

Préparation à l'agrégation de Sciences-Physiques ENS Physique

Physique pour les chimistes - Ondes mécaniques

Rappels théoriques :

- L'équation d'onde la plus simple, à une dimension, est l'équation aux dérivées partielles suivante,

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} = 0,$$

où $f(x, t)$ est la fonction de la position x et du temps t qui décrit la grandeur physique considérée. Généralement ce type d'équation provient de l'existence de "forces de rappel" dans un milieu, qui tendent à s'opposer à l'apparition d'une perturbation par rapport à l'équilibre.

- Les solutions de cette équation sont de la forme

$$f(x, t) = f_+(x - ct) + f_-(x + ct),$$

avec f_+ et f_- deux fonctions arbitraires, déterminées par les conditions initiales et aux bords. f_+ décrit la propagation d'une onde dans le sens des x croissants, f_- celle dans le sens opposé. On voit sur cette forme que c est la célérité dans le milieu, c'est-à-dire la vitesse de propagation des ondes en son sein.

- Quand on étudie des ondes monochromatiques de pulsation ω , il est plus commode de passer en notations complexes. On trouve alors comme solution de l'équation d'onde $e^{i(kx - \omega t)}$, avec le vecteur d'onde k qui vaut $\pm\omega/c$ (le signe dépend du sens de propagation). La longueur d'onde λ , période spatiale du mouvement, est $2\pi/k$.
- On appelle relation de dispersion la relation entre la pulsation ω et le vecteur d'onde k . Dans le cas simple explicité ci-dessus, cette relation est linéaire $\omega = ck$, avec une célérité c indépendante de la pulsation : on parle alors de milieu non dispersif. En général la relation $\omega(k)$ est non-linéaire et on parle de milieu dispersif ; on définit alors la vitesse de phase $\omega(k)/k$ et la vitesse de groupe $d\omega/dk$. Comme son nom l'indique, la vitesse de phase caractérise la vitesse apparente d'un nœud d'amplitude de f . La vitesse de groupe caractérise la vitesse du centre d'un paquet d'ondes de taille finie et de fréquence centrale ω , cette quantité représente la vitesse du transport de l'énergie.

I) Ondes mécaniques

1) Mise en évidence

Poser un ressort à boudin horizontalement sur une table.

Expérience de mise en évidence : En resserrant puis en relâchant quelques spires à une extrémité, générer une perturbation et en observer la propagation.

On peut également utiliser une corde élastique attachée à un point fixe, en formant initialement une épingle à cheveux à son extrémité libre.

2) Corde de Melde

La corde de Melde (figure 1) consiste en une corde, tendue à l'horizontale à l'aide d'une poulie et d'un contrepoids de masse m , et animée d'un mouvement à son extrémité libre grâce à d'un vibreur.

Ce dispositif, abordé dans de nombreux ouvrages de terminale S, permet d'engendrer des ondes transversales le long de la corde. Dans la configuration présentée sur la figure 1, la tension de la corde de masse linéique μ est $T_0 = mg$. La célérité des ondes de cisaillement vaut alors $\sqrt{T_0/\mu}$. Noter que la faible impédance d'entrée du vibreur nécessite l'utilisation d'un amplificateur en aval du générateur basse fréquence.

Expériences qualitatives :

- Modifier la fréquence d'excitation à amplitude de forçage constante et repérer les valeurs pour lesquelles l'amplitude des oscillations de la corde est marquée. A quelles longueurs d'onde ces fréquences correspondent-elles ? Utiliser un éclairage stroboscopique pour figer le mouvement.
- Choisir une fréquence excitatrice telle qu'il y ait un nombre pair de demi-longueurs d'onde sur la corde et étudier l'influence du contrepois : que se passe-t-il lorsque sa masse est doublée ou quadruplée ?



FIG. 1 – Corde de Melde

3) Cuve à ondes

Rappels théoriques

La surface libre d'un fluide est le siège de phénomènes ondulatoires. Les forces de rappel à l'origine de la propagation de ces ondes sont la gravité et la tension de surface. La relation de dispersion qui en résulte est

$$\omega^2 = \left(gk + \frac{\gamma k^3}{\rho} \right) \tanh(kh) ,$$

où g est l'accélération de la pesanteur, h la profondeur du récipient, γ la tension de surface et ρ la densité volumique du fluide. Cette relation est donnée dans la notice de la cuve à ondes. Vous pouvez en trouver une démonstration dans *Hydrodynamique physique* de Guyon, Hulin et Petit, ou *Mécanique*, Bruhat, chapitre XXIV.

Notons que

- la vitesse de phase augmente avec la profondeur h , ce qui permet d'expliquer pourquoi les vagues arrivent toujours parallèles aux plages ;
- pour les petites longueurs d'onde le mécanisme de rappel dominant est la tension superficielle, alors que c'est la gravité qui domine quand la longueur d'onde est grande. L'échelle de longueur qui détermine le passage d'un régime à l'autre est la longueur capillaire $\sqrt{\gamma/\rho g}$. Elle est de l'ordre de quelques millimètres pour l'eau ;
- cette propagation est en général dispersive. Le seul régime non-dispersif s'obtient pour des longueurs d'onde grandes devant à la fois la longueur capillaire et la profondeur du récipient, la célérité vaut alors \sqrt{gh} .

Avant de réaliser les manipulations, il faut s'assurer de l'horizontalité de la cuve avec le petit niveau à bulle, pour que la vitesse de propagation soit la plus uniforme possible. Nettoyer éventuellement le matériel à l'alcool avant les expériences. Utiliser de l'eau distillée à laquelle on ajoutera quelques gouttes de Mir pour diminuer la tension superficielle. Différents accessoires à relier à la soufflerie permettent d'exciter des ondes circulaires ou planes. Un stroboscope synchronisé avec la soufflerie permet d'obtenir des images stables (utiliser aussi le réglage fin de synchronisation).

Expériences qualitatives :

- Réaliser une expérience de diffraction des ondes de surface par une fente. Montrer qualitativement l'évolution de l'angle de diffraction avec la longueur d'onde.
- Réaliser une expérience d'interférence à deux fentes et déterminer où se trouvent- les franges brillantes et sombres. (Attention, la réponse n'est pas évidente : demander l'aide d'un(e) encadrant(e).)

La notice et les ouvrages de terminale S contiennent la description de nombreuses expériences, pour mettre notamment en évidence les phénomènes de diffraction, d'interférences et de dispersion. Attention cependant : notre appareil ne permet pas les expériences utilisant des obstacles peu profonds pour mettre en évidence la réfraction.

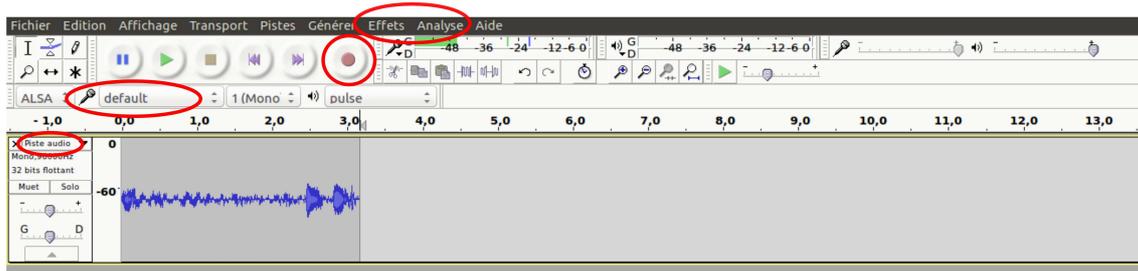
II) Ondes acoustiques

Rappels théoriques

Les fluides (gaz et liquides) peuvent transmettre en leur sein des ondes acoustiques. Celles-ci se matérialisent par des zones de surpression et de dépression par rapport à la pression d'équilibre. La force de rappel correspondante est due à la compressibilité finie du milieu. On peut montrer (voir par exemple les ouvrages des classes préparatoires de PC) que la célérité de ces ondes est $1/\sqrt{\rho\chi}$, où ρ est la densité volumique et χ le coefficient de compressibilité, $\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial P}$. Pour un gaz parfait on peut exprimer la célérité comme $\sqrt{\gamma RT/M}$, avec $\gamma = C_p/C_v$ le rapport des chaleurs spécifiques à pression et volume constant, R la constante des gaz parfaits et M la masse molaire du gaz. Pour l'air à température ambiante, la vitesse du son est d'environ 340 m.s^{-1} . L'oreille humaine est capable de détecter les ondes acoustiques de fréquences comprises entre 20 Hz pour les plus graves, et 20 kHz pour les plus aiguës. On parle d'ultrasons pour les fréquences inaudibles plus élevées et d'infrasons pour les fréquences inaudibles les plus basses.

Une partie des manipulations présentées ici sont réalisables tant avec des fréquences audibles qu'avec des ultrasons. En général ces derniers sont plus pratiques, car ils rendent l'expérience moins sensible au bruit ambiant, ne sont pas pénibles pour l'entourage, et comme leur longueur d'onde est plus faible les effets de la diffraction sont moins importants. La présentation en leçon d'au moins une expérience audible est cependant conseillée pour des raisons pédagogiques. Vous pouvez consulter les ouvrages de Terminale et la notice du dispositif à ultrasons pour trouver des idées de manipulation et réfléchir à leur utilisation en leçon.

Dans la gamme sonore 20-20 000 Hz, le logiciel Audacity permet de réaliser un grand nombre d'expériences d'acoustiques. Pour l'utiliser, il faut brancher un microphone à l'ordinateur et le définir comme source (icône micro de l'interface utilisateur). L'enregistrement peut ensuite être réalisé, re-découpé et analysé. Le menu Analyse contient un programme pour faire une transformée de Fourier rapide.



1) Ondes sonores

a) Diapasons

Vous disposez de diapasons de différentes fréquences. Une manipulation possible consiste à mesurer ces fréquences à l'aide d'un microphone muni d'un amplificateur relié à un oscilloscope.

Mise en évidence du phénomène de résonance : Mettre deux diapasons de même fréquence avec les ouvertures de leurs caisses de résonance en vis-à-vis. Les deux diapasons étant initialement immobiles, en exciter un puis l'arrêter au bout de quelques secondes : le deuxième s'est mis à vibrer. Avec deux diapasons de fréquences différentes cette résonance ne se produit pas.

La somme de deux vibrations sinusoïdales de pulsations ω_1 et ω_2 et de même amplitude peut s'écrire comme le produit d'une oscillation à la pulsation moyenne $(\omega_1 + \omega_2)/2$ et d'une enveloppe à la pulsation $|\omega_1 - \omega_2|/2$.

Expérience quantitative : Exciter consécutivement deux diapasons identiques dont l'un est légèrement désaccordé à l'aide d'une masselotte accrochée à l'un des bras. Déterminer leur fréquence de résonance respective à l'aide d'Audacity. Exciter ensuite simultanément les deux diapasons. On entend alors un battement, c'est-à-dire une lente modulation de l'amplitude du son à la pulsation $|\omega_1 - \omega_2|/2$. Le vérifier à l'aide d'Audacity.

Ce phénomène est utilisé pour accorder les instruments musicaux.

b) Haut-parleurs et microphones

Pour faire entendre un son (désagréable) fait d'une seule composante sinusoïdale, vous pouvez brancher un générateur basse fréquence à un haut-parleur par l'intermédiaire d'un amplificateur (pour adapter les impédances). On peut comparer à l'oscilloscope le signal de sortie du GBF avec la tension aux bornes d'un microphone (par l'intermédiaire d'un amplificateur), et distinguer la notion de hauteur (fréquence) et de volume (amplitude) d'un son.

Expérience quantitative : Mesurer la longueur d'onde λ d'une onde sonore monofréquence en déplaçant le microphone par rapport au haut-parleur. Pour cela, mesurer le déphasage entre la source et le récepteur à l'oscilloscope (cette manipulation est plus pratique avec les ultrasons ; voir plus bas). En déduire la vitesse du son, avec $c = \lambda v$. Déterminer la précision et les incertitudes de votre mesure. S'agit-il d'une mesure de la vitesse de phase ou de la vitesse de groupe ?

Etant donnés les petits signaux en jeu, il est recommandé de synchroniser l'oscilloscope sur le GBF et éventuellement d'utiliser le mode "moyennage" de l'oscilloscope.

c) Mesure directe de la vitesse du son

Une autre méthode de mesure de la célérité des ondes acoustiques consiste à déterminer, à l'aide d'un oscilloscope à mémoire, le temps de propagation du son entre deux microphones séparés par une

distance connue.

Expérience quantitative : Relier chacun des deux microphones à une voie de l'oscilloscope, et produire un son de fort volume pour se détacher du bruit ambiant (par exemple en tapant dans ses mains). Déterminer la célérité des ondes sonores ainsi que l'incertitude attachée à la mesure. S'agit-il d'une mesure de vitesse de phase ou de vitesse de groupe ?

2) Mesures acoustiques

Expérience qualitative :

- Démontrer la réflexion d'ultrasons sur une plaque métallique.
- Réaliser un montage pour mesurer la transmission du son par un mouchoir en papier à l'aide d'un dBmètre. On réalisera des mesures dans les fréquences aiguës pour lesquelles les matériaux absorbants atténuent efficacement le son.
- Trouver une méthode pour mesurer le T_R^{60} de la salle et réaliser la mesure.

Les mesures de caractérisation acoustique sont habituellement réalisées dans un environnement contrôlé, l'utilisation du tube de Kundt permet au mieux d'obtenir des résultats semi-quantitatifs pour les fréquences élevées.

3) Ultrasons

On utilise comme émetteur et récepteur d'ultrasons des transducteurs piezoélectriques, qui possèdent une fréquence de résonance proche de 40kHz. Certains d'entre eux sont montés simplement sur une tige à fixer avec un pied d'optique. D'autres font partie d'une maquette d'un constructeur et sont montés sur des supports en plastique. Ils peuvent être alimentés directement avec un GBF, ou à l'aide des boîtiers d'alimentation de la maquette.

Quand on utilise un GBF il faut régler précisément sa fréquence pour être proche de la résonance du piezoélectrique. Pour cela on placera en face un récepteur relié à un oscilloscope, et on maximisera l'amplitude du signal reçu.

La manipulation la plus simple consiste à mesurer la longueur d'onde en modifiant la distance entre l'émetteur et le récepteur et en suivant le déphasage à l'oscilloscope. La maquette du constructeur comporte un support gradué sur lequel on peut faire coulisser les éléments émetteurs/récepteurs sans perdre l'alignement.

En utilisant des salves d'émission de courte durée on peut aussi mesurer directement la vitesse du son en déterminant à l'oscilloscope le temps mis par la salve pour arriver au récepteur. En plaçant côte à côte le générateur et le récepteur, et en utilisant la réflexion de l'onde ultrasonore sur un obstacle on peut illustrer le principe de fonctionnement d'un sonar.

La notice contient la description de plusieurs autres expériences, sur la mesure de la différence de la vitesse du son dans l'eau et dans l'air, sur les interférences et sur la diffraction. Pour cette dernière, un des supports de la maquette permet de fixer une fente de quelques millimètres de large, derrière laquelle un récepteur peut être déplacé circulairement de manière à déterminer l'amplitude de l'onde diffractée en fonction de la direction d'observation.

III) Effet Doppler

La mise en évidence de l'effet Doppler est facile à mettre en œuvre si l'on dispose d'une ambulance et d'une route. Elle l'est nettement moins dans une salle de classe. Nous vous proposons 3 expériences pour illustrer vos leçons, de la plus qualitative à la plus quantitative, chacune ayant ses mérites et ses limites.

Leur principe est basé sur l'effet Doppler : lorsque l'émetteur et le récepteur d'une onde ont un mouvement relatif l'un par rapport à l'autre, les fréquences d'émission et de réception sont différentes. Par exemple les sirènes des ambulances semblent avoir des fréquences différentes quand elles s'approchent ou quand elles s'éloignent. Cet effet est aussi utilisé dans certaines méthodes de vélocimétrie, notamment pour mesurer les débits sanguins à l'intérieur du corps humain.

Dans le cas d'un déplacement à la vitesse v dans la direction de propagation d'une onde émise à la pulsation ω et de célérité c , la pulsation observée par le récepteur est $\omega' = \omega \left(1 - \frac{v}{c}\right)$, avec $v > 0$ si la source et le récepteur s'éloignent.

1) Maquette de course automobile

Sur cette maquette de course automobile, la voiture est équipée d'un émetteur sonore. La piste est équipée de 2 micros à électret qui se branchent sur l'entrée micro d'un ordinateur (attention à la configuration).

Expérience qualitative :

- Enregistrer le son émis par la voiture en mouvement à l'aide de deux microphones : l'un en milieu de piste et l'autre en bout de piste. Utiliser l'analyse spectrale avec le logiciel Audacity pour illustrer le changement de fréquence lié à l'effet Doppler. La vitesse de la voiture peut être déduite du délai entre les maxima d'intensité sonore perçus aux deux microphones. (Vous pouvez aussi utiliser l'onglet "Piste audio" de l'interface qui permet de représenter le spectrogramme du signal à la place de la forme d'onde.)
- Les expériences réalisées sont limitées à la taille de votre bureau. Trouver la loi d'échelle de la précision relative d'une expérience Doppler en fonction de la vitesse et de la fréquence sonore de l'émetteur. L'utiliser pour discuter la pertinence de la maquette de course automobile.

2) Émetteur monté sur rail

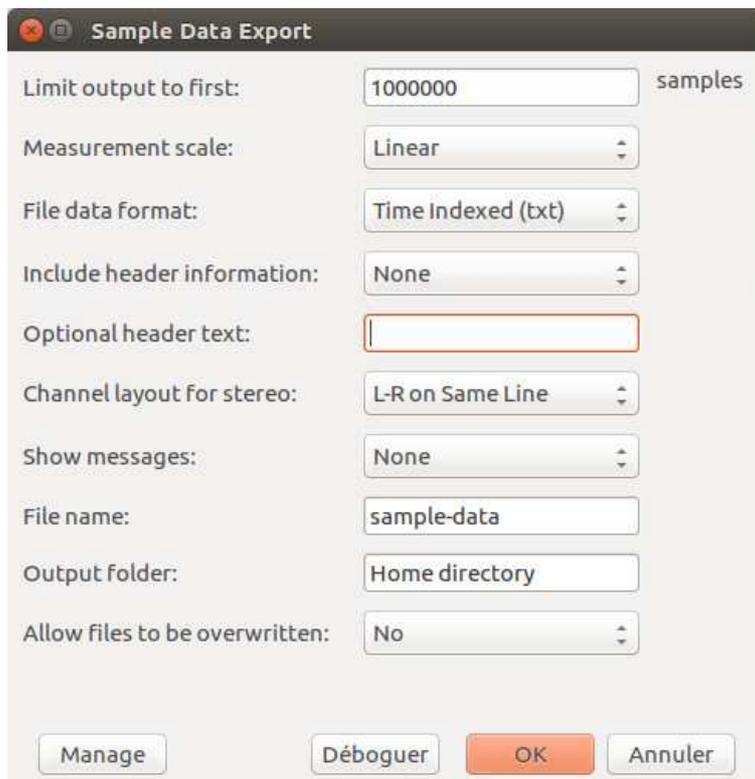
On réalise cette expérience à l'aide d'un banc à défilement, formé d'un chariot roulant sur des rails à une vitesse bien définie. La valeur de la vitesse est écrite sur le chariot, deux valeurs différentes sont possibles selon l'engrenage utilisé.

Expérience quantitative :

- Placer un haut-parleur fixe en face du chariot et un récepteur sur le chariot. Enregistrer le signal perçu dans les conditions d'arrêt et de défilement du chariot sous Audacity à l'aide d'un microphone à électret (par exemple celui de la maquette de course automobile). Choisir une fréquence d'émission de 18kHz : peu audible, mais dans la bande sonore pour permettre l'acquisition par la carte son de l'ordinateur. Utiliser un GBF GX320 dont la stabilité fréquentielle est meilleure, sinon vous aurez des soucis sur l'analyse. Réaliser un enregistrement unique avec Audacity. L'échantillonnage doit être de 44100Hz qui est le réglage par défaut. Faites un enregistrement de 24s. (l'incertitude relative sur le décalage Doppler sera alors de 10% en FFT). Exportez le fichier son Analyse/Sample Data Export. Ouvrir qtiplot et glisser/déposer le fichier son exporté

sur la fenêtre active. Choisir une importation en utilisant un séparateur TAB. Dans qtiplot, vous pouvez réaliser une FFT avec Menu Analyse/FFT (en principe elle prend moins de temps si vous avez 2^n échantillons, le mieux est donc de tronquer vos données à $2^{20} = 1048576$ points). Le calcul prend une quinzaine de secondes.

- Pour améliorer la précision de l'analyse (supérieur seulement), vous pouvez réaliser une détection synchrone numérique avec qtiplot. Pour cela, créer une nouvelle colonne contenant le produit des canaux droite et gauche et représenter le produit des deux canaux dans un graphe. Faites une opération de filtrage passe-bas : Analyse/Lisser/Filtre passe-bas. Repérer la période du battement du signal obtenu, elle permet de remonter facilement et précisément au décalage Doppler.

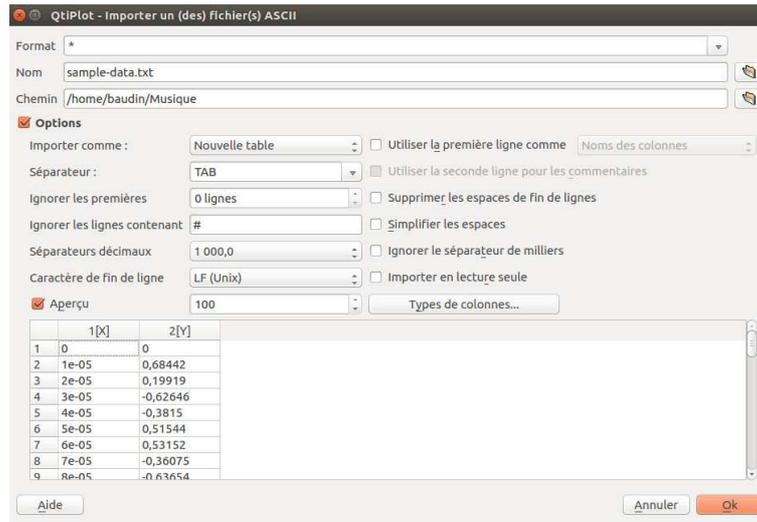


Cette expérience plus quantitative a le désavantage de ne pas être directement perceptible par les élèves, mais permet une détermination bien plus précise de l'effet Doppler.

IV) Principe de fonctionnement d'un sismographe

Un sismographe est un instrument qui mesure les déplacements du sol. Ceux-ci peuvent être causés par un tremblement de terre, une éruption volcanique, ou encore l'utilisation d'explosifs. Cette expérience illustre le principe de fonctionnement de cet appareil. Elle pourra être utilisée dans la leçon LP2 "Ondes dans la matière".

Le sismographe de démonstration est constitué d'une capsule piézoélectrique à laquelle on suspend une masse. Cette capsule est fixée à une potence. On contrôle l'intensité de la source percussive en utilisant une autre masse dont la hauteur de chute est contrôlée (par exemple une bille métallique tenue par un électroaimant).



Expérience quantitative :

- Mesurer l’amplitude du signal piézoélectrique en fonction de l’intensité de la source percussive placée à proximité du sismographe. Sur quelle plage la réponse du sismographe est-elle linéaire ?
- Mesurer l’amplitude de la réponse en fonction de la distance de la source, à intensité percussive fixée (préférer une utilisation du sismographe au sol pour obtenir une réponse interprétable simplement).
- Montrer quelle est l’influence de la masse.