

Étude expérimentale des ondes sonores

REALISATION D'UN ENSEMBLE EMETTEUR - RECEPTEUR D'ULTRA-SONS

par René ALLARD,

Lycée du Lac de Maine

rue de la Barre, 49000 Angers.

L'étude expérimentale des ondes sonores devient plus facile lorsqu'on utilise des ultra-sons qui ont l'avantage d'être inaudibles. Etant donné que les transducteurs d'ultra-sons sont assez directs et que la longueur d'onde est petite — 8,3 mm pour des ultra-sons de fréquence 40 kHz se propageant dans l'air — on peut facilement mettre en évidence les phénomènes de réflexion, diffraction, d'interférences,... avec des dispositifs — écrans, fentes... — de dimensions tout à fait raisonnables. Les résultats obtenus avec le matériel qui a été conçu permettent une vérification satisfaisante de ceux que la théorie a permis de prévoir.

Les transducteurs utilisés, de marque Murata, sont :

« Murata 40 LIS » (source) et « Murata 40 LIR » (récepteur).

Ils se trouvent assez facilement dans le commerce ; conçus pour équiper les dispositifs de télécommande ou d'alarme, ces transducteurs conviennent aussi pour faire des expériences sur les ondes en classe de Première ou de Terminale.

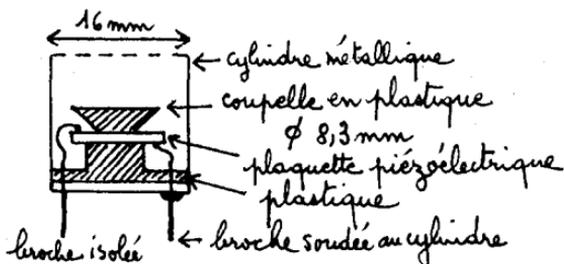
I. LES TRANSDUCTEURS D'ULTRA-SONS.

1. La source d'ultra-sons transforme directement l'énergie électrique en énergie mécanique. Elle est constituée d'une plaquette

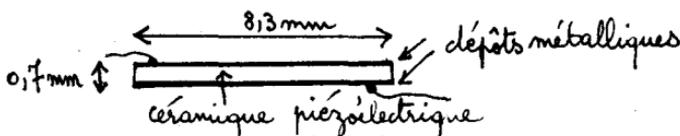


Les transducteurs Murata.

de céramique (à base de titanates) dont 2 faces opposées sont métallisées ; cette plaquette entre en résonance mécanique lorsqu'une tension périodique, de fréquence $N \approx 40$ kHz est appliquée entre les surfaces métallisées ; l'amplitude des vibrations mécaniques de la lame est proportionnelle à la tension électrique appliquée entre les 2 armatures. Les vibrations de la plaquette sont communiquées au fluide qui l'entoure.



Coupe d'un transducteur source ou récepteur.



Plaquette de céramique
(8,3 mm \times 8,3 mm \times 0,7 mm).

2. Les détecteurs d'ultra-sons transforment directement l'énergie mécanique de l'onde qu'ils captent en énergie électrique. Leur constitution est la même que celle des sources d'ultra-sons.

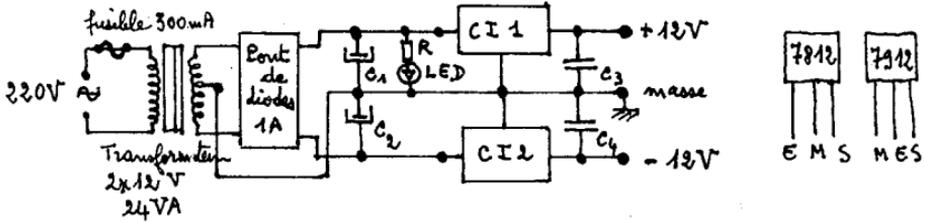
Entre les faces métallisées de la plaquette piézoélectrique qui reçoit une onde ultra-sonore, apparaît une tension électrique de même fréquence que celle de l'onde et d'amplitude proportionnelle à celle de l'onde détectée. Les transducteurs d'ultra-sons sont des dispositifs réversibles ; ils ont une bande passante très étroite : 40 kHz \pm 1 kHz.

Ces transducteurs sont équivalents à un condensateur plan de capacité $C \approx 1,6$ nF et d'impédance $Z \approx 2500 \Omega$ à 40 kHz.

II. LE COFFRET EMETTEUR.

Il contient 4 circuits : une alimentation stabilisée ± 12 V, 2 circuits générateurs de tensions sinusoïdales, un circuit générateur d'impulsions.

1. L'alimentation stabilisée symétrique $\pm 12\text{ V}$ sert à alimenter les circuits du coffret émetteur et du coffret récepteur.



$R = 1\text{ k}\Omega$; $C_1 = C_2 = 2200\text{ }\mu\text{F}/25\text{ V}$; $C_3 = C_4 = 100\text{ nF}$.

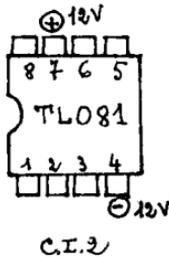
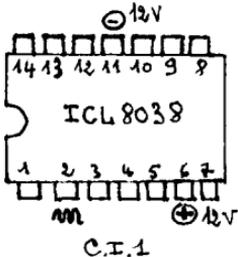
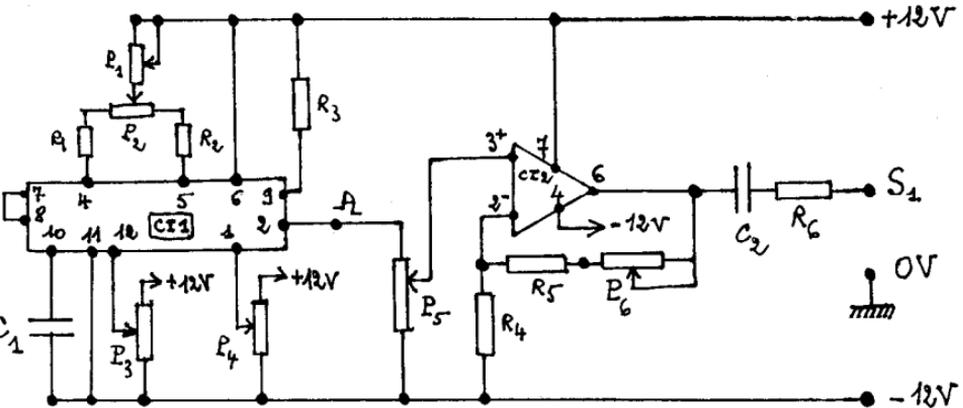
CI 1 : régulateur de tension positive 7812
 CI 2 : régulateur de tension négative 7912

} montés sur refroidisseurs

Cette alimentation stabilisée peut débiter 1 A si les régulateurs de tension sont montés sur des refroidisseurs convenables.

2. Les générateurs de tension sinusoïdale de fréquence 40 kHz.

La tension sinusoïdale est générée par le circuit intégré ICL 8038 puis amplifiée par le circuit intégré TL 081 à haute impédance d'entrée. Les 2 générateurs de signaux ultra-sonores seront utilisés dans une expérience de battements.



$R_1 = R_2 = 3,9 \text{ k}\Omega$; $R_3 = 4,7 \text{ k}\Omega$; $R_4 = 10 \text{ k}\Omega$; $R_5 = 1 \text{ k}\Omega$;
 $R_6 = 100 \text{ k}\Omega$ est une résistance de protection ;
 $C_1 = 470 \text{ pF}$; $C_2 = 100 \text{ nF}$;
 $P_1 = 10 \text{ k}\Omega$ est un trimmer ; $P_2 = 1 \text{ k}\Omega$; $P_3 = P_4 = 100 \text{ k}\Omega$;
 $P_5 = 470 \text{ k}\Omega$; $P_6 = 47 \text{ k}\Omega$.

Ajustage de la fréquence.

La tension sinusoïdale est obtenue sur la broche n° 2 du circuit ICL 8038 ; sa fréquence est :

$$f = \frac{0,15}{RC_1} \quad \text{avec} \quad R = P_1 + P_2 + R_1 // R_2.$$

P_2 permet le réglage de la symétrie du signal (avec un oscilloscope).

P_3 et P_4 servent à réduire la distorsion (avec un oscilloscope).

P_1 permet d'ajuster la fréquence de la tension sinusoïdale à une valeur voisine de 40 kHz (utiliser un fréquencemètre ou la base de temps d'un oscilloscope).

Le réglage de P_2 doit être fait avant celui de P_1 car P_2 a une influence sur la fréquence.

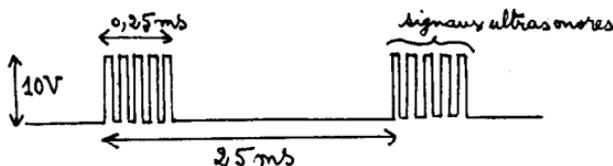
Sur la broche 2, l'amplitude de la tension sinusoïdale est de 2,4 V ; cette tension doit être amplifiée.

Amplification de la tension de fréquence 40 kHz à l'aide d'un amplificateur à haute impédance d'entrée TL081 dont le

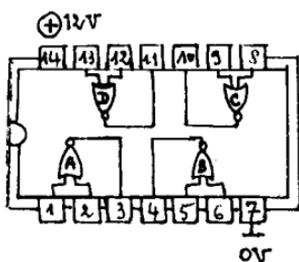
gain est $G = \frac{R_4 + R_5 + R_6}{R_4}$. En agissant sur P_5 et P_6 , on peut

obtenir, à la sortie S_1 ou S_2 du coffret émetteur une tension d'amplitude 8 V. L'amplitude maximale que l'on peut obtenir est de 9,5 V environ, au-delà, il y a écrêtage de la sinusoïde.

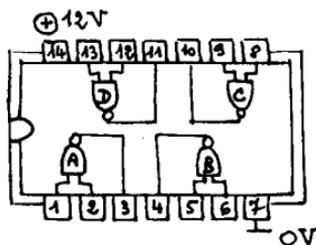
3. Le **générateur d'impulsions** est conçu pour délivrer 40 impulsions ultra-sonores par seconde ; chaque impulsion a une durée de 0,25 ms et est formée de signaux rectangulaires de fréquence 40 kHz.



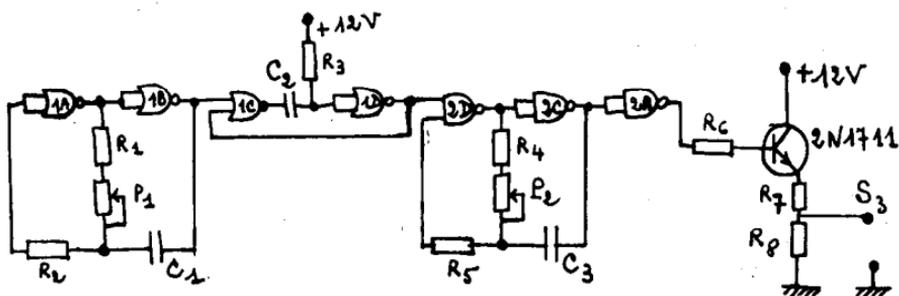
Ce générateur est réalisé avec 2 circuits intégrés CMOS : 4001 et 4011.



CI 1 : 4001



CI 2 : 4011



$$R_1 = 33 \text{ k}\Omega; R_2 = 220 \text{ k}\Omega; R_3 = 18 \text{ k}\Omega; R_4 = 10 \text{ k}\Omega; R_5 = 220 \text{ k}\Omega;$$

$$R_6 = 12 \text{ k}\Omega; R_7 = 100 \text{ k}\Omega; R_8 = 1,5 \text{ k}\Omega; P_1 = 220 \text{ k}\Omega; P_2 = 47 \text{ k}\Omega;$$

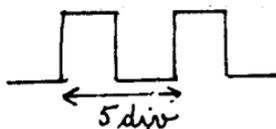
$$C_1 = 100 \text{ nF}; C_2 = 22 \text{ nF}; C_3 = 1 \text{ nF}.$$

Réglage du générateur d'impulsions à l'aide d'un oscillographe :

a) Tourner la résistance ajustable P_1 pour que la fréquence de répétition des impulsions soit de 40 Hz. Avec une base de temps de 5 ms.div⁻¹, on doit obtenir sur l'écran :



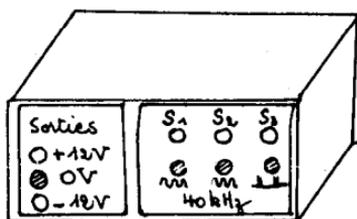
b) Tourner la résistance ajustable P_2 pour que la fréquence des signaux rectangulaires qui constituent l'impulsion soit de 40 kHz. Avec une base de temps de 5 μ s.div⁻¹, on doit obtenir sur l'écran :



La durée de l'impulsion est de 0,25 ms soit 10 fois la période des ultra-sons.

4. Présentation du coffret émetteur.

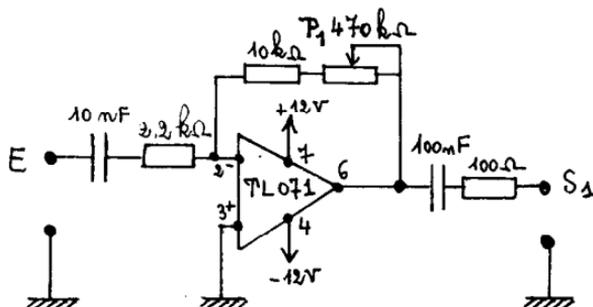
Les circuits électriques sont réalisés en circuits imprimés et placés à l'intérieur d'un boîtier modèle Teko P₄ :



III. LE COFFRET RECEPTEUR contient 2 circuits d'amplification de la tension alternative fournie par le détecteur d'ultra-sons.

Le premier circuit amplificateur réalisé avec le circuit intégré TL071 délivre à sa sortie une tension destinée à être visualisée sur l'écran d'un oscillographe ou mesurée avec un voltmètre. Le réglage du gain de cet amplificateur se fait avec le potentiomètre P₁ de 470 k Ω ; à la sortie S₁, on peut obtenir une tension sinusoïdale d'amplitude 10 V lorsque la source et le détecteur d'ultra-sons sont distants de 8 cm.

Pour une distance inférieure à 8 cm, la tension sinusoïdale est écrêtée. Le gain de cet amplificateur est suffisant lorsque la distance entre l'émetteur et le détecteur ne dépasse pas 1,50 m environ.

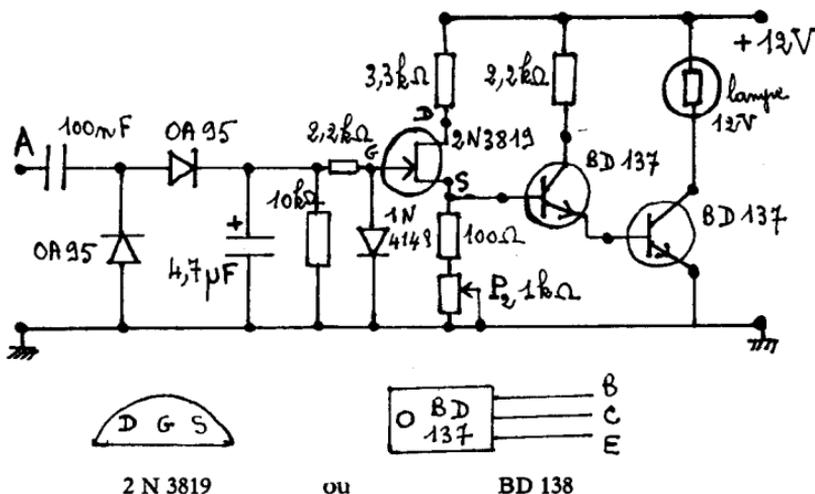


Le brochage du CI TL071 est identique à celui du TL081.

Le deuxième circuit amplificateur possède une sensibilité plus grande que le circuit précédent. Il permet de faire des expériences dans lesquelles les distances de propagation sont assez importantes : réflexion sur une cible, télécommande ; ces distances peuvent dépasser 4 mètres.

Le 3^e étage de cet amplificateur est relié à un circuit électronique qui commande une lampe (12 V) ; avec cette lampe, on peut

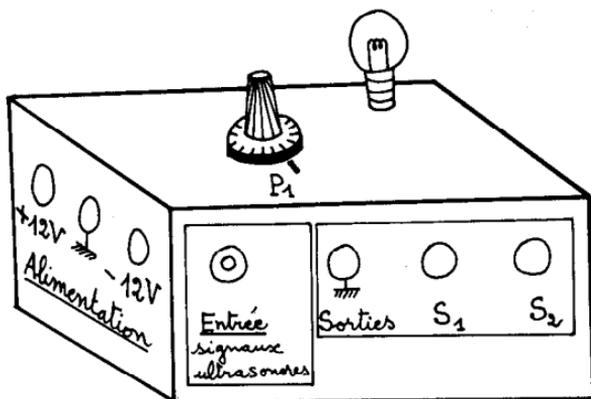
Circuit de commande de la lampe.



La tension alternative prélevée au point A du deuxième circuit amplificateur est redressée par une diode OA 95 puis filtrée avec le condensateur de 4,7 μ F; la tension continue ainsi obtenue est appliquée sur la grille G d'un transistor à effet de champ 2 N 3819. Pour que la lampe brille, il faut que le potentiel de la source S du transistor 2 N 3819 soit supérieur à 1,2 V environ. La résistance ajustable $P_2 = 1 \text{ k}\Omega$ permet d'agir sur le seuil de conduction des transistors BD 137; il faut qu'en l'absence de signal ultra-sonore, la lampe soit éteinte. Le réglage de la sensibilité du circuit de commande de la lampe se fait avec P_2 .

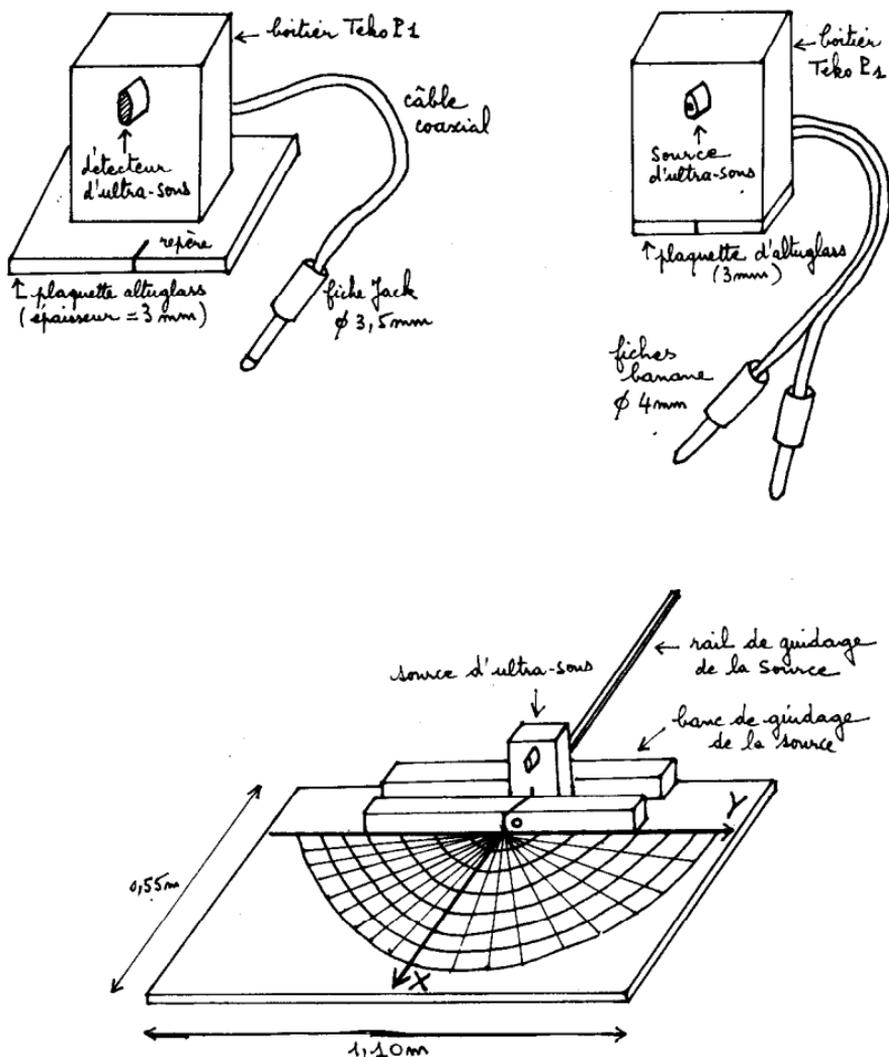
Si on veut télécommander un appareil situé à une distance de quelques mètres, on peut brancher un relais électromagnétique aux bornes de la lampe ou à la place de la lampe.

Présentation du coffret récepteur.



Les circuits amplificateurs peuvent être réalisés en circuits imprimés ou sur des plaques avec bandes cuivrées perforées au pas de 2,53 mm (type Veroboard). Le modèle du coffret utilisé est : Teko P₃.

IV. TABLE DE POSITIONNEMENT DE LA SOURCE ET DE REPERAGE DU DETECTEUR D'ULTRA-SONS.



La feuille de papier millimétré et la plaque d'altuglass n'ont pas été représentées.

1. La table réalisée avec du contreplaqué est destinée à repérer avec précision la position de la (ou des) source(s) et du détecteur d'ultra-sons. Elle comprend :

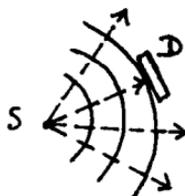
- un banc de guidage qui sert à maintenir une ou deux sources dans une position stable et définie dans les expériences d'interférences avec 2 sources et d'ondes stationnaires,
- un rail de guidage permet de positionner la source à une distance suffisamment grande (40 à 50 cm) d'un écran percé d'une ou plusieurs fentes lorsqu'on étudie la diffraction,
- des accessoires : écran réflecteur, écrans percés d'une ou plusieurs fentes d'Young. Ces écrans (en contreplaqué de 5 mm d'épaisseur) peuvent être maintenus verticalement grâce à une rainure profonde pratiquée dans le banc de guidage (cette rainure n'est pas représentée sur le schéma de la table).

2. Les repères d'espace qui permettent de définir la position du détecteur sur la table sont :

- un système de coordonnées cartésiennes (X, Y) obtenue en collant du papier millimétré sur la table,
- un système de coordonnées polaires (r, θ) réalisé en traçant une famille de demi-cercles, de centre O, de rayons variant de 10 cm en 10 cm, et des demi-droites issues de O faisant entre elles des angles de 10° .

Une plaque d'altuglass fixée sur la table protège le papier millimétré et permet l'inscription de la position du détecteur avec un crayon feutre (prendre un crayon conçu pour écrire sur les transparents projetables); les inscriptions peuvent être effacées avec un tampon d'ouate imbibé d'alcool.

3. L'orientation du détecteur doit être telle que le plan de la plaquette piézoélectrique soit orthogonal aux rayons des ondes.



La forme rectangulaire de la plaque d'altuglass fixée sous le boîtier du détecteur permet d'orienter correctement celui-ci.

V. MANIPULATIONS.

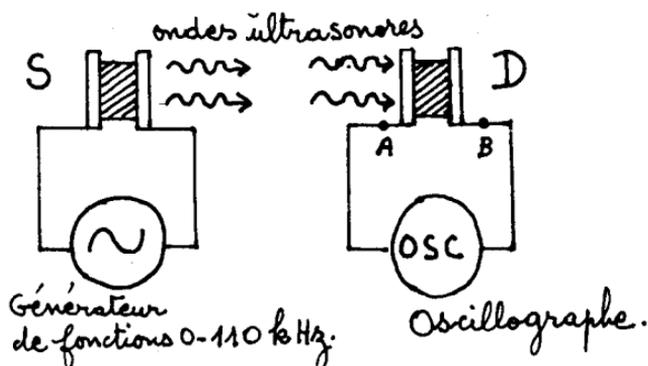
1. Fréquence de résonance mécanique d'un transducteur d'ultra-sons.

Considérons deux transducteurs possédant deux lames piézoélectriques identiques : l'un fonctionne en source, l'autre en détecteur. L'amplitude A_S des vibrations des armatures de la source et l'amplitude A_D des vibrations des armatures du détecteur dépendent de la fréquence N et de la valeur U_0 — crête à crête — de la tension sinusoïdale appliquée entre les armatures. On peut écrire : $A_S = A_D = f(N, U_0)$ car les lames piézoélectriques sont identiques.

La valeur de U_0 se mesure facilement sur l'écran d'un oscillographe :



a) Le dispositif expérimental.



Soit U_0 la valeur crête à crête de la tension sinusoïdale délivrée par le générateur de fonctions. L'amplitude a_S de l'onde émise par la source S est $a_S = A_S = f(N, U_0)$; U_0 est maintenue constante, mais on fait varier N . L'amplitude a_D de l'onde détectée peut s'écrire : $a_D = \alpha A_S$; α est le coefficient d'amortissement de l'onde; $0 < \alpha < 1$. La valeur crête à crête de la tension sinusoïdale qui apparaît entre les bornes A et B du détecteur est $U_{AB} = k a_D$; k est une constante qui dépend de la nature de l'élément piézoélectrique.

$$U_{AB} = k \alpha A_S = k \alpha f(N, U_0).$$

L'amplitude A_D des vibrations des armatures du détecteur est :

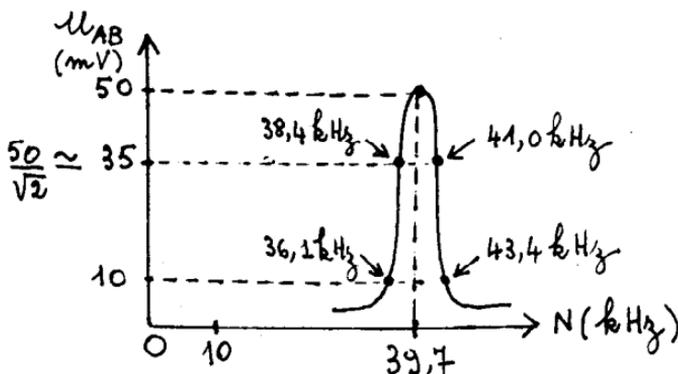
$$A_D = a_D = \alpha f(N, U_0).$$

Ces relations montrent que l'étude de la variation de l'amplitude des vibrations des armatures du détecteur en fonction de la fréquence se ramène à la mesure d'une tension U_{AB} sur l'écran d'un oscillographe.

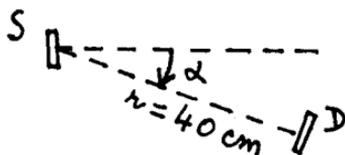
b) Les résultats.

La courbe de résonance obtenue montre qu'un transducteur d'ultra-sons est un oscillateur mécanique très peu amorti dont la fréquence de résonance est $N_0 \approx 39\,700$ Hz pour le modèle étudié. La bande passante est étroite : l'amplitude des vibrations est divisée par $\sqrt{2}$ pour $N \approx N_0 \pm 1,3$ kHz.

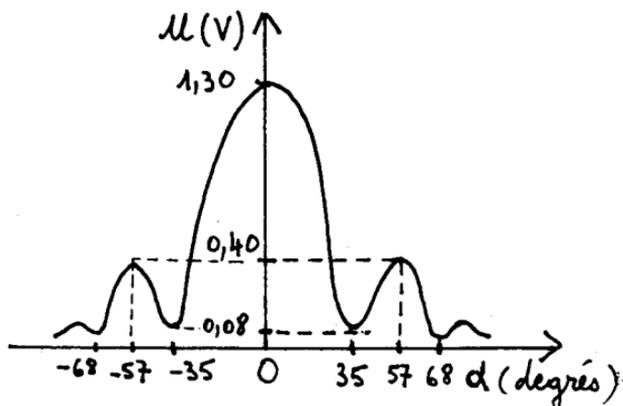
Aux basses fréquences, à 1 kHz par exemple, le transducteur vibre encore en émettant un son audible de très faible intensité.



2. Directivité de l'émission ultra-sonore.

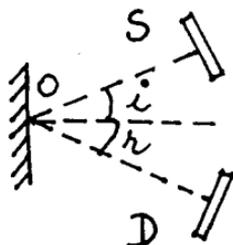


Pour étudier la variation de l'amplitude a_s de l'onde émise par la lame piézoélectrique en fonction de la direction — définie par l'angle α — le cylindre métallique, à l'intérieur duquel des réflexions pouvaient se produire, a été enlevé définitivement. Soit u la tension aux bornes du détecteur, après amplification ; les variations de u en fonction de α représentent les variations de l'amplitude a_s de l'onde à un facteur près. On obtient le graphe :



Ce diagramme montre que le rayonnement est assez directif. Une émission est d'autant plus directive que le rapport longueur d'onde/diamètre de la source est petit ; avec les transducteurs utilisés, ce rapport est égal à 1.

3. Réflexion.



Le miroir est une plaque en contreplaqué.

L'amplitude de l'onde détectée est maximale lorsque les angles d'incidence et de réflexion sont égaux : $i = r$.

OS et OD sont des droites normales aux lames piézo-électriques des transducteurs.

4. Réfraction.

La célérité des ondes sonores dans un gaz parfait est, en

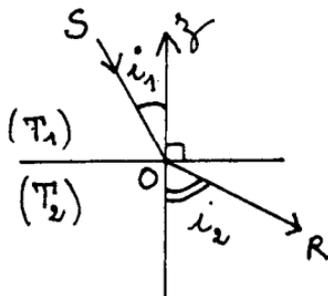
supposant la propagation adiabatique, $C = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$.

γ : rapport des chaleurs massiques à pression constante et à volume constant,

R : constante des gaz parfaits,

T : température du gaz, en Kelvins,

M : masse molaire du gaz.

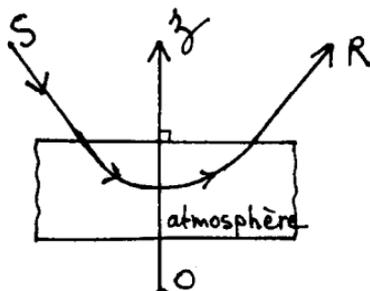


Considérons 2 couches d'air, séparées par une surface plane, de températures T_1 et T_2 , $T_2 > T_1$. Les célérités des ondes étant

différentes dans les 2 couches d'air, il y a réfraction des ondes — i_1 et i_2 étant respectivement les angles d'incidence et de réfraction des rayons sonores, on peut écrire les relations :

$$\frac{\sin i_1}{C_1} = \frac{\sin i_2}{C_2}; \quad \frac{\sin i_1}{\sqrt{T_1}} = \frac{\sin i_2}{\sqrt{T_2}};$$

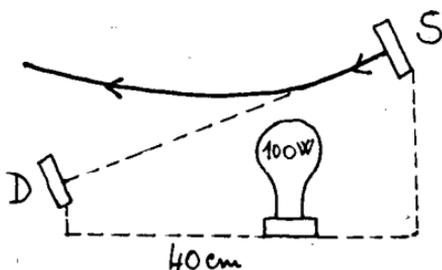
$T_2 > T_1$ entraîne $i_2 > i_1$. Le rayon s'écarte davantage de la normale lorsqu'il pénètre dans une région où la température est plus élevée.



Considérons maintenant une atmosphère dans laquelle existe un gradient de température $\frac{dT}{dz} < 0$, z étant l'altitude d'un point

de cette atmosphère. Les rayons sonores s'incurvent ; si la réfraction est importante ils peuvent remonter, tout comme les rayons lumineux dans le phénomène de mirage qui se produit sur les couches d'air chaud près du sol.

Pour mettre en évidence le phénomène de mirage avec les rayons sonores, on prend une ampoule électrique que l'on place à quelques centimètres de la droite DS passant par les transducteurs d'ultra-sons ; l'ampoule étant éteinte, le détecteur capte une intensité sonore qui est encore importante étant donné que le rayonnement de la source est assez directif. On allume l'am-

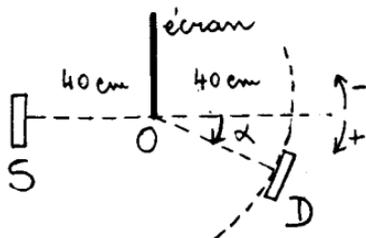


poule ; lorsque l'air est suffisamment chaud, au bout de 1 ou 2 minutes, on observe une diminution très nette de l'intensité ultra-sonore détectée. En soulevant un peu le détecteur, on constate une augmentation de l'intensité ultra-sonore.

Pour que l'air soit porté à une température suffisamment élevée au bout d'un temps assez court, la puissance de la lampe doit être de 100 W au minimum.

5. Diffraction par le bord d'un écran.

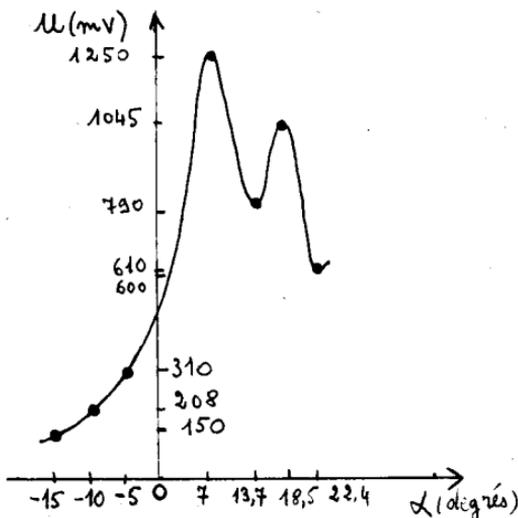
Le détecteur est déplacé à une distance constante (40 cm) du bord de l'écran.



La tension aux bornes du détecteur, après amplification, est, en fonction de l'angle α :

α degrés	-15	-10	-5	0	7	13,7	18,5	22,4
u (mV)	150	208	310	600	1 250 max.	790 min.	1 045 max.	610 min.

Pour $\alpha > 22,4^\circ$, les franges sont de moins en moins contrastées. L'allure de la courbe qui représente les variations de l'amplitude de l'onde diffractée est :

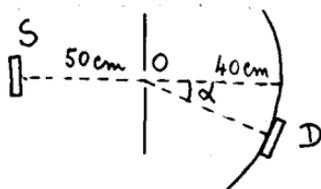


Lorsque l'écran est enlevé, l'amplitude de l'onde aux points qui étaient des maximums ou des minimums dans l'expérience précédente devient :

α°	0	7	13,7	18,5
u (mV)	1 100	1 090	895	826

Ces résultats mettent en évidence l'influence de l'écran sur la répartition de l'énergie, même dans la zone de « lumière » géométrique.

6. Diffraction par une fente.



l : largeur de la fente.

On recherche la position des maximums et des minimums d'amplitude.

a) $L = 40 \text{ mm} \approx 4,8 \lambda$.

α (degrés)	0	11	14,3	20	25	28,1	30
u (mV)	600	88 min.	130 max.	60	45 min.	128 max.	100

La formule qui donne la position du premier minimum est :

$$\alpha_{(rad)} \approx \frac{\lambda}{l} \approx 0,207; \quad \alpha \approx 11,8^\circ.$$

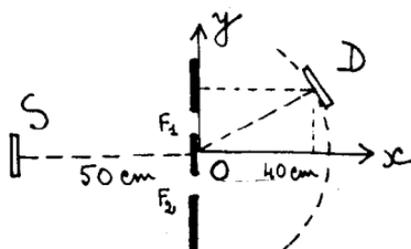
L'expérience a donné $\alpha \approx 11^\circ$; c'est un résultat satisfaisant compte tenu de la difficulté pour repérer à 1° près la position du détecteur.

b) Position du premier minimum lorsqu'on fait varier la largeur de la fente.

l (mm)	40	20	9,8
α (degrés)	11	24	45

Ces résultats montrent que le phénomène de diffraction est d'autant plus important que la largeur de la fente est petite, pour λ donnée.

7. Franges d'Young.

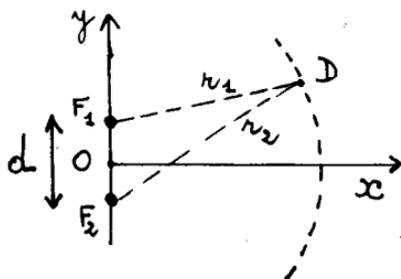


Largeur des fentes : $l = 1$ cm.

Distance entre les axes de symétrie des fentes :

$$d = F_1 F_2 = 3,4 \text{ cm.}$$

Etant donné que la distance SO est beaucoup plus grande que la distance $F_1 F_2$, on peut considérer que les 2 fentes sont pratiquement situées sur la même surface d'onde centrée en S, et par conséquent qu'elles reçoivent des ondes en phase.



La distance OD doit être grande devant $F_1 F_2$; les mesures ont été faites avec $d = 3,4$ cm et $OD = 40$ cm; on peut encore réduire l'écartement des fentes et leur largeur.

La manipulation consiste à vérifier les formules qui définissent les positions des maximums et des minimums de l'amplitude de l'onde obtenue par l'interférence des 2 ondes en phase issues de F_1 et F_2 .

$$r_2 - r_1 = k\lambda; \quad r_2 - r_1 = \left(k + \frac{1}{2} \right) \lambda; \quad k \in \mathbf{Z}$$

Le détecteur est déplacé à distance constante de O; r_1 et r_2 sont calculés à partir de ses coordonnées x et y ;

$$r_1 = \sqrt{x^2 + \left(y - \varepsilon \frac{d}{2}\right)^2} ; \quad r_2 = \sqrt{x^2 + \left(y + \varepsilon \frac{d}{2}\right)^2}$$

$\varepsilon = +1$ pour $y > 0$ et $\varepsilon = -1$ pour $y < 0$.

Voici quelques résultats obtenus pour $y > 0$:

Maximums k	x (cm)	y (cm)	$r_2 - r_1$ (cm)	$\lambda = \frac{r_2 - r_1}{(u\omega) k}$
0	39,9	1,0	0,090	
1	38,9	9,4	0,800	0,800
2	35,3	18,8	1,586	0,798
3	25,5	30,6	1,700	0,850

Les coordonnées du maximum central auraient dû être $x = 40$ cm et $y = 0$; les écarts avec les valeurs expérimentales sont dus aux imperfections de la table.

Minimums k	x (cm)	y (cm)	$r_2 - r_1$ (cm)	$\lambda = \frac{r_2 - r_1}{(u\omega) \left(k + \frac{1}{2}\right)}$
0	39,8	4,8	0,406	0,813
1	38,0	12,7	1,200	0,800
2	31,3	25,0	2,125	0,850
3	21,3	33,9	2,877	0,822

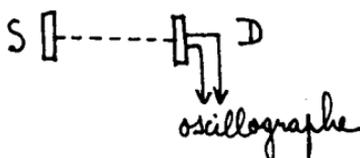
On peut considérer que les résultats obtenus sont pratiquement conformes à ceux que la théorie a permis de prévoir. La valeur moyenne de λ est 8,2 mm ; l'écart maximal entre cette valeur moyenne et les résultats est de 4 % environ.

8. Interférences avec 2 sources ultra-sonores.

Les 2 fentes d'Young sont remplacées par 2 sources ultra-sonores possédant le même écartement que les 2 fentes ; les 2 sources étant en phase, on constate que les minimums et maximums occupent les mêmes positions que dans l'expérience précédente.

Il est possible de réaliser 2 sources ultra-sonores en opposition de phase car les 2 bornes des transducteurs ont été différenciées par le fabricant.

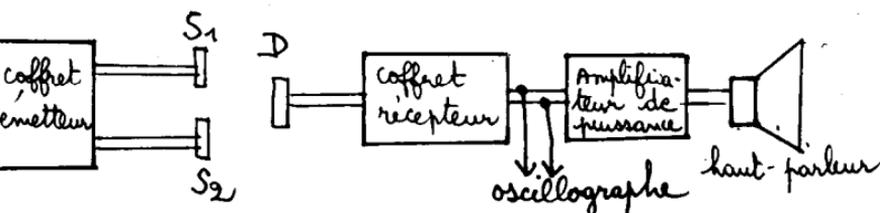
9. Ondes progressives - Ondes stationnaires.



Elles permettent de déterminer λ .

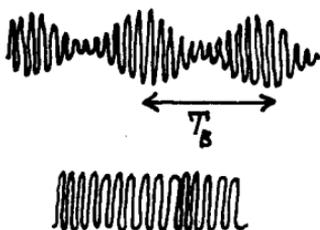
On observe parfois, lors d'une expérience d'onde progressive que l'amplitude de l'onde détectée varie périodiquement dans l'espace comme s'il s'agissait d'une onde stationnaire; l'onde qui se propage entre la source et le détecteur est en réalité une superposition d'onde progressive et d'onde stationnaire. On peut se reporter à l'article paru dans le B.U.P. n° 628, p. 197 : « Mesure de la longueur d'onde d'une onde sonore. Nature générale d'une onde ».

10. Battements.



Les 2 sources S_1 et S_2 émettent des ultra-sons dont les fréquences N_1 et N_2 diffèrent de quelques centaines de hertz.

Le signal issu du détecteur est amplifié puis utilisé à l'alimentation d'un haut-parleur. On constate que le haut-parleur émet un son audible; sur l'écran d'un oscillographe, relié à la sortie du coffret récepteur, se dessine le graphe caractéristique des battements.



On peut montrer que le son émis par le haut-parleur est dû au phénomène de battements; il suffit de placer un écran devant l'une des sources; on voit disparaître la modulation de l'amplitude du signal détecté et on n'entend plus de son.

Vérification de la formule qui donne la fréquence des battements $N_B = |N_2 - N_1|$:

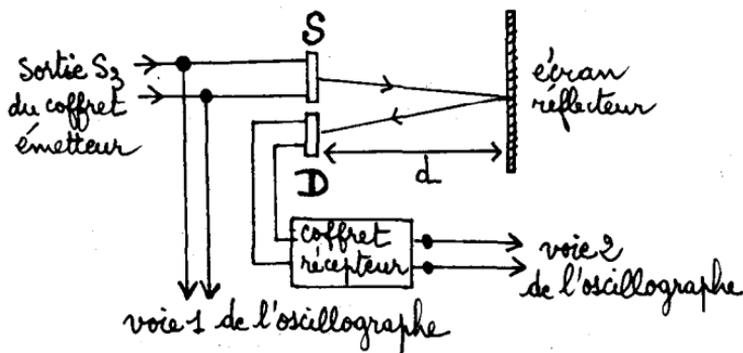
— détermination de T_B sur l'écran de l'oscillographe puis calcul

$$\text{de } N_B = \frac{1}{T_B},$$

— N_1 et N_2 ayant des valeurs très rapprochées (écart relatif de 1 % pour $|N_2 - N_1| = 400$ Hz, doivent être mesurées avec un fréquencesmètre. Un oscillographe ne permet pas de mettre en évidence un écart relatif de fréquences aussi petit ; en effet, avec une base de temps de $5 \mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$, une fréquence de 40 kHz ($T = 25 \mu\text{s}$) correspond à une longueur de 5 cm, et une fréquence de 40,4 kHz à 4,95 cm ; la trace du spot n'est pas suffisamment fine pour que l'on puisse détecter une variation de longueur de 0,5 mm sur l'écran.

La formule $N_B = |N_2 - N_1|$ est vérifiée avec une précision de quelques pour cent.

11. Détermination de la célérité des ultra-sons par la méthode des impulsions.



La source et le détecteur se trouvent dans un même plan, parallèle à celui de l'écran réflecteur situé à une distance d . La distance source-détecteur est très petite devant d ; la distance parcourue par le signal est $2d$ pratiquement.

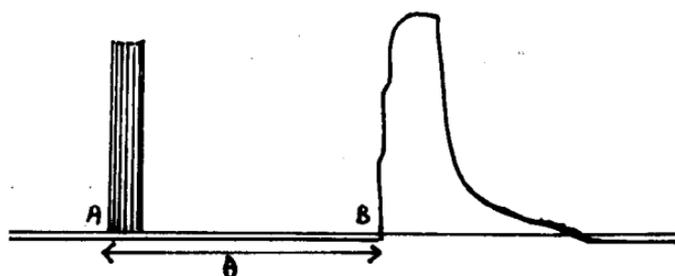
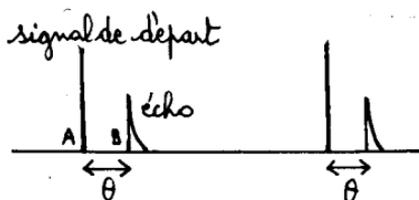
Le temps θ qui s'écoule entre le départ de l'impulsion sonore et le retour de l'écho est mesuré sur l'écran d'un oscillographe.

Célérité des ultra-sons dans l'air :

- $d = 0,800$ m.

Il faut choisir la vitesse de balayage horizontal du spot pour qu'un seul signal de départ et qu'un seul écho apparaissent sur

l'écran. Il suffit de mesurer la longueur du segment AB sur l'écran pour en déduire θ .



- Vitesse de balayage : 1 ms. div⁻¹.
- AB = 4,7 div.

On calcule $\theta = 4,7$ ms.

La célérité du son est : $c = \frac{2d}{\theta}$; $c = \frac{2 \times 0,80}{4,7 \cdot 10^{-3}} = 340$ m. s⁻¹.

AB étant mesuré à 0,1 division près, d étant connu avec une incertitude de quelques millimètres et la vitesse de balayage avec une incertitude relative de quelques %, on obtient la valeur de c avec une précision qui est de l'ordre de 5 %.

Lorsque d varie entre 0,300 m et 1,60 m, on constate que la dispersion des valeurs de la célérité est assez faible : c reste compris entre 335 m. s⁻¹ et 343 m. s⁻¹.

Cette méthode de détermination de la célérité d'un signal donne donc de bons résultats et présente l'avantage d'être rapide et simple.

Remarque.

La durée de l'impulsion étant de 0,25 ms, l'impulsion de départ et l'écho seront séparés sur l'écran de l'oscillographe si la distance parcourue par les ultra-sons est supérieure à :

$$c\theta \approx 340 \times 0,25 \cdot 10^{-3} = 8,5 \cdot 10^{-2} \text{ m.}$$

Dans le domaine des grandes distances, étant donné que les impulsions sont émises tous les $\frac{1}{40}$ s, il n'y aura pas coïncidence entre une impulsion de départ et un écho sur l'écran de l'oscillographe si la distance parcourue par les ultra-sons est inférieure à :

$$340 \times \frac{1}{40} = 8,5 \text{ m.}$$

CONCLUSION.

Ce matériel offre une gamme étendue d'expériences ; sa mise au point est assez facile mais sa construction demande un temps assez long.

La détermination de la célérité d'un signal ultra-sonore, par la méthode des impulsions peut faire l'objet d'une manipulation intéressante pour des élèves de première ou de terminale, au cours d'une séance de travaux pratiques ; le prix de revient du matériel nécessaire à cette manipulation est très inférieur au prix de l'ensemble qui a été décrit ; les oscilloscopes Metrix ou Enertec qui sont attribués gratuitement aux lycées conviennent parfaitement pour cette expérience.

La plupart des expériences réalisées avec l'ensemble émetteur-récepteur montrent que les ondes ultra-sonores ont des propriétés semblables à celles des autres ondes, de nature différente : ondes à la surface d'un liquide, ondes lumineuses, ondes électromagnétiques.
