CHAPITRE 2 : ONDES MÉCANIQUES PROGRESSIVES PÉRIODIQUES – ONDES SONORES

Pierre-André LABOLLE

Lycée International des Pontonniers

Septembre 2017

I. Ondes mécaniques et périodicité

1. Mouvement périodique

- Un mouvement périodique est un mouvement qui se répète à intervalles de temps égaux.
- La période d'un phénomène périodique est la plus petite durée au bout de laquelle le phénomène se répète identique à lui-même. On la note T et on l'exprime en secondes (s).
- La fréquence d'un phénomène périodique est le nombre de fois que le phénomène se reproduit en l'espace d'une seconde. On la note f et on l'exprime en hertz (Hz).
- La fréquence et la période sont liées par la relation suivante : $\boxed{f = \frac{1}{T}}$

I. Ondes mécaniques et périodicité

2. Ondes progressives périodiques

- Si la source d'une onde a un mouvement périodique, alors chaque point du milieu de propagation a, lui aussi, un mouvement périodique autour de sa position d'équilibre lorsqu'il est atteint par l'onde.
- On dit alors que l'onde générée est périodique (exemples : ondes produites par les instruments de musique, houle, etc)
- Dans le cas particulier où la source a un mouvement périodique sinusoïdal, l'onde générée sera une onde progressive périodique sinusoïdale (exemple : onde produite par un diapason).

I. Ondes mécaniques et périodicité

3. Double périodicité d'une onde sinusoïdale progressive

- Voir document et graphes des temps et des espaces.
- Une onde progressive périodique présente une double périodicité spatiale et temporelle.
- La période T est la plus petite durée au bout de laquelle la perturbation se reproduit, identique à elle-même, **en un point donné**.
- La longueur d'onde λ, exprimée en mètres, est la période spatiale : c'est la distance parcourue par l'onde en une période. C'est aussi la plus petite distance séparant deux points vibrant en phase **à un instant donné**.
- La période T et la longueur d'onde λ sont liées par la relation suivante : $\boxed{\lambda = v \cdot T}$
- Quelques élément d'initiation à l'analyse dimensionnelle...

II. Ondes sonores – Éléments d'acoustique musicale

1. Qu'est-ce qu'un son ?

- Un son consiste en une vibration des molécules d'air (variation locale de pression). Il s'agit d'une onde longitudinale dont la célérité dépend du milieu de propagation.
- Les fréquences des ondes sonores audibles sont comprises entre $20\ \mathrm{Hz}$ et $20\ \mathrm{kHz}$. Pour des fréquences plus petites, on parle d'infrasons ; pour des fréquences plus grandes, d'ultrasons.
- On qualifie de **son pur** une onde sonore sinusoïdale (par exemple, le son émis par un diapason est un son pur).
- On qualifie de **son complexe** une onde sonore périodique mais non sinusoïdale (par exemple, le son émis par les instruments de musique).
- On qualifie de **bruit** une onde sonore ne présentant aucune périodicité et dont la forme est **aléatoire**. Ce n'est pas un son musical.

II. Ondes sonores – Éléments d'acoustique musicale

2. Caractéristiques d'un son

- L'**intensité d'un son** est d'autant plus grande (le son est d'autant plus fort) que l'amplitude de la vibration sonore est grande.
- La **hauteur d'un son** est déterminée par sa fréquence : un son est d'autant plus aigu (respectivement grave) que sa fréquence est élevée (respectivement faible).
- Le **timbre d'un son** est ce qui permet de distinguer deux instruments de musique jouant la même note. Il comporte deux caractéristiques principales : l'enveloppe du son et la composition en harmoniques (ou spectre sonore).

Qualité physiologique du son	Grandeur physique caractéristique associée
Intensité	Amplitude
Hauteur	Fréquence
Timbre	Enveloppe et spectre sonore

II. Ondes sonores – Éléments d'acoustique musicale

3. Analyse harmonique des sons complexes

a. Un résultat mathématique : les séries de Fourier

Une fonction périodique de fréquence f peut être décomposée en une somme d'une infinité de fonctions sinusoïdales de fréquences f, $2f$, $3f$, $4f$, $5f$..., chaque fonction sinusoïdale ayant une amplitude qui lui est propre.

II. Ondes sonores – Éléments d'acoustique musicale

3. Analyse harmonique des sons complexes

b. Interprétation en acoustique

- Un son complexe de fréquence f est une somme de sons purs de fréquences f, $2f$, $3f$, $4f$, $5f$..., chaque son pur qui compose le son complexe ayant une amplitude qui lui est propre.
- Le son pur de plus basse fréquence (f) qui compose un son complexe est appelé **le fondamental**. Un son complexe a toujours même fréquence f que le fondamental.
- Les autres sons purs (de fréquences $2f$, $3f$, $4f$, $5f$...) qui composent le son complexe sont appelés **les harmoniques de rang 2, 3, 4, 5...** ou encore 2^{e}, 3^{e}, 4^{e}, 5^{e}... harmonique.

Récapitulons

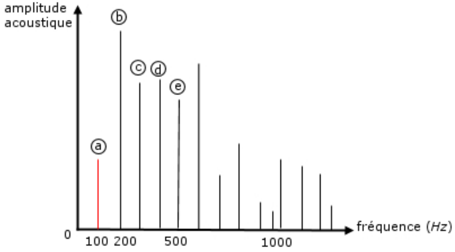
Un son complexe de fréquence f résulte de la superposition du fondamental (son pur de fréquence f) et d'un très grand nombre d'harmoniques (sons purs de fréquences multiples entiers de f).

II. Ondes sonores – Éléments d'acoustique musicale

3. Analyse harmonique des sons complexes

c. Spectre sonore

- Un son complexe peut être représenté par un diagramme en bâtons appelé **spectre sonore**.
- Le fondamental et les harmoniques y sont représentés par des bâtons dont l'abscisse correspond à la fréquence de l'harmonique et dont la longueur est proportionnelle à l'amplitude de l'harmonique.
- Un exemple de spectre sonore :



II. Ondes sonores – Éléments d'acoustique musicale

3. Analyse harmonique des sons complexes

c. Spectre sonore

- Pour un son pur, le spectre ne comporte qu'un seul bâton.
- Un son complexe (son musical) présente un spectre discontinu.
- Un bruit blanc présente un spectre continu (toutes les fréquences sont présentes) mais n'est pas un son.

EXERCICES SUR LES ONDES EN GÉNÉRAL : PP40-49 n°18, 31, 34

EXERCICES SUR LES SONS : PP62-72 n°20, 23, 26, 33

CORRECTION DES EXERCICES

Exercice P63 n°12

a. Il s'agit d'un son complexe car le spectre sonore comporte plusieurs segments qui correspondent aux différents harmoniques composant le son complexe.

b. Un son a toujours la même fréquence que celle de son fondamental, représenté sur le spectre sonore par le segment de plus faible fréquence. Or, sur le spectre, on relève une fréquence de $220\ \mathrm{Hz}$ pour le fondamental donc le son a une fréquence de $220\ \mathrm{Hz}$. D'après le tableau, il s'agit de la note La_2.

CORRECTION DES EXERCICES

Exercice P65 n°16

a. Le son 1 est émis par un diapason. Il s'agit donc d'un son pur et par conséquent, son spectre sonore ne comporte qu'un seul bâton. Le spectre du haut est le seul ne présentant qu'un seul bâton, il correspond donc au son 1.

   Le son 2 correspond à une onde sonore de fréquence 110 Hz d'après le tableau. Le fondamental de ce son doit donc se trouver à une fréquence de 110 Hz puisque le son et son fondamental ont tous deux la même fréquence. Seul le spectre du milieu présente un fondamental (bâton de plus basse fréquence) à 110 Hz. Par conséquent, le son 2 correspond au spectre du milieu.

   En appuyant sur la corde 6 et en réduisant ainsi sa longueur, le musicien produit un son plus aigu (de fréquence plus élevée) que le son produit par la corde 6 à vide. Le son produit a donc une fréquence supérieure à 330 Hz de même que le fondamental (bâton de plus basse fréquence) correspondant à ce son. Cette situation correspond bien au spectre du bas dont le fondamental est situé à une fréquence de 440 Hz et qui présente plusieurs bâtons (son complexe).

CORRECTION DES EXERCICES

Exercice P65 n°16 (suite)

b. Les sons 1 et 3 diffèrent par leur timbre (la composition en harmoniques est différente) alors qu'ils ont la même hauteur (même fréquence du fondamental donc même fréquence donc notes identiques).

   Les sons 2 et 3 diffèrent d'une part par leur hauteur (le son 2 a une fréquence de $110\ \mathrm{Hz}$ tandis que le son 3 qui a une fréquence de $440\ \mathrm{Hz}$) et par leur timbre (la composition en harmoniques est différente comme le montrent les spectres sonores qui comportent des bâtons différents tant par leur amplitude que par leur fréquence). Il s'agit toutefois de deux La mais joués sur des octaves différentes.

c. Le son 2 a une fréquence de $110\ \mathrm{Hz}$ inférieure à celle du son 3 qui a une fréquence de $440\ \mathrm{Hz}$. Le son 2 est donc plus grave que le son 3.

CORRECTION DES EXERCICES

Exercice P66 n°19

a. Si les sons correspondent à la même note (jouée à la même octave, c'est sous-entendu), alors leur **hauteur** est identique. La grandeur physique associée est la **fréquence** de l'onde sonore.

b. Comme les deux sons ont même fréquence, ils ont aussi même période. Seuls les figures a et c présentent une période identique, elles représentent donc ces deux sons.

   La forme de la période de ces deux sons est différente, ces deux sons n'ont donc pas le même **timbre**. En outre, l'amplitude de ces deux sons est différente, ils s'agit donc de sons d'**intensité** différente.

CORRECTION DES EXERCICES

Exercice P66 n°19 (suite)

c. Sur la figure (b), on mesure $7,5\ \mathrm{ms}$ pour deux périodes. Le son correspondant a donc une période de $3,75\ \mathrm{ms}$ soit une fréquence telle que :

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{3,75 \cdot 10^{-3}} = 2,7 \cdot 10^{2}\ \mathrm{Hz} = 270\ \mathrm{Hz}$$

On en déduit que, sur le spectre sonore, le fondamental (qui a même fréquence que le son) serait présent à une fréquence $f = 270\ \mathrm{Hz}$ et les quatre harmoniques suivants à des fréquences telles que :

$f_2 = 2 \cdot f = 540\ \mathrm{Hz}$ – $f_3 = 3 \cdot f = 810\ \mathrm{Hz}$

$f_4 = 4 \cdot f = 1080\ \mathrm{Hz}$ – $f_5 = 5 \cdot f = 1350\ \mathrm{Hz}$

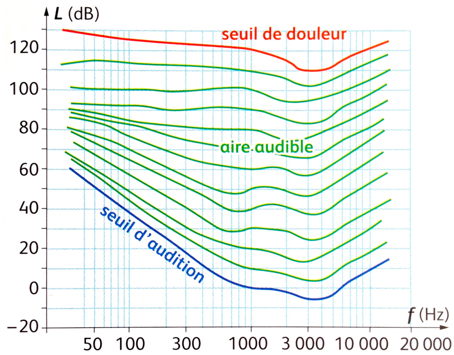
CORRECTION DES EXERCICES

Exercice P66 n°19 (suite)

d. Si le son était de même hauteur, le spectre sonore présenterait des bâtons aux mêmes fréquences que celles calculées précédemment mais dont les amplitudes seraient différentes par rapport au son précédent puisque, en changeant d'instrument, on a changé le timbre du son, lié à la composition en harmoniques.

CORRECTION DES EXERCICES

Exercice P67 n°21



CORRECTION DES EXERCICES

Exercice P67 n°21 (suite)

a. À 1000 Hz, le seuil d'audition correspond à un niveau sonore de 0 dB donc
$L_{min} = 10 \cdot \log\left(\frac{I_{min}}{I_0}\right) = 0$ soit $\frac{I_{min}}{I_0} = 10^0 = 1$

donc $I_{min} = I_0 = 1,0 \cdot 10^{-12}\ \mathrm{W} \cdot \mathrm{m}^{-2}$

À 1000 Hz, le seuil de douleur correspond à un niveau sonore de 120 dB donc
$L_{max} = 10 \cdot \log\left(\frac{I_{max}}{I_0}\right) = 120$ soit $\frac{I_{max}}{I_0} = 10^{120/10} = 10^{12}$

donc $I_{max} = I_0 \cdot 10^{12} = 1,0 \cdot 10^{-12} \times 10^{12} = 1,0\ \mathrm{W} \cdot \mathrm{m}^{-2}$

CORRECTION DES EXERCICES

Exercice P67 n°21 (suite)

b. À 100 Hz, le seuil d'audition correspond à un niveau sonore de 38 dB environ donc un son de niveau sonore égal à 30 dB à une fréquence de 100 Hz n'est pas audible ($L_1 < L_{min}$).

   À 500 Hz, le seuil d'audition correspond à un niveau sonore de 8 dB environ donc un son de niveau sonore égal à 30 dB à une fréquence de 500 Hz est parfaitement audible ($L_2 > L_{min}$).

CORRECTION DES EXERCICES

Exercice P67 n°21 (suite)

c. En imaginant, par interpolation, la courbe d'égale sensation auditive passant par le point de coordonnées $(500\ \text{Hz}; 40\ \text{dB})$, on trouve qu'un son à la fréquence $100\ \mathrm{Hz}$ devra avoir un niveau sonore de $60\ \mathrm{dB}$ environ pour produire la même sensation auditive.

CORRECTION DES EXERCICES

Exercice P67 n°21 (suite)

d. À $500\ \mathrm{Hz}$, le seuil de douleur correspond à un niveau sonore $L_{max} = 122\ \mathrm{dB}$ environ. L'intensité sonore du son produit par une seule machine est telle que : $I_1 = I_0 \cdot 10^{L_1/10}$ où L_1 est le niveau sonore d'une seule machine. Soit n le nombre de machines nécessaires pour atteindre le seuil de douleur et produisant un son d'intensité sonore $I_{max} = n \cdot I_1$ telle que $I_{max} = I_0 \cdot 10^{L_{max}/10}$.

On a alors $n \cdot I_1 = I_{max}$ soit $n \cdot \cancel{I_0} \cdot 10^{L_1/10} = \cancel{I_0} \cdot 10^{L_{max}/10}$ d'où

$$n = \frac{10^{L_{max}/10}}{10^{L_1/10}} = 10^{(L_{max} - L_1)/10} = 10^{(122 - 40)/10} = 1,6 \cdot 10^8 \text{ machines}$$

Il faudrait donc environ 160 millions de ces machines !

CORRECTION DES EXERCICES

Exercice P67 n°21 (suite)

e. Le diagramme de Fletcher montre que, pour des fréquences inférieures à $1000\ \mathrm{Hz}$, l'oreille humaine est plus sensible aux sons aigus qu'aux sons graves puisque, pour un même niveau sonore du son écouté, la sensation auditive augmente avec la fréquence. Par exemple, un son de fréquence $300\ \mathrm{Hz}$ à un niveau sonore de $40\ \mathrm{dB}$ produit une sensation auditive plus faible qu'un son de fréquence $1000\ \mathrm{Hz}$ et de même niveau sonore. Ainsi, en utilisant des sons globalement plus aigus, les publicités peuvent paraître plus sonores alors que le niveau sonore des sons produits par le téléviseur reste globalement identique.