dans le cas d'une ouverture circulaire de diamètre a variable. L'émetteur étant placé à une distance d de l'ouverture et l'écran d'observation à une distance D (figure 20).

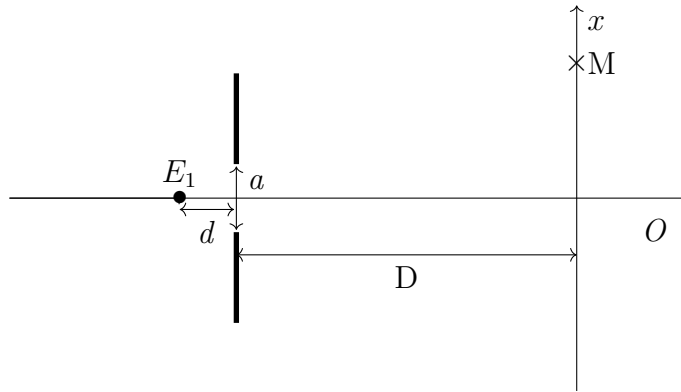


FIGURE 20 – Schéma du dispositif de diffraction par ouverture sphérique

Le régime de diffraction est gouverné par le nombre de Fresnel NF :

$$NF = \frac{a^2}{D\lambda} \quad (11)$$

$NF < 0,1$ correspond à un régime de diffraction de Fraunhofer ;

$NF > 10$ correspond à un régime de diffraction de Fresnel.

L'expression de la distance caractéristique D_c séparant les deux régimes de diffraction, obtenue à partir de la relation 11 pour $NF = 1$, est donnée par la relation 12.

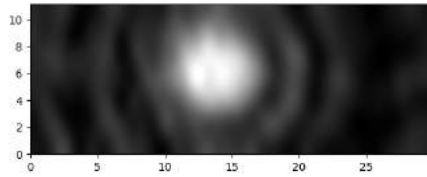
$$D_c = \frac{a^2}{\lambda} \quad (12)$$

Pour une distance D supérieure à D_c , on se trouve dans le régime de Fraunhofer.

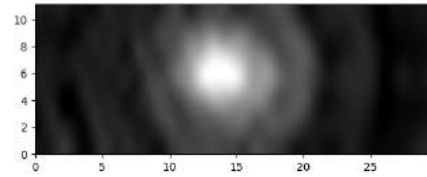
Dans le cas où $a = 7\lambda$, la distance caractéristique séparant les deux régimes de diffraction est $D_c = 42$ cm. Pour $a = 3,5\lambda$, $D_c = 10$ cm.

Les figures de diffraction (figure 21), ont été obtenues avec $D = 15$ cm et $d = 8$ cm pour une ouverture circulaire dont le diamètre varie entre $3,5\lambda$ et 7λ .

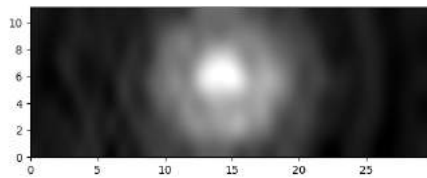
L'émetteur a été placé volontairement proche de l'ouverture (diaphragme d'optique, comme le montre la figure 5) de façon à être sûr d'éviter une diffraction par les bords extérieurs du diaphragme.



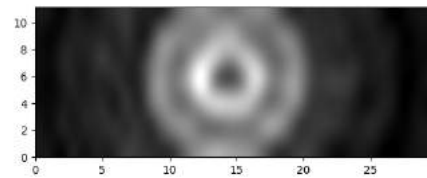
(a) $a=3,0$ cm ; $d = 8,0$ cm ; $D = 15,0$ cm ;
 NF = 0,17



(b) $a=4,0$ cm ; $d = 8,0$ cm ; $D = 15,0$ cm ;
 NF = 0,31



(c) $a=5,0$ cm ; $d = 8,0$ cm ; $D = 15,0$ cm ;
 NF = 0,48



(d) $a=6,0$ cm ; $d = 8,0$ cm ; $D = 15,0$ cm ;
 NF = 0,70

FIGURE 21 – Diffraction par une ouverture circulaire de diamètre variable.

Les graphiques de la figure 22 représentent l'évolution de la valeur efficace en fonction de la position, pour le micro central numéro 4. La valeur efficace a été divisée par la plus grande valeur mesurée par le micro lors de son déplacement.

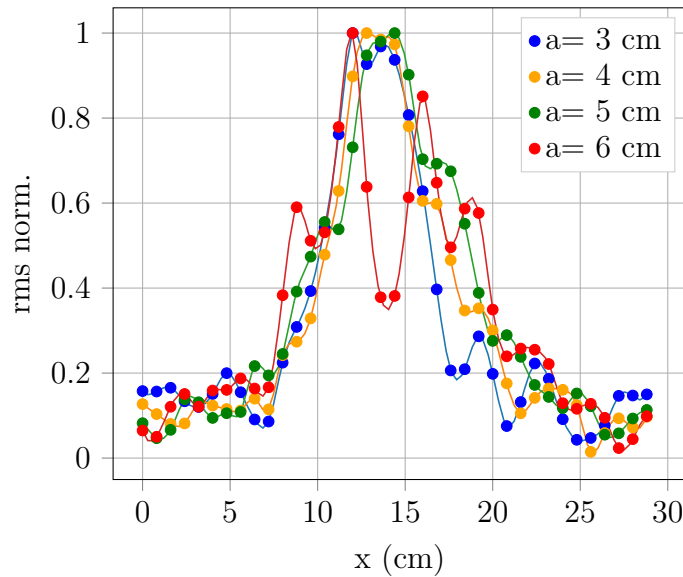


FIGURE 22 – Diffraction par une ouverture circulaire de diamètre a variable ; $d = 8,0$ cm ; $D = 15,0$ cm.

Le régime de diffraction de Fraunhofer correspond à la courbe obtenue pour $a = 3$ cm ($NF = 0,17$). On observe une figure d'Airy pour laquelle le diamètre l de la tâche centrale est donné par la formule 13.

$$\theta = 1,22 \times \frac{\lambda}{a} = \frac{l}{2D} \quad (13)$$

L'application numérique avec un diamètre $l = 10,5$ cm est en accord avec les résultats expérimentaux.

Le régime de diffraction de Fresnel correspond à la courbe obtenue pour $a = 6$ cm ($NF = 0,70$). Cette courbe montre un résultat surprenant : l'apparition d'un point obscur dans la zone de pleine intensité acoustique (équivalent du point brillant de Poisson dans la zone d'ombre acoustique). Ce résultat prédit par la diffraction de Fresnel s'observe pour des distances D qui vérifient la relation 14.

$$D = \frac{(a/2)^2}{2n\lambda} \quad (14)$$

où n est un entier naturel. Cette formule étant valable dans le cas où l'émetteur est loin de l'ouverture diffractante.

Pour $n = 1$, $a = 6$ cm, nous obtenons $D_{théorique} = 10,5$ cm. Calculons l'incertitude sur $D_{théorique}$:

$$\Delta D = D \left(\frac{2\Delta a}{a} + \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right) = 10,5 \times \frac{0,2 \times 0,1}{6} = 0,35 \text{ cm}$$

Nous avons négligé l'incertitude sur λ par rapport à l'incertitude sur a .

$D = 10,5 \pm 0,4$ cm. Les 15.0 cm obtenus expérimentalement n'appartiennent pas à l'intervalle $[10,1 \text{ cm}; 10,9 \text{ cm}]$. Le modèle de Fresnel n'est donc pas adapté, l'émetteur étant trop proche de l'ouverture.

5 Conclusion

Nous avons réalisé un montage permettant de visualiser la répartition spatiale de l'intensité acoustique dans l'espace. Le montage réalisé nous a permis de revisiter quelques expériences classiques d'interférences et de diffraction et d'obtenir des images inédites dans le domaine de l'acoustique. Nous avons notamment observé une tâche obscure dans la zone de pleine intensité acoustique d'une ouverture circulaire. On pourrait imaginer utiliser le montage pour étudier d'autres phénomènes acoustiques, à d'autres fréquences, pour lesquels l'intensité acoustique est stationnaire telle que la répartition spatiale de l'intensité acoustique derrière des structures plus complexes comme les métamatériaux acoustiques.

Remerciements

Nous remercions monsieur Marchal (Maitre de Conférence, UPMC, Institut Jean le Rond d'Alembert) pour nous avoir conseillées dans le choix des micros à ultrasons. Nous remercions également monsieur Jouan et monsieur Chriqui pour nous avoir encadrées lors de la réalisation de ce projet.

Références

- [1] B. Valeur, *Sons et lumière*, Paris, Belin, 2008, coll. Bibliothèque scientifique
- [2] C.Simon, "Des franges de Grimaldi à la télémétrie laser, réflexions sur la diffraction de la lumière et son enseignement au lycée" , Bull.Un.Prof.Phys.Chim.,vol112,n1003,p. 621-653,avril 2018.
- [3] ENS Cachan, "étude de la diffraction de Fresnel dans quelques cas simples" : <http://www.physique.ens-cachan.fr/laboratoire/experiences/fichiers/DiffractionFresnel.pdf>
- [4] F.Legrand, Informatique Appliquée aux Sciences Physiques : <http://www.f-legrand.fr/scidoc/>

6 Annexes

6.1 Annexe 1 : absorption des ultrasons dans l'air

Nous avons mesuré la valeur efficace mesurée par un micro en fonction de sa distance y à la source d'émission placée en $y = 0$. Les résultats expérimentaux sont présentés à la figure 23.

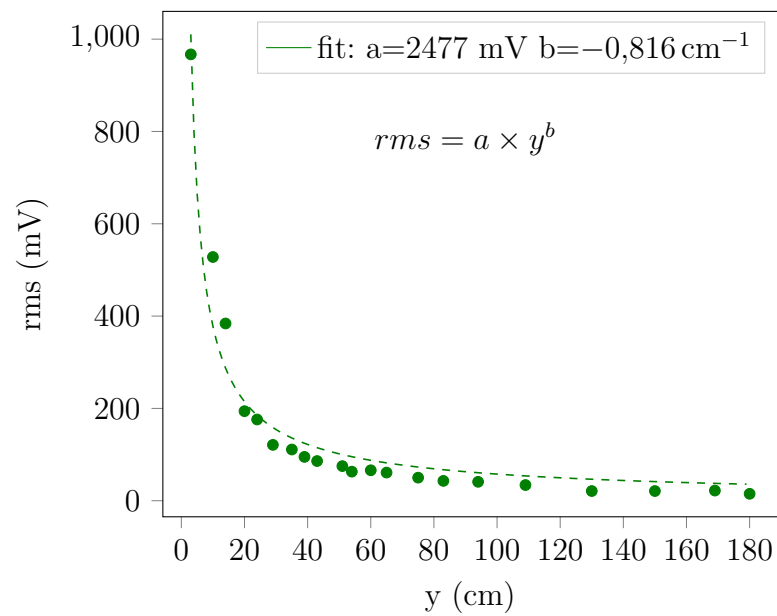


FIGURE 23 – Evolution de la valeur efficace aux bornes d'un micro en fonction de sa distance y à l'émetteur.