

ULTRASONS

On prendra soin de reporter dans le compte-rendu :

courbes visualisées, schémas, mesures et leur incertitude estimée, commentaires et interprétations.

Les graphes et régressions linéaires seront effectuées à l'aide d'un tableur, et imprimées en fin de séance.

Objectifs :

- Faire une acquisition numérique de signal correctement échantillonnée et son analyse de Fourier ;
- Mesurer une longueur d'onde acoustique à l'aide d'un support gradué et d'une carte d'acquisition (en remplacement de l'oscilloscope).
- Mesurer la célérité, la longueur d'onde et le déphasage dû à la propagation d'un phénomène ondulatoire.
- Observer et mesurer le phénomène de diffraction des ondes sonores par une fente.
- Observer le phénomène d'interférence entre deux sources synchrones.

Les ultrasons sont des ondes sonores de fréquences inaudibles pour l'oreille humaine (>20 kHz). Comme toutes les ondes sonores, ils se propagent à une vitesse qui est fonction de la nature du milieu. Nos expériences auront lieu dans l'air.

La production des ultrasons est assurée par des émetteurs piézoélectriques alimentés par une source de tension continue 15V. La fréquence de l'émetteur est réglable autour de 40 kHz. Deux modes d'émission sont disponibles : émission **continue**, ou émission **par salves** (salves longues de 6 ms ou courtes de 1 ms espacées d'un silence de 4 ms).

I. Acquisition numérique du signal

La visualisation du signal électrique produit par le récepteur est effectuée à l'aide d'une carte d'acquisition et d'un logiciel associé (Atelier Scientifique GENERIS)¹. Les considérations utiles à la réalisation d'une bonne acquisition et la détermination du spectre sont rappelées en annexe.

• MANIP 1 : Acquisition continue du signal du récepteur

- Placer l'émetteur sur la glissière et l'alimenter. Lui faire émettre des ultrasons en continu.
- Placer un récepteur sur la même glissière, face à l'émetteur, à 10cm environ de ce dernier.
- Relier le récepteur à une voie de la carte d'acquisition de l'ordinateur. À l'aide de GENERIS, démarrer une acquisition continue du signal. Ajuster la fréquence émise par l'émetteur pour obtenir un maximum d'amplitude du signal capté par le récepteur.

• MANIP 2 : Mesure de la fréquence - Influence de la période d'échantillonnage

- Faire une acquisition suffisamment longue pour enregistrer une dizaine de périodes, avec une période d'échantillonnage $T_e = 0,25 \mu\text{s}$.
- Mesurer la période, en déduire la fréquence.
- Le signal semble sinusoïdal. Vérifier cela en traçant le spectre (Transformée de Fourier dans la fenêtre CALCULS).
- Recommencer l'expérience avec $T_e = 2,5 \mu\text{s}$, puis $T_e = 25 \mu\text{s}$. Conclusion ?

1. On peut plus aussi observer ce signal sur un oscilloscope, mais nous aborderons cet appareil un peu plus tard.

II. Longueur d'onde

• MANIP 3 : Signaux en phase

- Placer les deux récepteurs chacun sur une glissière, et les connecter sur la carte. Se placer en émission continue. Démarrer une acquisition continue des deux signaux. Ajuster si besoin la fréquence émise.
- Ajuster la position des récepteurs près du zéro de la règle graduée de telle sorte que les deux signaux soient en phase.

• MANIP 4 : Mesure de la longueur d'onde

- En déplaçant l'un des récepteurs, mesurer la longueur d'onde des ultrasons.
- Comment améliorer la précision relative de cette mesure ?

III. Vitesse de propagation des ultrasons

III.III.1. Lien avec la fréquence et la longueur d'onde

Q1. Comment déduire la célérité des ondes à partir des mesures précédentes ?

Q2. Le résultat est-il cohérent avec la relation théorique pour un gaz parfait :

$$c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}},$$

où γ est le coefficient adiabatique de l'air, M sa masse molaire moyenne, R la constante des gaz parfaits, et T la température en Kelvin.

Données : $\gamma = 1,4$, $M = 29 \text{ g.mol}^{-1}$, $R = 8,314 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$.

III.III.2. Mesure directe

• MANIP 5 : Vitesse d'une salve

- Passer en mode d'émission par salves (courtes ou longues).
- Pour différentes distances d entre les récepteurs, mesurer le temps Δt de propagation entre les deux. Adapter si besoin la période d'échantillonnage.
- Saisir les résultats dans un tableur. Tracer un graphe permettant d'en déduire la vitesse de propagation par régression linéaire. Comparer avec la précédente mesure.

III.III.3. Application au sonar

Les ondes sonores peuvent se réfléchir sur les obstacles², et peuvent ainsi être utilisée pour mesurer des distances ou simplement détecter la présence d'obstacles.

• MANIP 6 : Distance d'un obstacle

- Placer l'émetteur en mode salves face à un mur en incidence normale. Placer le récepteur à côté.
- Acquérir en continu les signaux émis et reçu.
- Mesurer le temps de vol Δt entre le signal émis et le signal reçu. En déduire la distance émetteur-obstacle.

2. Le coefficient de réflexion dépend du matériau. L'onde peut aussi être largement absorbée.

IV. Interférences et diffraction

Les ondes sonores émises par l'émetteur ne sont ni des ondes planes ni des ondes sphériques. Dans un plan horizontal, leur intensité dépend donc a priori de la distance à la source et de l'angle θ par rapport à la direction d'émission. Pour étudier les interférences et la diffraction de ces ondes, il nous faut d'abord connaître la répartition spatiale de l'intensité sonore en l'absence de ces phénomènes, c'est-à-dire le diagramme d'émission. La suite des manipulations s'effectue entre autres à l'aide du support circulaire gradué en degrés.

• MANIP 7 : Diffraction par une fente

- Introduire la fente diffractante (de largeur réglable grâce aux lames aimantées), ainsi que la plaque en plexiglass graduée en arrière du support circulaire. Placer le support de l'émetteur en arrière sur cette plaque à une distance fixée (~ 20 cm). **Veiller au bon alignement de l'ensemble tout au long de l'expérience.**
- Former une fente centrée, de largeur $a = 1$ cm. En déplaçant le récepteur sur le grand cercle, mettre en évidence l'existence d'une "tache" centrale de diffraction délimitée par deux points θ_+ et θ_- d'amplitude nulle (a priori symétriques par rapport à 0). Mesurer l'écart $\Delta\theta = \theta_+ - \theta_-$.
- Répéter cette mesure pour des largeurs de fente a de plus en plus grandes (incrémenter de 2 mm chaque fois). Saisir les mesures dans un tableur.
- Tracer une courbe permettant de vérifier si la loi de la diffraction à l'infini est bien vérifiée.

• MANIP 8 : Diagramme de rayonnement

- Placer l'émetteur au centre des cercles, et le récepteur sur le cercle de plus grand rayon. Démarrer une acquisition continue.
- Déplacer le récepteur de façon à balayer toutes les valeurs de l'angle θ pour constater l'évolution de l'amplitude U de la tension reçue.
- Tracer rapidement, à l'aide d'un tableur, le diagramme de rayonnement sous la forme d'une courbe $U = f(\theta)$. On choisira des valeurs de θ suffisamment espacées pour aller vite ($5^\circ \dots ?$).

• MANIP 9 : Interférences entre deux sources "ponctuelles"

- Brancher le satellite de l'émetteur à la sortie BNC arrière de ce dernier, qui sera replacé au centre du support circulaire. Vérifier que ce second émetteur fonctionne et comparer l'amplitude de ses ondes à celle du premier (à distance égale !!). Régler le potentiomètre de gain de sorte que les deux amplitudes soient égales.
- En déplaçant le récepteur sur le grand cercle, constater la présence de zones d'interférence constructives et destructives.
- Saisir dans le tableur les points d'amplitude maximale et minimale. Tracer la courbe $U = f_{\text{int}}(\theta)$ associée, qu'on pourra superposer au diagramme d'émission.

ANNEXE - Acquisition numérique d'un signal

Principe de la Conversion Analogique-Numérique

La carte d'acquisition permet de transformer le signal *analogique* en un signal *numérique*. Cette CAN consiste en deux étapes : l'*échantillonnage*³ puis la *quantification*⁴.

Lors de l'acquisition, il faut régler la période d'échantillonnage T_e de sorte à reproduire aussi fidèlement que possible les signaux reçus. Concrètement, plus il y a d'échantillons pour une durée donnée plus le signal est bien reproduit. En théorie, pour percevoir la période d'un signal sinusoïdal de période T , il faut **au minimum deux échantillons par période**, ce qui se traduit par

$$T_e < T/2 \quad \text{ou} \quad f_e > 2f.$$

Ainsi, pour un signal dont le spectre comporte plusieurs fréquences, l'acquisition ne peut reproduire correctement que les fréquences inférieures à f_{\max} vérifiant le *critère de Shannon* :

$$f_{\max} = f_e/2$$

Si le spectre du signal analogique comporte des fréquences supérieures à $f_e/2$, alors le spectre du signal numérisé sera artificiellement enrichi par des composantes spectrales supplémentaires (en général des basse-fréquences), qui modifient profondément la forme du signal.

La période d'échantillonnage T_e est déterminée par deux paramètres de l'acquisition : (i) la durée de l'acquisition Δt et (ii) le nombre de points N utilisé pour cette acquisition. On a donc $T_e = \Delta t/N$.

Transformée de Fourier discrète

Le spectre du signal est obtenu en calculant la Transformée de Fourier (TF) du signal⁵. Le signal étant numérique, on parle de TF *discrète*.

Pour obtenir un spectre convenable, il convient de **maximiser la fréquence d'échantillonnage**, donc le nombre de points pour une durée d'acquisition donnée ($f_e = N/\Delta t$). Mais cela ne suffit pas. Pour mesurer de façon précise les basses fréquences, il est nécessaire d'avoir une **durée d'acquisition suffisamment grande**. Par exemple, pour un signal périodique de période T , on ne peut mesurer cette période⁶ de façon précise que si la durée d'acquisition lui est nettement supérieure. En effet, l'ordinateur ne connaissant le signal que sur une durée Δt , il percevra d'autant mieux sa périodicité si elle apparaît clairement pendant cette durée⁷. En pratique on fait en sorte par exemple d'**acquérir une dizaine de périodes**.

En conclusion, une bonne acquisition résulte d'un **compromis** entre la durée d'acquisition Δt et la fréquence d'échantillonnage $f_e = N/\Delta t$, qui doivent toutes les deux être aussi grandes que possible. Suivant ce que l'on souhaite mesurer, fréquence fondamentale ou harmoniques hautes fréquences, on peut privilégier l'une ou l'autre respectivement.

3. La carte enregistre les valeurs du signal seulement à certains instants t_k régulièrement espacés d'une durée appelée T_e appelée *période d'échantillonnage*. La fréquence d'échantillonnage $f_e = 1/T_e$ est réglable, mais limitée par valeur supérieure, la carte étant forcément limitée en rapidité d'exécution.

4. La valeur de la tension $u(t_k)$ est approximée par une valeur u_n parmi N valeurs possibles, dans un système de codage à p bits. Le nombre N dépend de la résolution de la carte (p bits) : $N = 2^p$.

5. Avec le logiciel ATELIER SCIENTIFIQUE (GENERIS), la TF est obtenue via la fenêtre CALCULS.

6. c'est-à-dire mesurer la fréquence du mode fondamental...

7. Pour être précis, l'ensemble des valeurs de fréquence produit par la TF discrète est lui aussi discret. Ceci provient du fait que l'ordinateur considère le signal périodique de période la durée d'échantillonnage. Les fréquences f_k permises sont des multiples entiers de la fréquence minimale $f_{\min} = 1/\Delta t$ (donc vérifiant $f_k = k f_{\min}$). Ainsi, plus f_{\min} est petite, plus la détermination des fréquences est précise.