Les battements en physique

Introduction :

La notion d'ondes est omniprésente tout autour de nous dans notre vie quotidienne : les ondes électromagnétiques reçues par nos smartphones, les micro-ondes permettant de réchauffer nos aliments, Internet et la télévision relayée par satellites, des bulles de savons qui apparaissent colorées, les marées océaniques, les ondes sismiques et tsunami, les ondes gravitationnelles ou encore les ondes de probabilité en mécanique quantique.…

Une onde peut se définir comme résultant de la propagation d'une perturbation, produisant, sur son passage, une variation des propriétés physiques du milieu.

Elle se déplace à une vitesse qui dépend du milieu de propagation. Elle transporte de l'énergie mais sans déplacement de matière.

Des ondes de même nature peuvent se superposer : on dit qu'elles interfèrent.

Par exemple, en optique, deux rayons lumineux peuvent conduire à davantage de lumière ou, au contraire, à plus de lumière du tout !

De même, la superposition de deux sons de hauteurs très proches conduit à la notion de battements acoustiques, bien connus des musiciens puisqu'ils leur permettent d'accorder leurs instruments de musique.

Un guitariste, lorsqu'il met en vibration les cordes de sa guitare, génère de nombreuses ondes progressives. Mais seules certaines d'entre elles seront constructives après réflexions multiples. On obtient finalement un système d'ondes stationnaires générant un son de hauteur bien déterminé.

Nous allons, dans cette vidéo de la collection « La physique animée », présenter quelques exemples de superpositions de phénomènes ondulatoires et expliciter la notion de battements et d'interférences.

Deux autres vidéos de la même collection expliciteront plus particulièrement les interférences sonores et lumineuses.

1. Expériences

Voyons tout d'abord quelques illustrations du phénomène de battements acoustiques.

Prenons deux diapasons, côte à côte, ajustés à la fréquence de 440 Hz. Sur l'un, on a placé une masselotte qui permet de diminuer légèrement la fréquence.

Lorsqu'on fait jouer simultanément ces deux diapasons dont les notes diffèrent légèrement, on entend « un son de battement ». La superposition de ces deux notes produit un son dont l'intensité oscille dans le temps.

Prenons maintenant deux cordes pincées, avec lesquelles nous retrouvons le phénomène de battement, tout en explorant les intervalles correspondant à des rapports de fréquences simples entre les deux notes.

Voici un premier exemple où deux cordes jouent quasiment la même note.

Puis la deuxième corde vient jouer une note proche de l'octave de la première, c'est-à-dire de fréquence double de la première.

Et maintenant avec un intervalle de quinte pour lequel, le rapport de fréquence est de 3/2 avec la première corde

Ces intervalles de quinte et d'octave sont dits « consonants » notamment par le fait que les instruments de musique émettent simultanément un son et ses harmoniques, c'est-à-dire des sons de fréquences doubles, triples, etc.

Maintenant à l'aide de deux jazzoflûtes, nous allons jouer simultanément la même note puis nous augmentons légèrement par 4 fois la hauteur d'un jazzoflûte.

On entend clairement l'accélération des battements lorsque l'écart de fréquence augmente.

Un jazzoflûte joue maintenant à l'octave.

Pour qu'un battement soit perçu par l'oreille il faut que sa fréquence soit inférieure à 20 battements par seconde. Au delà, comme sur la fin de l'extrait, nous percevons deux notes distinctes.

2. Théorie

Considérons donc deux sources sonores A et B, deux diapasons ou deux cordes de guitare, de fréquences proches l'une de l'autre.

Dans la suite, l'air sera considéré comme un milieu non dispersif.

Les amplitudes des deux ondes s'ajoutent :

- lorsque les deux ondes sont en phase, les amplitudes se renforcent et produisent un son de grande amplitude.

- quand les deux ondes sont en opposition de phase (l'une est au maximum quand l'autre est à son minimum), elles se détruisent mutuellement et produisent une onde résultante nulle ou très faible.

Quelle est la fréquence des battements ? Autrement dit, peut-on calculer le temps qui s'écoule entre deux moments successifs où l'amplitude est maximale ?

Soient TA et TB les périodes des deux ondes, avec par exemple TB > TA.

A t = 0, supposons que les deux ondes sont en phase.

Les ondes vont ensuite se décaler.

Elles se retrouveront en phase pour N oscillations de l'onde n°2 et 1 de plus pour l'onde n°1, soit N + 1.

On aura alors, à ce moment :

$$NTB = (N + 1)TA$$

N fois la période de l'onde B égale à N+1 fois la période de l'onde A

Le nombre d'oscillations est ainsi :

$$N = TA / (TB - TA)$$

La période de l'onde A sur la différence des périodes

La durée entre deux battements, égale à N fois la période de l'onde B, vaut, après calculs, l'inverse de la différence des fréquences des deux ondes :

$$\Delta T = NTB = TA\ TB / (TB - TA) = 1 / (1 / TA - 1 / TB) = 1 / (fA - fB)$$

Et correspond ainsi à une fréquence des battements de fA – fB.

Ce que l'on entend sera un son de fréquence moyenne (fA + fB) / 2, dont l'amplitude variera à cette fréquence de battements.

Les deux ondes sonores, s'écrivent analytiquement sous la forme de fonction cosinus, avec ici des amplitudes identiques, notées A :

$$s_A(t) = A\cos 2\pi f_A t \quad et \quad s_B(t) = A\cos 2\pi f_B t$$

Un peu de calcul trigonométrique conduit à exprimer la somme sous la forme d'un produit de deux cosinus :

$$s(t) = 2A\cos\left(2\pi\frac{f_B - f_A}{2}t\right)\cos\left(2\pi\frac{f_A + f_B}{2}t\right)$$

Les deux ondes de fréquences fA et fB se combinent finalement pour donner une onde porteuse de fréquence égale à la moyenne des fréquences (fA + fB) / 2 et d'amplitude modulée, passant par des maxima et s'annulant à la fréquence des battements (fA – fB).

Ce qu'on entend est la note de l'onde porteuse dont l'amplitude varie avec le temps : on retrouve ce que l'on avait pressenti de manière qualitative.

3. Expérience avec des ultra sons :

Pour aller plus loin, utilisons un dispositif expérimental permettant d'avoir des sources d'amplitudes mieux maîtrisées que le pincement d'une guitare ou le coup de marteau sur les diapasons, comme des émetteurs-récepteurs ultrasonores.

Les deux sources sont légèrement décalées en fréquence et sont placées côte à côte.

On observe à l'oscilloscope le signal ultrasonore sur le récepteur. Cette tension représente la légère variation de pression acoustique.

Faisons un zoom temporel : on observe une sinusoïde dont l'amplitude est pratiquement constante sur la période du zoom temporel considérée.

Prenons un peu de recul et considérons maintenant une fenêtre temporelle plus large, égale à la période de l'enveloppe. On voit clairement que l'intensité du son est bien modulée par la hauteur de l'enveloppe.

On choisit d'augmenter l'amplitude d'une des deux sources. On observe encore des battements mais plus de région d'annulation. Pour obtenir annulation, c'est-à-dire du silence, il faut que les deux sources aient la même amplitude.

Maintenant, décalons de quelques millimètres une des deux sources, en choisissant de nouveau deux amplitudes identiques. Le signal reçu par le détecteur garde toujours la même allure.
