

# A] Voix

## I. Ondes sonores

### 1) Onde

a) Déf: une onde est un phénomène ondulatoire.

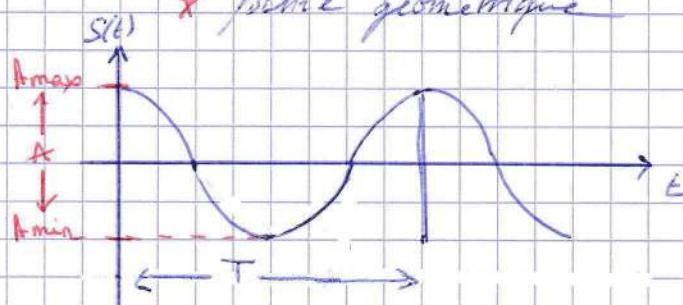
b) Onde harmonique

Onde se répitant identique à elle-même.

### 2) Onde sinusoïdale

a) RPL: Fonction sinusoïdale

\* forme géométrique

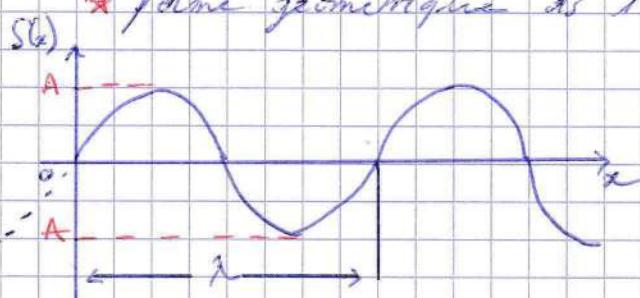


$A_{\text{max}}$ : amplitude maximale  
 $A_{\text{min}}$ : " minimale  
 $A$ : amplitude temporelle  
 $T$ : période temporelle  
 d'un cycle complet -

b) RPL: Onde progressive

Elle dépend du temps et de l'espace -

\* forme géométrique de l'espace



$\lambda$ : amplitude (stationnaire)  
 $\lambda$ : période stationnaire  
 longueur d'onde

c) Relation d'une onde sinusoïdale

\*  $\lambda$ : distance parcourue le temps d'un cycle complet

$$\lambda = c \cdot T \quad c: \text{célérité de l'onde cst.}$$

(\*  $f$ : fréquence, nbr de cycles / s.)

(\*  $\omega$ : pulsation, vitesse angulaire, nbr d'angle parcourus / s.)

$$\lambda = cT = \frac{c}{f} \quad \omega = 2\pi f$$

#### d) forme mathématique

$$s(x, t) = A \sin(\omega t - \phi_x)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad \text{ou} \quad \lambda = \frac{2\pi}{k}$$

$$k = \frac{1}{\lambda}$$

onde progressive

$$s(x, t) = A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} t - \frac{2\pi}{\lambda} x\right)$$

onde temporelle      onde spatiale

+ si onde dégressive

#### 3) Onde Sonore "Sonore Simple"

##### a) Le son

est une sensation auditive

##### b) les spectre de l'audible

$$20\text{Hz} \rightarrow 20\text{kHz}$$

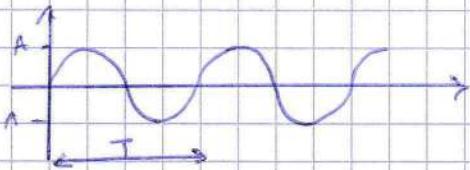
Un son complexe est un son qui comporte plusieurs sinusoides dont la fréquence appartient à la bande de l'audible.

#### c) Onde Sonore Simple "à la Purcell"

##### \* forme mathématique

$$s(x, t) = A \sin\left(\frac{2\pi}{T} t - \frac{2\pi}{\lambda} x\right) \text{ - onde progressive.}$$

##### \* forme temporelle



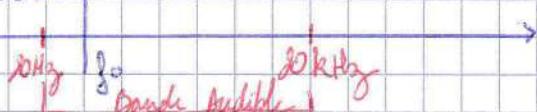
ses caractéristiques :

$A$  : amplitude

$T$  : période "temporelle"

$f = \frac{1}{T}$  : fréquence

##### \* forme fréquentielle : SPECTRE



## II de la Tonie

### 1) Les différents sons

sons aigus  $\rightarrow$  son haut (fréquence élevée)  
 sons grave  $\rightarrow$  son bas (fréquence basse)  
 sons medium  $\rightarrow$  son intermédiaire

### 2) Perception auditive

#### a) sensibilité moyenne

La sensibilité dépend de la fréquence. Elle est maximale pour une bande de 2 kHz à 4 kHz.

#### b) seuil différentiel moyen

Variation de fréquence audible. Il dépend de la fréquence. On établit un seuil différentiel relatif.

$$\text{seuil} = \frac{\Delta f}{f} \quad \Delta f: \text{variation de fréquence audible}$$

C seuil est de 1% pour la bande de 500 Hz à 1000 Hz.

Ex: On entend un sons de 500 Hz différent d'un son de 505 Hz.  
 On entend un sons de 2000 Hz différent d'un son de 2020 Hz.

#### c) le masquage

Les sons d'amplitudes élevées masquent les sons d'amplitudes basses. C'est le phénomène de masquage.

#### d) Gamme musical

\* La gamme musicale est composée de 8 tons

Do Re Mi Fa Sol La Si Do  
 $f_0$   $\leftarrow$  un octave  $\rightarrow 2f_0$

Rmq: L'intervalle entre une fréquence  $f_0$  et son double  $2f_0$  est une octave. L'écart entre  $f_0$  et son décuple ( $10f_0$ ) est une décade.

#### \* La gamme musicale actuelle

So Do# Re Re# Mi FA FA# Sol Sol# La La# Si Do  
 $f_0$   $f_0 \times 2^{\frac{1}{12}}$

Une octave comporte 12 ½ tons.  
 Elle comporte 12 degrés

Rmq: L'écart est multiplicatif. La sensibilité de l'oreille est logarithmique

#### \* Gamme de référence du (La.)

## \* Gamme de référence du la<sub>1</sub>

Do	1	262 Hz
Do#	1,059	277 Hz
Re	1,102	294 Hz
Re#	1,139	311 Hz
Mi	1,259	330 Hz
Fa	1,334	349 Hz
Fa#	1,414	370 Hz
Sol	1,488	392 Hz
Sol#	1,586	415 Hz
La	1,681	440 Hz
La#	1,781	466 Hz
Si	1,886	493 Hz
Do	2	526 Hz

$$f_0 = 440 \times 2^{-\frac{8}{12}}$$

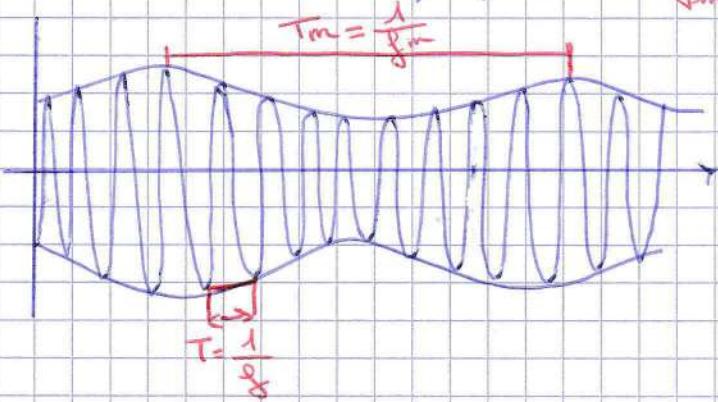
$$2^{\frac{8}{12}} \approx 1,059$$

la musical.

## e) Le battement

Supposons que l'on ait 2 sons de fréquence distinctes  $f_1$  et  $f_2$ .

En approchant les fréquences jusqu'à une certaine différence (seuil différentiel).  
On perçoit alors une fréquence  $f = f_1 + f_2$  celle-ci semble modulée par une fréquence  $f_m = |f_1 - f_2| / 2$



C'est le phénomène de battements.

## 3) Relation de phase

### a) définition phase

La phase d'un signal sonore est la phase à l'origine des temps de celui-ci. Elle s'exprime en radians (rad).

Ne pas confondre avec la phase temporelle (spatiale)

### III Sonie (caractéristiques énergétiques)

#### A) Caractéristiques d'un son

a) La Force (l'intensité, l'énergie ...)

Le son est fort ou faible - volume du son -

#### b) La Hauteur (fréquence du fondamental)

- aigue  $f \nearrow$

- médium  $f \approx$

- grave  $f \searrow$

#### c) Le Timbre (Bande passante avec son enveloppe)

Cela détermine la richesse d'un son, nbr fréq et sa particularité, sa signature

#### 2) Énergie sonore

##### a) La puissance

Def: L'énergie par unité de temps.

$$P_{\text{moy}} = \frac{\Delta W}{\Delta t}$$

$$P_{\text{temporelle}}(t) = \frac{dW}{dt}$$

w: travail (W.s)

t: temps en seconde

P: puissance (Watt)

> Puissance sonore

Tout source sonore génère une puissance sonore.

#### b) Particularité de la puissance sonore

> Indépendance vis à vis de la distance.

La puissance sonore d'une source est la même qu'importe la distance à laquelle elle se trouve.

> Addition (Additivité)

Comme l'énergie se conserve, la puissance aussi.

$$W_{\text{total}} = W_1 + W_2 + \dots + W_n$$

$$\begin{aligned} \frac{dW_{\text{total}}}{dt} &= \frac{d(W_1 + W_2 + \dots + W_n)}{dt} \\ &= \frac{dW_1}{dt} + \frac{dW_2}{dt} + \dots + \frac{dW_n}{dt} \end{aligned}$$

$$P_{\text{total}} = P_1 + P_2 + \dots + P_n$$

Rmq: Ne pas confondre puissance électrique et puissance sonore débitée:  $P_{\text{elec}} \gg P_{\text{sonore}}$

### 3) La pression

#### a) Définition -

Elle est liée à la force qui la crée et à la surface sur laquelle elle s'applique :

$$P = \frac{F}{S}$$

P : pression ( $N/m^2$ ) (Pa)

F : force (N)

S : surface ( $m^2$ )

#### b) pression atmosphérique -

c'est la pression exercée par l'atmosphère sur les corps terrestres. Elle est constante au niveau du sol :

$$P_{atm} = p_0 = 10^5 \text{ Pa}$$

#### c) La pression acoustique

Une source sonore crée une variation de la pression globale s'exerçant sur l'oreille. C'est cette variation que l'on appelle la pression sonore (en acoustique).

#### d) Plage d'audition

> Le seuil d'audibilité (seuil de référence)

Le seuil dépend de la fréquence.

$$p_{ref} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \quad \text{à} \quad f_{ref} = 1 \text{ kHz}$$

> Seuil de douleur

Ce seuil "délimité" l'audibilité du son

$$p_{max} \approx 20 \text{ Pa}$$

### 4) Intensité sonore

a) Def - C'est la puissance par unité de surface sur laquelle s'applique l'énergie sonore.

$$I = \frac{P}{S}$$

I : intensité ( $W/m^2$ )

P : puissance (W)

S : surface ( $m^2$ )

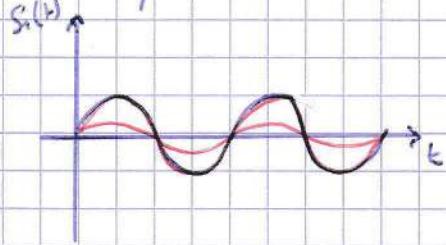
#### b) Additivité

Sur un niveau d'une m<sup>2</sup> de surface les intensités sonores s'ajoutent

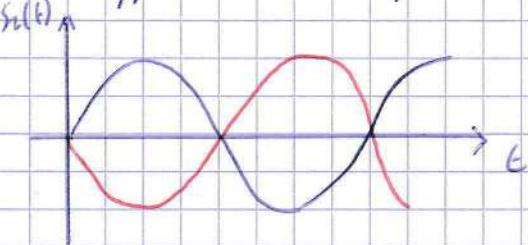
$$\text{Si } S = \text{cte} \rightarrow I_{total} = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$

b) Comparaison de phases de plusieurs sons. - Courbe 1

En phase

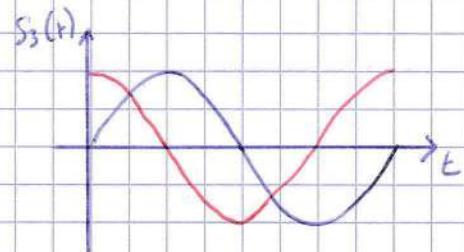


En opposition de phase

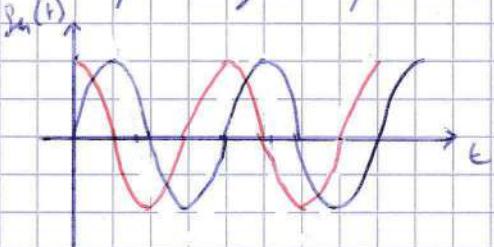


En quadrature de phase

ex: cos et sin

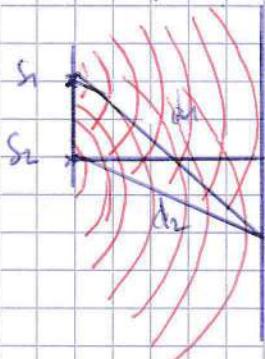


Déphasage quelconque



Le déphasage se produit au niveau de l'axe de fr.

c) Interférences sonores



Deux sources sonores \$s\_1\$ et \$s\_2\$ émettent un son de la même fréquence vers une même surface à une certaine distance. On observe sur la scène: un son d'intensité variable  
➤ Aux points où les sources sont en phase on aura une intensité maximale.  
➤ Aux points où les sources sont en opposition de phase. On aura une intensité minimale.  
➤ Entre les 2 cas on aura une intensité variable. Ce sont les interférences sonores. (ds l'onde)

Rmq: Si de un endroit illos, les parois vont réfléchir les sons émis subit des réflexions successives. C'est la Réverbération.

4) Caractéristiques spectrales.

a) Théorème de Fourier

Un signal périodique est constitué d'une somme de signaux sinusoidaux. La série de Fourier.  
La fréquence de signaux sinusoidaux sont la fréquence du signal périodique et de ses harmoniques (multiples de \$f\_0\$). \$f\_0\$ est la fondamentale.

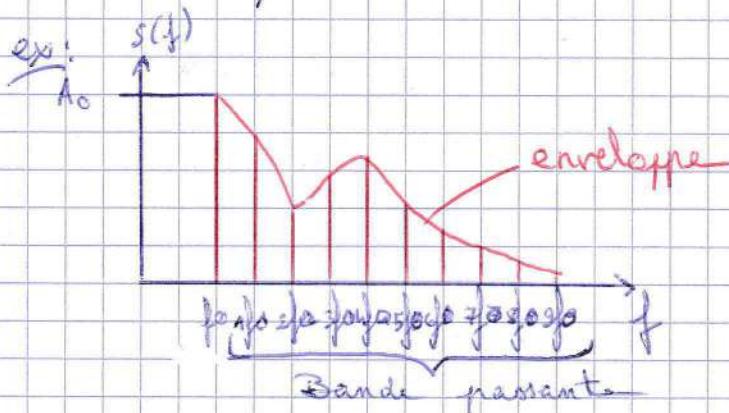
b) Spectre d'un signal sonore.

Tes différentes fonctions sinusoidales constituent un signal sonore formant le spectre de ce signal.  
Un spectre est la représentation fréquentielle du signal.

### c) hauteur et timbre d'un son

> Hauteur est la fréquence du fondamental -  
 Un son aigu →  $f_0$  élevé  
 médium →  $f_0$  moyenne  
 grave →  $f_0$  basse

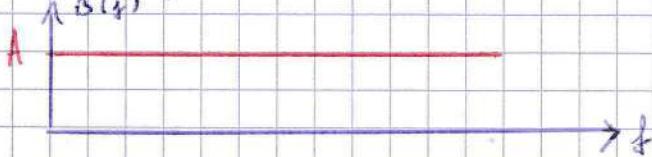
> Timbre est la richesse d'un son il est constitué des harmoniques du son et de leur amplitudes "enveloppe"



l'enveloppe et la bande passante constituent le TIMBRE.

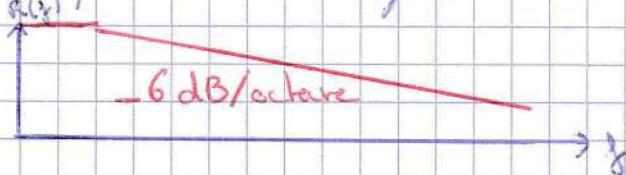
### d) Signaux d'étude utiles

> Bruit Blanc  
 est un son contenant ~~tous~~ les fréquences audibles ayant la même amplitude (Intensité)



SPECTRE D'UN BRUIT BLANC

> Bruit Rose  
 est un son dont chaque octave (ou décade) contient la même quantité d'énergie.



-6 dB entre chaque octave  
 le son devient + élevé, + aigu

- ⊕ Caractéristique fréquentiel → TONIE
- Caractéristique énergétique → SONIE

### c) seuil d'audition en intensité

Pr une fréquence de 1kHz

$$I_s = I_{ref} = 10^{-12} \text{ W/m}^2$$

### d) Relation entre pression ( $p$ ) et intensité ( $I$ )

Pr une onde sphérique

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

### e) Intensité sonore d'une onde sphérique

$$I = \frac{P}{S}$$

$$S = 4\pi R^2$$

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

Rmq :  $I$  varie avec  $\frac{1}{R^2}$

Rmq: Ds le cas de source directive l'intensité sonore varie comme  $\frac{1}{R^2}$  auquel il faut ajouter le facteur de directivité.

$$I = \frac{P \cdot Q}{4\pi R^2}$$

q: facteur de directivité  $Q = \frac{I_{axe}(R)}{I_{moyenne}(R)}$

### f) Intensité sonore d'une onde plane

Def: Une onde plane est une onde dont le front d'onde est plan et la surface S sur laquelle se répartit la puissance est constante

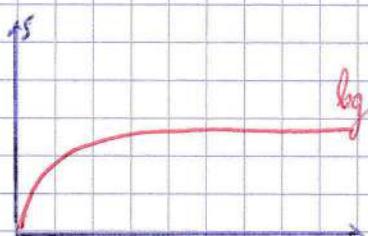
L'intensité sonore d'une onde plane est constante

Rmq: L'intensité sonore donnée pour une source sonore quelconque est la valeur pour une fréquence de 1kHz et une distance de 1m.

## 5) Le Niveau sonore

### a) perception auditive

L'oreille humaine a une sensation logarithmique  
D'où la création d'une unité acoustique décibel



## b) Def Bell et décil Bell

$$\text{"Bell"} = \log \left( \frac{P}{P_{\text{ref}}} \right) = P(\text{Bell})$$

C'est le logarithme décimal d'un rapport de puissance

$$\text{"dB"} = 10 \log \left( \frac{P}{P_{\text{ref}}} \right) = P(\text{dB})$$

## c) Le décibel acoustique (SPL) sound pulsion level.

> Niveau acoustique par l'intensité

$$N(\text{dB}) = 10 \log \frac{I}{I_{\text{ref}}} \quad I_{\text{ref}} = 10^{-12} \text{ W/m}^2$$

> Niveau acoustique par la pression

$$N(\text{dB}) = 20 \log \frac{P}{P_{\text{ref}}} \quad P_{\text{ref}} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$$

Rmq: pour une onde sphérique  $I = \frac{P^2}{4\pi r^2}$

## d) Niveau de plusieurs sources sonores

### a) Niveau sonore de 2 m sources

Si a une intensité  $I_1 \rightarrow$  un niveau  $N_1$

Si a une intensité  $I_2 \rightarrow$  un niveau  $N_2$

Rmq: ce sont les intensités qui s'ajoutent  $I_e = I_1 + I_2$

$$N_e = 10 \log \frac{I_1 + I_2}{I_{\text{ref}}}$$

$$N_e = 10 \log \frac{2 \cdot I_1}{I_{\text{ref}}} \quad I_1 = I_2$$

$$N_e = \underbrace{10 \log 2}_{3} + 10 \log \frac{I_1}{I_{\text{ref}}}$$

$$N_e = N_1 + 3 \quad \forall I_1$$

Le niveau sonore de 2 sources de m intensité, fait augmenté le niveau sonore de 3 dB.

### b) cas des sources corélées

Ds le cas des sources corélées se sont les pressions qui s'ajoutent -  $P_e = p_1 + p_2$

Et on calcule le Niveau avec les pressions

Rmq: Comme les niveaux sonores sont calculés à une fréquence de 1 kHz

Sente Rong et que la sensation auditive dépend de la fréquence :  
il existe un Niveau sonore à décibel pondéré.

Suite Rmg et que la sensation auditive dépend de la fréquence : il existe un Niveau sonore à décibel pondéré.

### 7) Variation du milieu sonore

#### a) Dans le milieu

Le son accélère en passant d'un milieu moins dense vers un milieu plus dense  
Inversément, le son décélère en passant d'un milieu plus dense vers un milieu moins dense

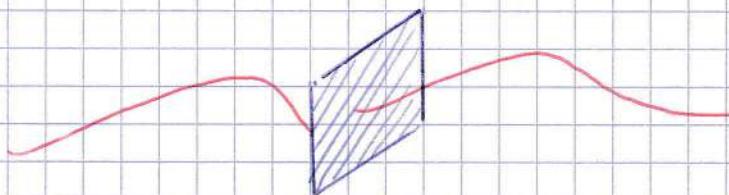
Son accélère - dense  $\rightarrow$  + dense  
décélère + dense  $\rightarrow$  - dense

$$v_{\text{app}} \quad C_{\text{mat}} > C_{\text{beton}} > C_{\text{eau}} > C_{\text{air}}$$

/ Le son ne se propage que dans un milieu matériel (une perturbation)

#### b) Variation avec la distance

\* Cas d'une onde plane



$$\frac{S}{\text{surface}} = \text{cte} \Rightarrow \frac{I}{\text{Intensité}} = \text{cte} \Rightarrow \frac{N}{\text{Niveau sonore}} = \text{cte}$$

Le niveau reste constant

\* Cas d'une onde sphérique



$$r \gg \text{rayon} \Rightarrow S \gg \text{surface} \Rightarrow I \downarrow \text{Intensité} \Rightarrow N \downarrow \text{niveau sonore}$$

Le niveau diminue avec la distance.

### 8) Relation entre le niveau sonore et la distance pour une onde sphérique

$$N = 10 \log \frac{I}{I_{\text{ref}}} = 10 \log \frac{\frac{P}{4\pi r^2}}{I_{\text{ref}}} = 10 \log \frac{P}{4\pi I_{\text{ref}} r^2} + 10 \log \frac{1}{r^2}$$

$$N = 10 \log \frac{I(r=r)}{I_{\text{ref}}} + 10 \log \frac{1}{r^2} \quad N = N(r=r) - 10 \log r^2$$

$$N = N(1) - 20 \log r$$

Exemple : a) Dédoublement de la distance

$$N(R=2) = N(1) - 20 \log 2$$

$$N(R=2) = N(1) - 6 \text{ dB}$$

b) Décuplement de la distance

$$\begin{aligned} N(R=10) &= N(1) - 20 \log 10 \\ &= N(1) - 20 \text{ dB} \end{aligned}$$

### Rappel Logarithme

- \*  $\log(1) = 0$
- \*  $\log(a) \leq 0$
- \*  $\log(a \times b) = \log a + \log b$
- \*  $\log \frac{1}{a} = -\log a$
- \*  $\log \frac{a}{b} = \log a - \log b$
- \*  $\log a^x = x \log a$

## Émergence

Si on veut qu'une source (voix, haut-parleur...) puisse être nettement perçue dans une ambiance bruyante, son niveau doit être supérieur d'au moins 15 dB au niveau du bruit de fond.

l'expérience

## Sensibilité auditive en fonction de la fréquence

La sensibilité auditive dépend de la fréquence, comme le montre la Fig. II.9. L'abscisse est graduée en fréquence, tandis que l'ordonnée représente le niveau sonore en décibels. Chaque ligne correspond à une même sensation subjective. On voit que la sensation *subjective* ne suit pas la courbe du niveau sonore en décibels. En effet, ce dernier est une valeur *physique*, mesurable avec un sonomètre, mais ses valeurs ne décrivent pas nécessairement les sensations auditives.

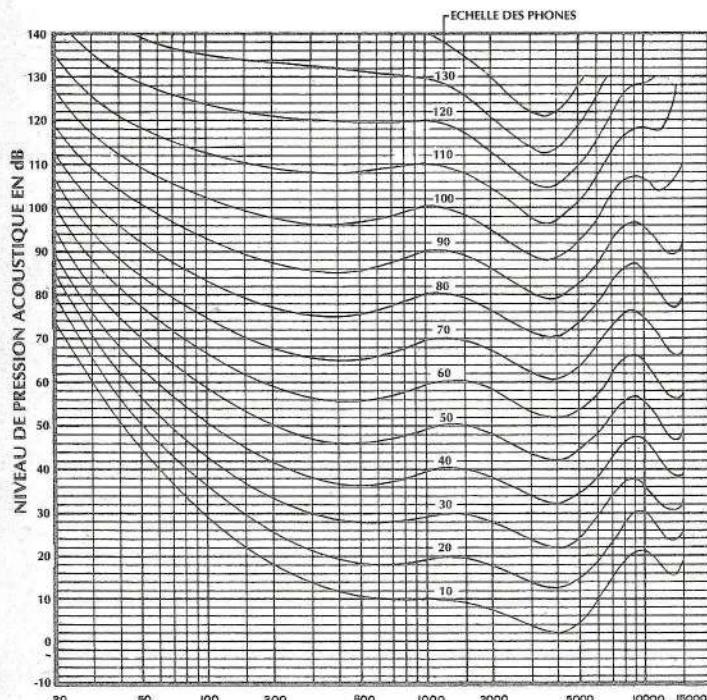


Fig. II.9. Courbes d'isosonie.

Pour comprendre ces courbes, le mieux est de prendre un cas particulier. Considérons par exemple un son de 60 dB à 1 000 Hz. Reportons-nous au point qui correspond à une fréquence de 1 000 Hz et un niveau de 60 dB. On choisit arbitrairement de définir la sensation en *phone* : on dira qu'un son est de  $N$  phones s'il produit la même sensation qu'un son pur de 1 000 Hz, et de  $N$  dB.

Dans notre exemple, le son est donc de 60 phones. Si on garde le même niveau sonore de 60 dB, mais que la fréquence du son diminue, le son paraîtra *subjectivement* moins fort. Par exemple, si sa fréquence est de 100 Hz, pour qu'il paraisse aussi fort que le son de 1 000 Hz, il faut augmenter son niveau de 6 dB (c'est le nombre de dB qu'il faut ajouter pour passer de la droite horizontale correspondant à 60 dB, à la ligne d'isosonie de 60 phones). En mesurant les niveaux subjectifs pour toutes les fréquences, on construit ainsi les courbes d'isosonie.

u seuil d'audition  
ut entendre de  
ns inférieurs à  
riorent le sys-

que l'oreille

aire figurer les  
une décimale :  
ptible, quoique

consciennement  
ion sont effec-  
lement perçue.  
plus faible est  
nore d'environ  
de 5 dB, cela  
explique pour-  
*ianissimo* (pp),

## RÉSUMÉ DES FORMULES

Célérité du son (m/s)	$c = 20\sqrt{T}$ avec $T$ : température en kelvins
Longueur d'onde (m)	$\lambda = \frac{c}{f} = c T$ avec $T$ : période (s), et $f$ : fréquence (Hz)
Pression (Pa)	$p = \frac{F}{S}$
Pression au seuil d'audition	$p_{\text{ref}} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$
Pression atmosphérique	$P_0 = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$
Puissance (Watts)	$\mathcal{P} = \frac{\text{énergie diffusée}}{\text{temps}}$
Intensité ( $\text{W/m}^2$ )	$I = \frac{\text{énergie}}{\text{surface} \times \text{temps}}$ $I = \frac{p^2}{400}$
Niveau de puissance (db)	$L_w = 10 \log \frac{\mathcal{P}}{10^{-12}}$
Niveau de pression (dB)	$L_p = 20 \log \left( \frac{p}{2 \cdot 10^{-5}} \right)$
Niveau d'intensité (dB)	$L_i = 10 \log \left( \frac{I}{10^{-12}} \right)$
Facteur de directivité	$Q = \frac{I_{\text{axe}}}{I_{\text{moy}}}$
Indice de directivité (dB)	$ID = 10 \log Q$
Intensité dans l'axe à la distance $r$ (dB)	$I_{\text{axe}} = \frac{\mathcal{P} Q}{4 \pi r^2}$
Niveau à la distance $r$ (dB)	$L_p(r) = L_i(r) = L_w - 11 - 20 \log r + ID$

d

I DÉ

Onde

Une  
s'agit  
cien,  
cette  
voisi  
le mi

## TESTEZ VOS CONNAISSANCES

- 1.** Quelle est la célérité des ondes acoustiques dans l'eau et dans l'acier ?
- 2.** Quelle est la conséquence du phénomène de réfraction dans une salle de concert ?
- 3.** Qu'appelle-t-on battements ?
- 4.** Qu'appelle-t-on interférences ?
- 5.** Qu'appelle-t-on ondes stationnaires ?
- 6.** Quelle est la différence entre un bruit blanc et un bruit rose ?
- 7.** Si on additionne deux sources de même niveau, combien de décibels gagne-t-on :  
a. si les sources ne sont pas en phase ; b. si les sources en phase.
- 8.** Quel est l'ordre de grandeur de la puissance acoustique de la voix humaine ?
- 9.** Quelle est la différence entre un harmonique et un partiel ?
- 10.** Quelle est la valeur de la pression atmosphérique ?
- 11.** Quelles sont les valeurs de la pression et de l'intensité acoustique au seuil d'audition ?
- 12.** Jusqu'à quelle fréquence peut-on considérer qu'un instrument de musique est omnidirectif ?
- 13.** Quel est le seuil différentiel de perception du niveau sonore ?
- 14.** Combien perd-on de décibels lorsqu'on double la distance par rapport à la source ?
- 15.** Quelles sont les causes d'atténuation du son avec la distance ?
- 16.** Lorsqu'on s'éloigne d'une source, perd-on davantage d'énergie dans les hautes ou dans les basses fréquences ?
- 17.** Si on place une source contre un mur, accentue-t-on davantage les hautes ou les basses fréquences ?
- 18.** Quelle est la différence entre le son d'un violon amplifié à un niveau  $L$  et le son d'un grand nombre de violons qui jouent à l'unisson en produisant un niveau total  $L$  ?
- 19.** Quel est le principe de l'« anti-bruit » ?

NOTIONS GÉNÉRALES

## RÉPONSES

- 1.** Dans l'eau  $c = 1\ 400 \text{ m/s}$ , et dans l'acier  $c = 5\ 000 \text{ m/s}$ .
- 2.** Le son est dévié en direction du plafond.
- 3.** Lorsque deux ondes acoustiques de fréquences voisines émettent simultanément, il se produit des fluctuations de niveau sonore, qu'on appelle des battements.
- 4.** Lorsque deux ondes acoustiques sinusoïdales de même fréquence émettent à des positions différentes, cela produit des alternances de zones où le son est fort et de zones où il est très faible.
- 5.** Dans un milieu fermé, par exemple sur une corde vibrante, ou lorsqu'un haut-parleur émet une onde acoustique sinusoïdale entre deux murs parallèles, on observe des zones où le son est fort (ventres de vibration) et des zones où il est très faible (nœuds).
- 6.** Le bruit blanc possède une densité spectrale constante et une énergie par bandes d'octave qui croît de 3 dB par octave ; le bruit rose possède une énergie par bandes d'octave constante et une densité spectrale qui décroît de 3 dB par octave.
- 7. a.** 3 dB ; **b.** 6 dB.
- 8.** De 0,01 mW (voix normale) à 1 mW (voix criée).
- 9.** Un harmonique est un multiple entier du fondamental, tandis qu'un partiel est un multiple non entier.
- 10.**  $1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ .
- 11.** Au seuil d'audition, la pression acoustique est  $2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$  et l'intensité  $10^{-12} \text{ W/m}^2$ .
- 12.** Beaucoup d'instruments (violon, flûte) sont omnidirectifs jusqu'à 500 Hz, mais certains ne le sont déjà plus à partir d'une centaine de hertz (tuba, violoncelle, etc.).
- 13.** Environ 1 dB.
- 14.** 6 dB.
- 15.** L'atténuation géométrique, due au fait que l'énergie sonore se répartit sur une surface de plus en plus grande à mesure que l'on s'éloigne de la source ; l'atténuation par dissipation, due à la déperdition sous forme de chaleur produite par le frottement les unes contre les autres des molécules composant l'air.
- 16.** Les hautes fréquences.
- 17.** Les basses fréquences.
- 18.** Lorsqu'un grand nombre de violons jouent à l'unisson, il se produit une multitude de battements plus ou moins aléatoires. Il s'ensuit des fluctuations d'amplitude qui génèrent un son plus naturel que celui d'un unique violon amplifié.
- 19.** Le bruit est capté par des microphones, puis réémis en opposition de phase dans la zone à insonoriser.
- 20.** 10 dB.

ACOUS