Chapitre 17

Atténuations et effet Doppler

Paragraphe 1 - Atténuations des ondes sonores

Paragraphe 1.1 - Intensité sonore

L'oreille peut percevoir des sons dont l'intensité sonore est supérieure à i majuscule indice zéro (I_0) égale à dix exposant moins douze watt par mètre carré ($I_0 = 10^{-12}\ W.m^{-2}$), appelée **intensité sonore de référence**, correspondant au seuil d'audibilité à une fréquence de l'ordre d'un kilohertz ($1\ kHz$).

Le seuil de douleur est de l'ordre de 1 watt par mètre carré ($1\ W.m^{-2}$).

L'intensité sonore I est liée à la fois à la puissance sonore P majuscule rayonnée par la source, qui se répartit au cours de la propagation sur une surface d'aire S majuscule, et à la distance d minuscule qui sépare le récepteur de la source.

En première approximation, au point M majuscule situé à la distance d minuscule de la source :

$$I = \frac{P}{S} = \frac{P}{4\pi d^2}$$

Unités SI :

P majuscule est en watt noté W majuscule

d minuscule est en mètre noté m minuscule

S majuscule est en en mètre carré noté m minuscule exposant deux (m^2).

I majuscule est en watt par mètre carré noté W majuscule point m minuscule exposant moins deux ($W.m^{-2}$).

Paragraphe 1.2 - Niveau d'intensité sonore

La sensation auditive n'est pas proportionnelle à l'intensité sonore. Lorsque l'intensité sonore double, l'auditeur perçoit bien son augmentation mais il n'a pas la sensation que le son est deux fois plus « fort ». Pour tenir compte de cette particularité de notre perception des informations, une échelle logarithmique est utilisée.

Le **niveau d'intensité sonore** L majuscule (pour level en anglais) en décibels (dB), est lié à l'intensité sonore i majuscule par la relation :

$$L = 10\log(\frac{I}{I_0})$$

Unités SI :

I est en watt par mètre carré noté $W.m^{-2}$.

I_0 majuscule indice zéro, intensité sonore de référence, est égale à :

$I_0 = 1{,}0 \times 10^{-12}\ W.m^{-2}$.

L majuscule est en décibel noté dB.

Point Maths

La fonction qui à x, appartenant à l'intervalle « zéro exclu, + l'infini exclu » ($\mathrm{x} \in]0;+\infty[$) associe le logarithme décimal de x ($\mathrm{x} \longmapsto \log \mathrm{x}$) et sa fonction réciproque qui à x réel associe dix exposant x ($\mathrm{x} \longmapsto 10^{\mathrm{x}}$) sont disponibles sur la calculatrice.

La fonction qui à x associe le logarithme décimal de x ($\mathrm{x} \longmapsto \log \mathrm{x}$) a des propriétés analogues à la fonction qui à x associe le logarithme népérien de x ($\mathrm{x} \longmapsto \ln \mathrm{x}$) :

logarithme décimal de 1 est égal à zéro : $\log 1 = 0$.

logarithme décimal de dix est égal à un : $\log 10 = 1$.

logarithme décimal du produit de a minuscule multiplié par b minuscule est égal à la somme de logarithme décimal de a minuscule + logarithme décimal de b minuscule : : $\log(\mathrm{a} \times \mathrm{b}) = \log \mathrm{a} + \log \mathrm{b}$.

Exemple :

Pour une intensité sonore $\mathrm{I} = 1{,}0 \times 10^{-5}\ \mathrm{W.m^{-2}}$, le niveau d'intensité sonore vaut :

$$\mathrm{L} = 10 \log\left(\frac{\mathrm{I}}{\mathrm{I_0}}\right) = 10\log(\frac{1{,}0 \times 10^{-5}}{1{,}0 \times 10^{-12}})$$

$$\mathrm{L} = 10 \log(1{,}0 \times 10^{7}) = 70\ \mathrm{dB}$$

Réciproquement, un niveau d'intensité sonore L majuscule égal à cinquante décibels ($\mathrm{L} = 50\mathrm{dB}$) correspond à une intensité sonore telle que :

$$\mathrm{L} = 10 \log\left(\frac{\mathrm{I}}{\mathrm{I_0}}\right)$$

Soit

$$\frac{\mathrm{L}}{10} = \log\left(\frac{\mathrm{I}}{\mathrm{I_0}}\right)$$

D’où

$$10^{\frac{\mathrm{L}}{10}} = 10^{\log\left(\frac{\mathrm{I}}{\mathrm{I_0}}\right)} = \frac{\mathrm{I}}{\mathrm{I_0}}$$

Ainsi $\mathrm{I} = \mathrm{I_0} \times 10^{\frac{\mathrm{L}}{10}} = 10^{-12} \times 10^{5,0} = 1,0 \times 10^{-7} \mathrm{W.m^{-2}}$

S’il n’y a pas d’interférences entre les ondes sonores, les intensités sonores s’ajoutent ; ce n’est pas le cas des niveaux d’intensité sonore. Et si l’intensité sonore double, le niveau d’intensité sonore augmente de trois décibels noté trois d minuscule b majuscule (3 dB).

Par exemple : $\mathrm{I'} = 2\mathrm{I} = 2,0 \times 10^{-5}\ \mathrm{W.m^{-2}}$. Ainsi $\mathrm{L'} = 10 \log\ (2,0 \times 10^{7}) = 73\ \mathrm{dB}$.

De même, si l’intensité sonore est divisée par deux, le niveau d’intensité sonore diminue de trois décibels (3 dB).

Paragraphe 1.3 - Différentes atténuations

Au cours de la propagation d’une onde, son amplitude diminue. Il y a atténuation de l’onde.

Dans le cas des ondes sonores, l’atténuation (en décibels : dB) mesure la diminution du niveau d’intensité sonore.

Il existe deux types d’atténuation.

L’atténuation géométrique se manifeste lorsqu’un observateur s’éloigne de la source puisque l’énergie par unité de surface transportée par l’onde diminue.

L’atténuation par absorption est causée par le milieu matériel qui absorbe une partie de l’énergie rayonnée par la source au fur et à mesure de la propagation de l’onde.

Exemple

L’atténuation géométrique d’une onde sonore est égale à six décibels ($6\ \mathrm{dB}$) lorsque la distance entre la source et le récepteur double. L’atténuation par absorption de bouchons d’oreille, utilisés dans les concerts par exemple, peut atteindre trente à quarante décibels (30 à $40\ \mathrm{dB}$).

Paragraphe 2 - Effet Doppler

Paragraphe 2.1 - Description

Le son du klaxon d’un véhicule n’est pas reçu à la même hauteur suivant que le véhicule est immobile, s’approche ou s’éloigne d’un observateur immobile :

– il est plus **aigu** quand le véhicule **s’approche** ;

– il est plus **grave** quand le véhicule **s’éloigne**.

Ce décalage de fréquence se manifeste également avec des ondes électromagnétiques. Ainsi, les raies observées dans le spectre de la lumière provenant des galaxies sont, du fait du mouvement de ces dernières, décalées par rapport à celles d’un spectre réalisé en laboratoire.

L’**effet Doppler** correspond au décalage de la fréquence de l’onde reçue et celle de l’onde émise lorsque la source est en mouvement par rapport à l’observateur dans la direction qui les relie.

Paragraphe 2.2 - Exemples d’expressions de décalage Doppler

Raisonnement à retenir

Une source S majuscule émet des « bips » sonores (ou des « flashs » lumineux) de période T majuscule et se déplace à la vitesse de valeur constante v minuscule indice S majuscule ($\mathrm{v_S}$) vers un observateur A majuscule immobile. On note v minuscule la célérité de l’onde : v minuscule est supérieur à v minuscule indice S majuscule :

$$\mathrm{v} > \mathrm{v_S}$$

En ce qui concerne l’**émission** :

À la date t minuscule égal à zéro ($\mathrm{t} = 0$) : la source émet un premier bip. Elle est à la distance D majuscule de A majuscule.

À la date t minuscule égal à T majuscule ($t = T$): la source émet un deuxième bip. Elle est à la distance d minuscule de A majuscule égale à la distance D majuscule moins le produit de v minuscule indice S majuscule et de T majuscule :

$$d = D - v_S T$$

En ce qui concerne la **réception** :

À la date t minuscule égal à t minuscule indice un ($t = t_1$): le premier bip arrive en A majuscule.

t minuscule indice un est égal à D majuscule divisé par v minuscule :

$$t_1 = \frac{D}{v}$$

À la date t minuscule égal à t minuscule indice deux ($t = t_2$): le deuxième bip arrive en A majuscule.

$$t_2 = T + \frac{d}{v} = T + \frac{(D - v_S T)}{v}$$

L'observateur A majuscule reçoit les bips sonores avec une période T majuscule indice A majuscule (T_A) égale à t minuscule indice deux moins t minuscule indice un :

$$T_A = t_2 - t_1$$

$$T_A = T + \frac{(D - v_S T)}{v} - \frac{D}{v} = T \times (1 - \frac{v_S}{v})$$

Avec f minuscule égale à 1 divisé par T majuscule, la fréquence de l'onde reçue :

$$f_A = \frac{1}{T}$$

$$f_A = \frac{f}{(1 - \frac{v_S}{v})} = \frac{f \times v}{(v - v_S)} \Longrightarrow \Delta f = f_A - f = \frac{f \times v}{(v - v_S)} - f = f \times \frac{v_S}{(v - v_S)}$$

Quand une source S majuscule s'approche d'un observateur A majuscule immobile, l'expression du **décalage Doppler** delta majuscule f minuscule égal à f minuscule indice A majuscule moins f minuscule ($\Delta f = f_A - f$) entre la fréquence f_A de l'onde reçue et la fréquence f minuscule de l'onde émise est :

$$\Delta f = f \times \frac{v_S}{(v - v_S)}$$

Unités SI :

Δf minuscule en hertz (Hz)

v minuscule, célérité de l'onde, en mètre par seconde ($m.s^{-1}$)

v_S , valeur de la vitesse de la source, en mètre par seconde ($m.s^{-1}$)

avec $v_S < v$

Si la source s'éloigne de l'observateur à une vitesse inférieure à la célérité de l'onde, on montre que :

$$\Delta f = -f \times \frac{v_S}{(v + v_S)}$$

Lorsque la valeur de la vitesse de la source est négligeable devant la célérité de l'onde (ondes électromagnétiques par exemple),

$$\mathrm{v} - \mathrm{v_S} \approx \mathrm{v} + \mathrm{v_S} \approx \mathrm{v}$$

Le décalage Doppler se simplifie sous la forme :

$$|\Delta \mathrm{f}| = \mathrm{f} \times \frac{\mathrm{v_S}}{\mathrm{v}}$$

Le décalage Doppler peut également s'exprimer en fonction de la longueur d'onde :

$$|\Delta \lambda| = \lambda \times \frac{\mathrm{v_S}}{\mathrm{v}}$$

Unités SI :

Delta majuscule lambda minuscule ($\Delta\lambda$) et lambda minuscule (λ) en mètre (m)

v minuscule, en mètre par seconde ($\mathrm{m.}\,s^{-1}$)

$\mathrm{v_S}$, en mètre par seconde ($\mathrm{m.\,s^{-1}}$)

avec $\mathrm{v_S}$ négligeable devant v minuscule : $\mathrm{v_S} \ll \mathrm{v}$

Histoire des sciences

Hippolyte Fizeau (1819-1896) montra en 1848 que la vitesse des étoiles était trop faible par rapport à la célérité de la lumière pour provoquer un changement de couleur des étoiles comme le pensait Christian Doppler (1803-1853) en 1842, mais que le décalage des raies spectrales permettait de calculer leur vitesse. En astrophysique, son nom est associé à celui de Doppler.

Paragraphe 2.3 - Applications de l'effet Doppler

L'effet Doppler est caractéristique des ondes. Il se manifeste avec des ondes mécaniques ou électromagnétiques comme la lumière.

En médecine, le doppler sanguin permet de mesurer, à l'aide d'ondes ultrasonores, la valeur de la vitesse du sang pour détecter d'éventuels rétrécissements des veines ou des artères.

Dans la vie courante, les radars routiers utilisent les ondes électromagnétiques pour mesurer la valeur de la vitesse des véhicules.

En astrophysique, l'effet Doppler a permis de découvrir que l'Univers est en expansion. Il est utilisé pour mesurer la vitesse radiale, c'est-à-dire la vitesse dans la direction de visée, des étoiles et détecter des exoplanètes.

En astrophysique, c'est le décalage Doppler en longueur d'onde qui est utilisé.