



PSL



SORBONNE  
UNIVERSITÉ

université  
PARIS-SACLAY

*Centre interuniversitaire de préparation à l'agrégation de Montrouge*

---

# PHYSIQUE POUR LES CHIMISTES - ONDES

---

2022-2023

**Bibliographie :**

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Rappels généraux sur les ondes</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Ondes mécaniques</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Corde de Melde</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>Cuve à ondes</b>	<b>5</b>
<b>5</b>	<b>Ondes acoustiques</b>	<b>6</b>
<b>6</b>	<b>Généralités</b>	<b>6</b>
<b>7</b>	<b>Ondes sonores</b>	<b>6</b>
<b>8</b>	<b>Ultrasons</b>	<b>8</b>
<b>9</b>	<b>Mesures acoustiques</b>	<b>8</b>
<b>10</b>	<b>Effet Doppler</b>	<b>9</b>
10.1	a) Maquette de course automobile . . . . .	9
10.2	b) Emetteur monté sur rail . . . . .	9
<b>11</b>	<b>Ondes électromagnétiques</b>	<b>10</b>
<b>12</b>	<b>Transmission filaire : le câble coaxial</b>	<b>11</b>
<b>13</b>	<b>Transmission hertzienne : la modulation d'amplitude</b>	<b>11</b>

# 1 Rappels généraux sur les ondes

- Une onde désigne le phénomène de propagation qui naît de la réponse d'un milieu à une perturbation de ses propriétés locales. L'équation qui régit les phénomènes de propagation linéaire (i.e. réponse au premier ordre en la perturbation) est l'équation de d'Alembert. Pour une propagation unidimensionnelle, elle s'écrit :

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

où  $f$  est la grandeur physique qui varie lors de la perturbation du milieu, sa valeur locale instantanée étant fonction de la position  $x$  et du temps  $t$ . Ce type d'équation provient généralement d'une compétition entre un phénomène "perturbateur" qui écarte le milieu de son état d'équilibre en modifiant localement ses grandeurs caractéristiques, et un phénomène "modérateur" qui tend à rétablir l'équilibre en agissant comme une force de rappel. Un bon réflexe à prendre avant toute chose lors de l'étude d'un système oscillant quelconque est donc de déterminer les deux phénomènes physiques en compétition. Dans le cas des ondes mécaniques, c'est l'inertie de la matière écartée de sa position d'équilibre qui s'oppose aux forces de rappel exercées par le milieu.

- Les solutions de l'équation de d'Alembert sont de la forme

$$f(x, t) = f_+(x - ct) + f_-(x + ct) \quad (2)$$

avec  $f_+$  et  $f_-$  deux fonctions arbitraires, déterminées par les conditions initiales et les conditions aux limites.  $f_+$  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. Elle est caractéristique du milieu de propagation, son expression est souvent utile pour déterminer les phénomènes en compétition dont résulte l'oscillation.

- La linéarité de cette équation permettant l'emploi du théorème de superposition, la théorie de Fourier nous permet de réduire l'étude de toutes les solutions aux seules solutions harmoniques sans perte de généralité. Aussi pour des ondes monochromatiques de pulsation  $\omega$ , il est plus commode de passer en notation complexe. La solution précédente devient

$$Ae^{i(\omega t - kx)} + Be^{i(\omega t + kx)} \quad (3)$$

où  $k = \omega/c$  est la norme du vecteur d'onde, et  $\lambda = 2\pi/k$  est la longueur d'onde i.e. la période spatiale de l'oscillation. Les constantes  $A$  et  $B$  dépendent du système oscillant étudié, elles se déduisent des conditions aux limites et des conditions initiales. Au vu de l'expression, il s'agit bien de la somme d'une onde progressive et d'une onde régressive, ce que nous avons déjà en écriture réelle.

- On appelle relation de dispersion d'un milieu la relation entre la pulsation  $\omega$  et le vecteur d'onde  $k$  des ondes qui s'y propagent. Cette relation n'a de sens que dans le cas d'une propagation linéaire, puisqu'il faut pouvoir appliquer la théorie de Fourier pour utiliser des solutions harmoniques. Pour un milieu dans lequel s'applique l'équation de d'Alembert, la relation de dispersion s'écrit

$$\omega = ck \quad (4)$$

La célérité  $c$  est indépendante de la pulsation : toutes les ondes se déplacent à la même vitesse, c'est pourquoi la propagation est dite non dispersive. Dans le cas général,  $\omega$  n'est pas nécessairement proportionnel à  $k$  et on parle alors de milieu dispersif. On définit pour une propagation dispersive la vitesse de phase  $\omega(k)/k$  et la vitesse de groupe  $(d\omega/dk)_{k=k_0}$ . 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  $\omega_0$ , cette quantité représente la vitesse du transport de l'énergie.



## 2 Ondes mécaniques

Une onde mécanique désigne la propagation d'une perturbation qui naît dans un milieu matériel. Le passage de l'onde met localement la matière en mouvement mais s'effectue sans transport macroscopique de matière. Les ondes sismiques sont un exemple bien connu d'onde mécanique. Pour les mettre en évidence de manière visuelle, on pourra réaliser l'expérience suivante :

**Expérience :** Poser un ressort à boudin horizontalement sur une table. En resserrant puis en relâchant quelques spires à une extrémité, générer une perturbation longitudinale et en observer la propagation. Générer de même une perturbation transversale, et relier vos observations aux ondes sismiques de types *P* et *S*. Observer enfin la réflexion de la perturbation dans le cas d'un ressort fixé à l'une de ses extrémités.

Ce paragraphe propose de traiter expérimentalement la propagation d'ondes mécaniques le long d'une corde et à la surface de l'eau.

## 3 Corde de Melde

La corde de Melde consiste en une corde, tendue à l'horizontale à l'aide d'une poulie et d'un contrepoids de masse  $m$ , animée à son extrémité libre d'un mouvement vertical réalisé par un vibreur. Ce dispositif permet d'engendrer des ondes transversales stationnaires le long de la corde. Dans la configuration présentée sur la figure ci-dessous, la tension de la corde de masse linéique  $\mu$  est  $T_0 = mg$ . La célérité des ondes de cisaillement vaut alors

$$c = \sqrt{T_0/\mu} \quad (5)$$

Question : Une fois le mouvement amorcé, quels sont les deux phénomènes en compétition qui perpétuent l'oscillation de la corde ?



FIGURE 1 –

**Expérience qualitative :** Réaliser le montage ci-dessus sachant que la faible impédance d'entrée du vibreur nécessite l'utilisation d'un amplificateur en aval du générateur basse fréquence. Alimenter le vibreur en choisissant une amplitude et une fréquence d'excitation qui vous semble correspondre.

- Modifier la fréquence d'excitation à amplitude de forçage constante et repérer les valeurs pour lesquelles l'amplitude des ventres est maximale. Comment appelle-t-on ces modes d'oscillation ? A quelles longueurs d'onde ces fréquences correspondent-elles ?
- Utiliser un éclairage stroboscopique pour figer le mouvement et vérifier la correspondance entre la fréquence d'excitation et celle du stroboscope.
- 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 contrepoids : que se passe-t-il lorsque sa masse est quadruplée ?

**Expérience quantitative :** Relever la fréquence excitatrice pour différents modes résonants et tracer  $f_n$  en fonction de  $n$ . En déduire une mesure de la célérité  $c$  et la comparer à sa valeur théorique. On veillera à soigneusement prendre en compte les incertitudes sur  $c_{exp}$  comme sur  $c_{theo}$ .

## 4 Cuve à ondes

Lorsqu'elle est déformée localement par une perturbation, la surface libre d'un fluide peut être le siège d'oscillations appelées ondes gravito-capillaires (cercles autour d'un caillou jeté dans l'eau, vagues à la surface de l'océan, etc.). En première approximation, la surface du liquide répond de manière linéaire à la déformation, il existe donc une relation de dispersion qui s'écrit :

$$\omega^2 = \left( gk + \frac{\gamma k^3}{\rho} \right) \tanh(kh), \quad (6)$$

où  $g$  est l'accélération de la pesanteur,  $h$  la hauteur de liquide dans le récipient,  $\gamma$  la tension de surface air/liquide et  $\rho$  la densité volumique du fluide. Cette relation n'est pas exigible et vous sera toujours donnée par la notice de la cuve à ondes. Son établissement suppose un fluide non visqueux et incompressible ainsi qu'un écoulement irrotationnel. Vous pouvez en trouver une démonstration dans *Hydrodynamique physique* de Guyon, Hulin et Petit, ou *Mécanique*, Bruhat, chapitre XXIV.

Questions :

- Quels sont les deux phénomènes en compétition qui font osciller la surface d'un liquide ?
- Lequel d'entre eux domine lorsque  $\lambda$  est supérieure à la longueur caractéristique  $l_c = \sqrt{\gamma/\rho g}$  ? Comment appelle-t-on cette longueur ? La calculer dans le cas de l'eau sachant que  $\gamma \simeq 70 \text{ mN.m}^{-1}$ .
- Au cours de l'expérience, on veillera à se placer dans des conditions telles que  $h > l_c$ . Comment se simplifie alors la relation de dispersion dans les trois cas suivants :

$$(1) \quad \lambda \ll l_c \ll h \quad ? \quad (7)$$

$$(2) \quad l_c \ll \lambda \ll h \quad ? \quad (8)$$

$$(3) \quad l_c \ll h \ll \lambda \quad ? \quad (9)$$

- Lequel de ces trois cas correspond à une propagation non-dispersive ? Comment faire expérimentalement pour être dans ce cas ?
- Calculer la vitesse de phase dans ce cas et expliquer pourquoi les vagues arrivent toujours parallèles aux plages.

Avant de réaliser les manipulations, assurez-vous de l'horizontalité de la cuve à l'aide du niveau à bulle afin que la vitesse de propagation soit la plus uniforme possible. Nettoyer éventuellement le matériel à l'alcool avant les expériences. 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 (on utilisera le réglage fin pour parfaire la synchronisation afin d'immobiliser l'image le mieux possible).

Question : Expliquer le principe du dispositif d'observation des ondes de surface.

### Expériences qualitatives :

- Remplir la cuve d'eau distillée et exciter la surface en ondes planes. 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'interférences en formant deux sources ponctuelles émettant des ondes circulaires. Déterminer où se trouvent les franges brillantes et sombres. Attention, la réponse n'est pas évidente : demander validation auprès 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.



**Expérience quantitative :** Faire le nécessaire afin d'observer une propagation non dispersive (voir questions plus haut) et exciter la surface en ondes planes. Mesurer  $\lambda$  pour différentes fréquences excitatrices. Tracer  $\frac{\omega^2}{k}$  en fonction de  $k$  en veillant à rester dans des conditions de non-dispersion et vérifier la relation de dispersion correspondante. Remonter à  $l_c$  et comparer à sa valeur théorique.

## 5 Ondes acoustiques

## 6 Généralités

- 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 d'écrit

$$c = 1/\sqrt{\rho\chi} \quad (10)$$

où  $\rho$  est la densité volumique et  $\chi$  le coefficient de compressibilité,  $\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial p}$ . Pour un gaz parfait on peut calculer le coefficient de compressibilité et réexprimer la célérité comme

$$c = \sqrt{\gamma RT/M} \quad (11)$$

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  $340 \text{ m.s}^{-1}$ .

- On parle d'ondes sonores pour désigner les ondes acoustiques que l'oreille humaine est capable de détecter, c'est-à-dire des ondes de fréquence comprise entre 20 Hz pour les plus graves, et 20 kHz pour les plus aiguës. On parle en revanche d'ultrasons pour les ondes acoustiques de fréquence inaudible car trop élevée, et d'infrasons pour les fréquences inaudibles car trop 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.

## 7 Ondes sonores

Dans la gamme sonore 20-20 000 Hz, le logiciel Audacity permet de réaliser un grand nombre d'expériences d'acoustiques. Bien qu'il ne soit pas indispensable car toujours remplaçable par un oscilloscope, son utilisation figure parmi les compétences requises au niveau lycée. Pour l'utiliser, brancher un microphone à l'ordinateur et le définir comme source (icône micro de l'interface utilisateur). L'enregistrement peut ensuite être réalisé, redécoupé et analysé. Le menu "Analyse" contient un programme pour faire une transformée de Fourier rapide.

**a) Propagation d'un son harmonique** Un son est dit harmonique dès lors qu'il ne contient qu'une seule fréquence. Les sons harmoniques représentent les "briques" élémentaires dont sont faits tous les autres sons, par combinaisons linéaires. Ils sont dits "purs" bien que souvent désagréables à l'oreille humaine car nous sommes culturellement éduqué.e.s à apprécier les sons riches en fréquences (voix, mélodie, pluie, bruit blanc...).

**Expérience qualitative : hauteur, volume et timbre**



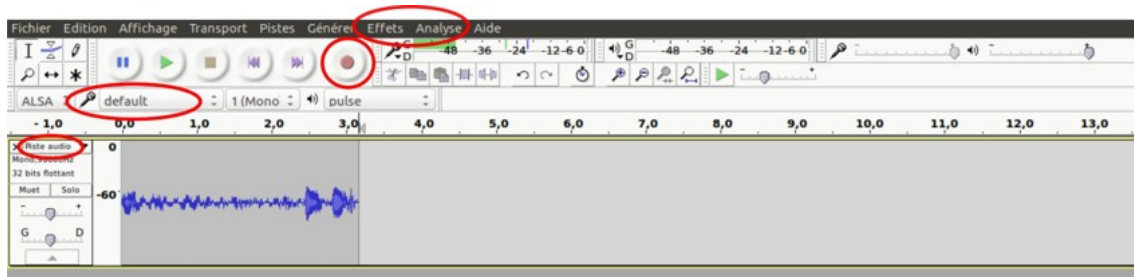


FIGURE 2 –

- Brancher un GBF à un haut-parleur par l'intermédiaire d'un amplificateur (pour adapter les impédances). Ecoutez le son produit par un signal sinusoïdal de fréquence contenue dans la gamme sonore. Placer un microphone à proximité du haut-parleur et observer son signal de sortie à l'oscilloscope (à travers un nouvel amplificateur). Faire varier la fréquence et l'amplitude du signal émis par le GBF. Distinguer les notions de hauteur (fréquence) et de volume (amplitude) d'un son.
- Alimenter le haut-parleur avec un signal non harmonique (créneau, triangle, etc). Quelle différence percevez-vous à l'oreille ?

### Expériences quantitatives : mesures de la vitesse du son

- Placer le microphone à une distance connue du haut-parleur alimenté par un signal harmonique. Mesurer le déphasage temporel  $\Delta t$  entre les signaux émis et reçu à l'oscilloscope. En déduire une mesure de la vitesse du son ainsi que son incertitude. L'erreur sur cette mesure peut être réduite en faisant varier la distance émetteur-récepteur et en déterminant la pente de la droite  $D = f(\Delta t)$ , mais cette manipulation est plus pratique avec les ultrasons (voir plus bas). Etant donnés les petits signaux en jeu, il est recommandé de déclencher l'oscilloscope sur le signal source et éventuellement d'utiliser le mode "moyennage".
- Une autre méthode de mesure de la vitesse du son consiste à déterminer le temps de propagation d'un son bref entre deux microphones séparés par une distance connue. Pour cela, relier chacun des deux microphones à un port de l'ordinateur et produire un son de fort volume qui se détache du bruit ambiant (par exemple en tapant dans ses mains). Déterminer la célérité des ondes sonores à l'aide d'Audacity ainsi que l'incertitude attachée à la mesure.

Pour chacune des deux mesures précédentes, indiquer s'il s'agit d'une mesure de vitesse de phase ou de vitesse de groupe. Sont-elles égales ? Pourquoi ?

### b) Battement de deux diapasons Expériences qualitatives : fréquence propre

- A l'aide d'un oscilloscope et d'un micro muni d'un amplificateur, visualiser le signal émis par un diapason après l'avoir frappé avec un petit marteau. Vérifier la correspondance de la fréquence propre mesurée avec la note que le diapason est supposé produire.
- Observer la variation de la fréquence propre du diapason lorsqu'on place une masselotte sur l'un de ses bras.
- Mettre deux diapasons identiques face à face, 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 mise en résonance ne se produit pas.

### Expérience quantitative : battement

La superposition de deux vibrations sinusoïdales de pulsations proches  $\omega_1$  et  $\omega_2$  de même amplitude peut s'écrire comme le produit d'une onde moyenne  $(\omega_1 + \omega_2)/2$  et d'une enveloppe à la pulsation  $|\omega_1 - \omega_2|/2$ . Il s'agit d'un phénomène d'interférences, que l'on peut mettre en évidence avec les ondes sonores.



Exciter consécutivement deux diapasons identiques que vous aurez légèrement désaccordés en accrochant une masselotte sur l'un d'eux. Déterminer leurs fréquences de résonance respectives. Exciter ensuite simultanément les deux diapasons. Vérifier quantitativement que le battement qui en résulte s'effectue à la pulsation  $|\omega_1 - \omega_2|/2$ . Ce phénomène est utilisé pour accorder les instruments musicaux.

## 8 Ultrasons

On utilise comme émetteur et récepteur d'ultrasons des transducteurs piezoélectriques. Certains d'entre eux sont montés simplement sur une tige à fixer avec un pied d'optique, d'autres font partie d'une maquette 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 qui est d'environ 40kHz. Pour cela on placera en face un récepteur relié à un oscilloscope, et on maximisera l'amplitude du signal reçu en faisant varier la fréquence émise par le GBF autour de 40kHz.

### Expériences qualitatives :

- Mettre en évidence l'intérêt d'un guide d'onde en plaçant un tuyau de PVC sur le trajet émetteur-récepteur.
- La notice des transducteurs contient la description de plusieurs expériences, sur la mesure 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.

### Expériences quantitatives :

- Mesurer le déphasage temporel émetteur-récepteur en faisant varier la distance qui les sépare. Tracer la droite  $D = f(\Delta t)$  et remonter à la célérité du son dans l'air.
- Illustrer le principe de fonctionnement d'un sonar : en plaçant côte à côte l'émetteur et le récepteur, utiliser la réflexion de l'onde ultrasonore sur un obstacle situé à une distance connue, déterminer cette distance et la comparer à sa valeur attendue. Qu'est-ce qui limite la précision de la mesure ?

## 9 Mesures acoustiques

On définit le niveau de pression acoustique (en dB) par  $L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2}$  avec  $p_0 = 20 \mu Pa$  le seuil d'audibilité. Le niveau d'intensité acoustique correspondant (même nombre de dB) est  $L_I = 10 \log \frac{I}{I_0}$  avec  $I_0 = 10^{-12} W/m^2$ . La relation qui lie pression acoustique et intensité acoustique et qui permet de passer de l'une à l'autre des relations ci-dessus est :  $I = \frac{p^2}{\rho_0 c} \simeq \frac{p^2}{400}$  pour l'air.

### Expériences qualitatives :

- Démontrer la réflexion d'ultrasons sur une plaque métallique.
- Mesurer la transmission du son par un mouchoir en papier à l'aide d'un dBmètre. Utiliser des fréquences aiguës pour lesquelles les matériaux absorbants atténuent efficacement le son.

### Expérience semi-quantitative :

- Mesurer le coefficient de réflexion en intensité d'un mur de la salle.
- Mesurer le temps de réverbération  $TR_{60}$  de la salle à l'aide d'un dBmètre. On rappelle que le temps de réverbération d'une salle est défini comme le temps nécessaire après arrêt de la source sonore pour observer une décroissance de 60dB du niveau sonore mesuré dans la salle.





- Comparer le résultat de votre mesure à l'estimation théorique donnée par la loi de Sabine <sup>1</sup>.

## 10 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 la sirène d'une ambulance qui se rapproche semble plus aiguë que lorsqu'elle s'éloigne. La mesure de cette différence de fréquence permet de remonter à la vitesse relative, c'est pourquoi l'effet Doppler est 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 fréquence  $f_e$  et de célérité  $c$  dans le milieu considéré, la fréquence observée par le récepteur est

$$f_r = f_e \left(1 - \frac{v}{c}\right) \quad (12)$$

avec  $v > 0$  si la source et le récepteur s'éloignent.

### 10.1 a) 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 les entrées mini-jack de l'ordinateur.

#### Expérience quantitative

- 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 du 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.
- 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. Qu'est-ce qui limite la précision de la mesure dans le cas de la maquette de course ?

### 10.2 b) Emetteur 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).

1. Loi de Sabine (1898) : en première approximation le temps de réverbération d'une salle s'exprime  $TR_{60} = \frac{kV}{A} = \frac{kV}{\sum \alpha_i S_i}$  avec  $k$  un coefficient de proportionnalité valant 0,163 s/m,  $V$  le volume de la salle,  $A$  l'aire d'absorption équivalente de la salle,  $\alpha_i$  le coefficient d'absorption de la paroi  $i$ ,  $S_i$  la surface de la paroi  $i$ .



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  $2^{20} = 1\,048\,576$  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.

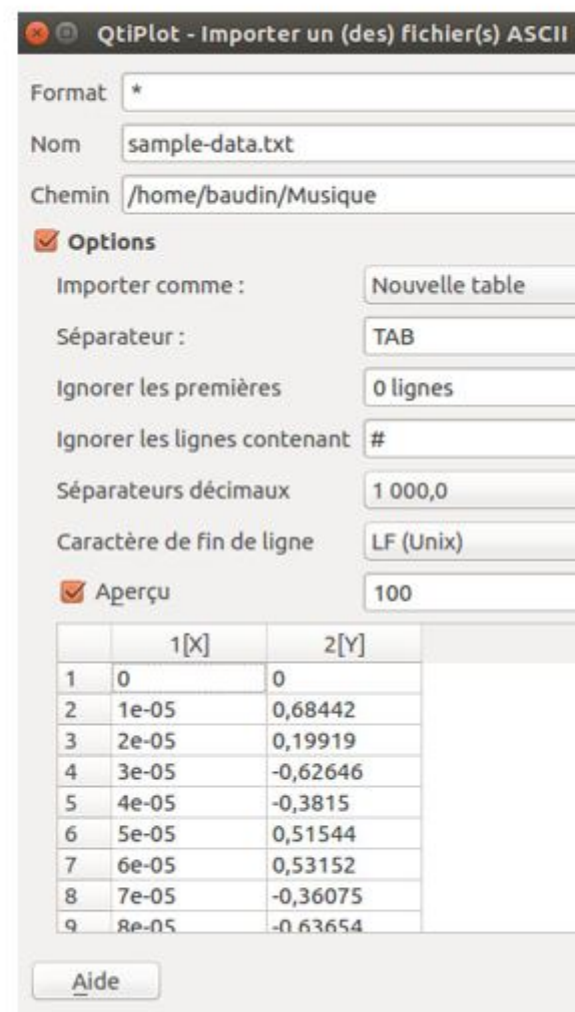
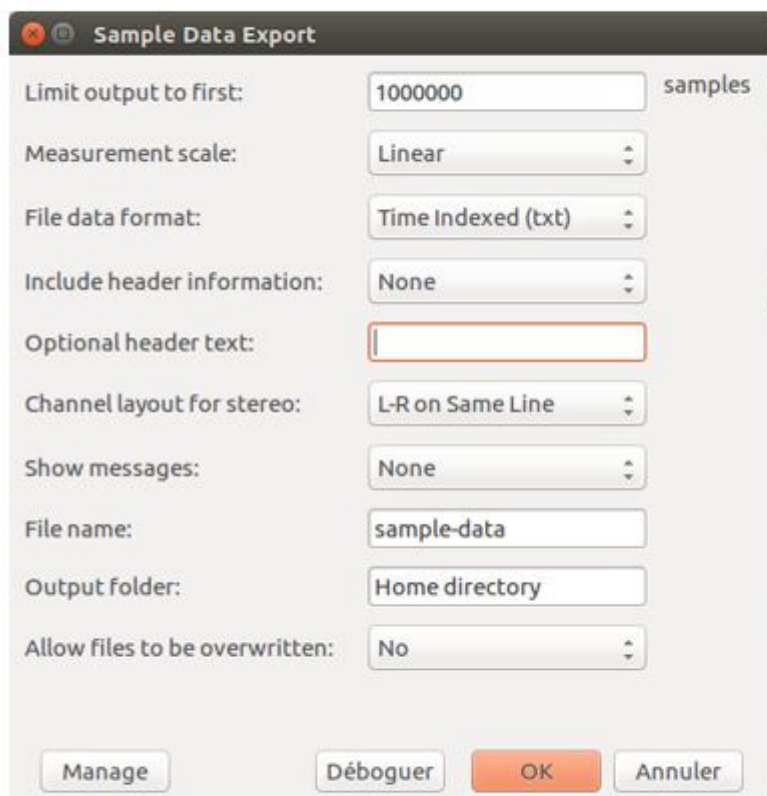


FIGURE 3 –

## 11 Ondes électromagnétiques

Contrairement aux ondes mécaniques, les ondes électromagnétiques ne nécessitent pas la présence d'un milieu matériel pour se propager. Dans le vide, leur propagation n'est pas soumise à l'inertie de la matière et s'effectue à une célérité bien plus élevée que les ondes mécaniques :  $c \simeq 3 \cdot 10^8$  m/s. Elles peuvent également se propager dans les



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited. This license does not permit commercial exploitation or the creation of derivative works without specific permission.

matériaux mais à des célérités légèrement inférieures (bien que toujours très élevées), variables selon les propriétés de dispersion/absorption des milieux. Leur grande vitesse de propagation fait des ondes électromagnétiques un outil de choix pour la transmission d'information, c'est pourquoi elles assurent l'essentiel de nos télécommunications : télévision, téléphonie mobile, wifi, radiodiffusion, etc. Les expériences ci-dessous visent à caractériser les ondes électromagnétiques comme moyens de télécommunication suivant deux canaux différents : la transmission libre ou hertzienne et la transmission filaire.

## 12 Transmission filaire : le câble coaxial

Le câble coaxial est une ligne de transmission constituée d'un conducteur central appelé "âme", séparé d'une tresse conductrice externe par un isolant diélectrique, le tout recouvert d'une gaine isolante en plastique. Robuste et peu sensible aux interférences, il est très utilisé pour la transmission courte distance dans les réseaux domestiques (décodeur, modem, filtre ADSL, etc).

### Expérience quantitative : Mesure de la vitesse de transmission de l'information

- Alimenter l'extrémité d'une bobine de câble coaxial ( $> 100$  m) à l'aide d'un GBF avec un burst sinusoïdal de fréquence 5 MHz. On utilisera un générateur d'impulsions courtes ENSP2691. Observer à l'oscilloscope le signal d'entrée du câble. Régler l'intervalle entre deux bursts ainsi que leur durée propre de manière à distinguer le burst "aller" du burst "retour" après réflexion en bout de câble. Mesurer la durée entre l'impulsion aller et l'impulsion retour, en déduire la vitesse de propagation.
- (Facultatif) Un potentiomètre variable (disponible chez les physiciens) placé en bout de ligne permet d'observer la disparition du signal réfléchi. Déterminer l'impédance du câble.

## 13 Transmission hertzienne : la modulation d'amplitude

La modulation est un procédé qui permet de transmettre un signal basse fréquence à l'aide d'une onde électromagnétique haute fréquence en guise de support. En l'occurrence, la modulation d'amplitude consiste à imprimer l'information BF à transmettre sur l'amplitude d'un signal HF dit "porteur". Soit  $s_0(t) = A + B \cos(\omega_0 t)$  le signal BF à transmettre et  $s_p(t) = \cos(\omega_p t)$  le signal HF porteur (avec  $\omega_0 \ll \omega_p$ ), alors la multiplication de  $s_0(t)$  par  $s_p(t)$  donne un signal modulé en amplitude :

$$s(t) = [A + B \cos(\omega_0 t)] \times \cos(\omega_p t) = A \cos(\omega_p t) + \frac{B}{2} \cos(\omega_p + \omega_0)t + \frac{B}{2} \cos(\omega_p - \omega_0)t \quad (13)$$

Le spectre en fréquence d'un tel signal comprend donc les fréquences  $f_p$ ,  $f_p + f_0$  et  $f_p - f_0$ , mais pas la fréquence  $f_0$ .

La modulation d'amplitude est une opération multiplicative donc non linéaire : elle fait apparaître/disparaître des fréquences dans le spectre.

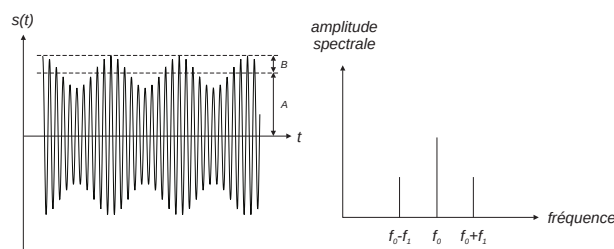


FIGURE 4 – Caractéristiques d'un signal modulé en amplitude

L'amplitude de  $s(t)$  varie entre  $A - B$  et  $A + B$ . On est amené à définir le taux de modulation par  $m = \frac{s_{\max} - s_{\min}}{s_{\max} + s_{\min}} = \frac{B}{A}$ . Le signal  $s(t)$  peut alors se réécrire :

$$s(t) = A \left[ \cos \omega_p t + \frac{m}{2} \cos(\omega_p + \omega_0)t + \frac{m}{2} \cos(\omega_p - \omega_0)t \right]. \quad (14)$$

**Remarque :** Ne pas confondre modulation et addition  $s_{\text{add}}(t) = A \cos(\omega_0 t) + B \cos(\omega_1 t)$ . Dans l'addition, illustrée sur la figure, l'amplitude est constante et le spectre comprend les fréquences  $f_0$  et  $f_1$ .

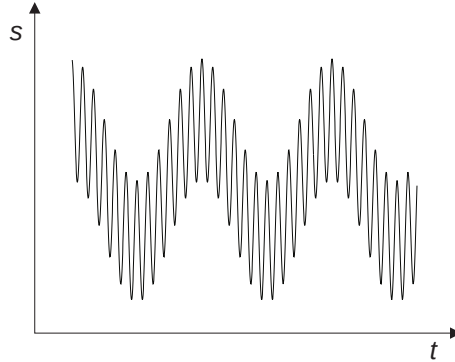


FIGURE 5 – Somme de deux signaux sinusoïdaux

Question : Pourquoi la transmission libre d'un signal BF nécessite un procédé de modulation en pratique ?

**Expérience quantitative :** Produire un signal modulé en amplitude avec deux GBF et un multiplieur analogique, en choisissant une fréquence de modulante dans le domaine audible. Choisir de préférence une fréquence d'émission la plus élevée possible pour la porteuse. Observer le signal modulé à l'oscilloscope et étudier l'influence des différents paramètres. Observer notamment les cas  $m = 0$ ,  $m = 1$  et  $m = \infty$ . Il est possible de rendre cette expérience quantitative, par exemple en traçant  $m$  en fonction de  $B$  pour remonter à  $1/A$ .

**Expérience qualitative :** Moduler l'intensité émise par une diode laser (ENSP 4383, N646) avec le signal de sortie d'un poste radio (via un câble minijack-BNC). Attention, il peut y avoir un faux contact du côté minijack, ne pas enfoncer complètement la fiche. Récupérer la lumière modulée sur une photodiode auto-alimentée par une pile, et brancher sa sortie sur un haut-parleur via un amplificateur de puissance. Amusez-vous à couper le son en bloquant le faisceau lumineux, ou encore à modifier le volume sonore avec un polariseur (en principe la diode modulable émet une lumière polarisée rectilignement).