

Son, perception & acoustique

SCI130

Sebastien.Kramm@univ-rouen.fr

IUT de Rouen, dept. SRC

2012-2013

Qu'est ce qu'un son ?

- Deux définitions :
 - Phénomène physique.
 - Perception et interprétation de ce phénomène physique par l'homme.



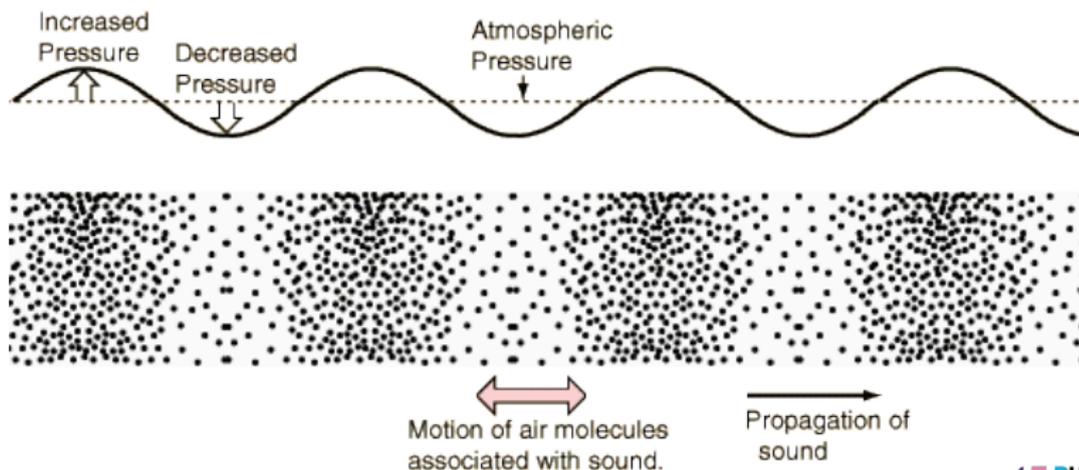
Source : <http://chalvin.free.fr/>

- 1 Aspects physiques
 - Nature ondulatoire du son
 - Aspects énergétiques
- 2 Perception du son
 - Système auditif humain
 - Sensibilité en pression
 - Sensibilité en fréquence
 - Capacité de localisation
- 3 Sujets connexes
 - Propagation d'une onde sonore
 - Mur du son
 - Effet Doppler
 - Parole & musique
 - Capteurs et transducteurs

- 1 Aspects physiques
 - Nature ondulatoire du son
 - Aspects énergétiques
- 2 Perception du son
 - Système auditif humain
 - Sensibilité en pression
 - Sensibilité en fréquence
 - Capacité de localisation
- 3 Sujets connexes
 - Propagation d'une onde sonore
 - Mur du son
 - Effet Doppler
 - Parole & musique
 - Capteurs et transducteurs

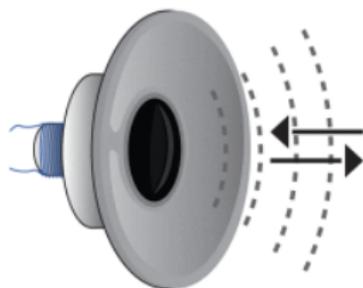
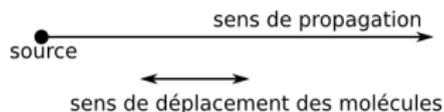
Nature du son

- Le son est la partie audible du spectre des vibrations acoustiques.
- Vibration acoustique : onde produite par la vibration mécanique d'un support fluide ou solide (variation de pression).
- Cette vibration est propagée grâce à l'élasticité du milieu environnant sous forme d'**ondes longitudinales**.



Onde longitudinales et transversales

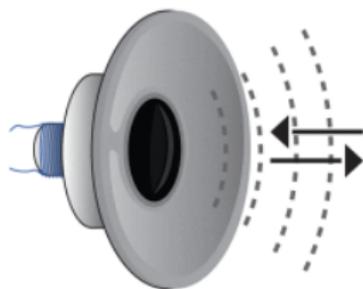
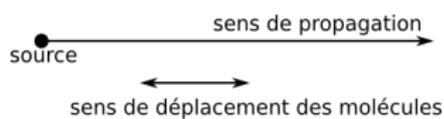
- Onde longitudinale : les molécules se déplacent parallèlement à la direction de propagation.
- Onde transversale : les molécules se déplacent perpendiculairement à la direction de propagation.
- Onde longitudinale :



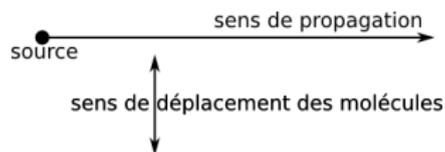
Onde longitudinales et transversales

- Onde longitudinale : les molécules se déplacent parallèlement à la direction de propagation.
- Onde transversale : les molécules se déplacent perpendiculairement à la direction de propagation.

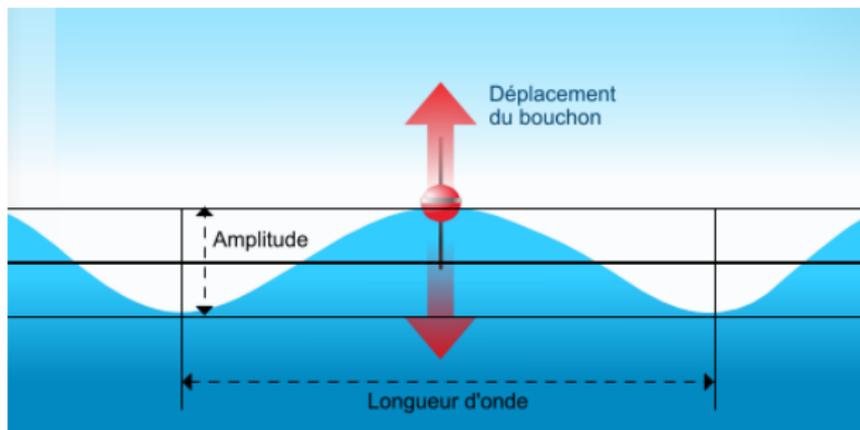
- Onde longitudinale :



- Onde transversale :



Paramètres d'une onde



- La longueur d'onde λ est la distance entre deux points identiques de l'onde, distance parcourue par l'onde au cours d'une période.
- La période T est la **durée** au bout de laquelle on répète l'évolution.
- Longueur d'onde et période sont liées par l'expression $\lambda = c \cdot T$, avec T la période (s.) et c la vitesse de propagation (m/s).

- Une onde progressive plane à pour équation :

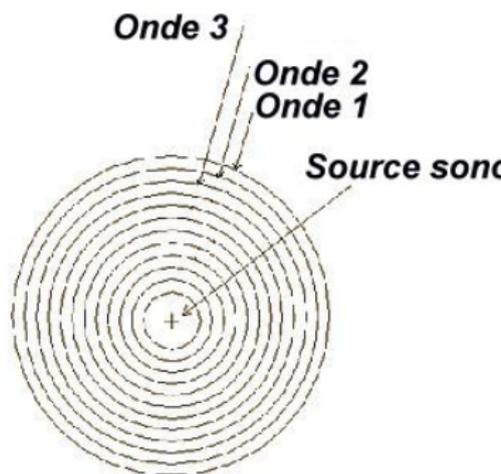
$$y(x, t) = A \cdot \sin[\omega(t - x/c)]$$

avec :

- $y(x, t)$: valeur de la grandeur physique à un instant t , observée à une position x .
- A : coefficient multiplicateur (amplitude).
Rappel : la fonction sin a une période de 2π et évolue entre -1 et +1.
- ω : coefficient déterminant la périodicité temporelle : $\omega = \frac{2\pi}{T}$,
avec T : période de l'onde en s.
- c : célérité (vitesse de propagation) de l'onde.

Propagation omni-directionnelle

- Par défaut, le son se propage dans toutes les directions à la fois (diffusion sphérique).
- Les cercles représentant les fronts d'onde sont des tracés imaginaires qui relient tous les points étant dans un même état de vibration au moment de la représentation : ils sont en **concordance de phase**.



- La longueur d'onde λ de l'onde est définie comme représentant la distance entre deux cercles. Les fronts d'onde sont toujours perpendiculaires à la direction de propagation de l'onde.
- Dans ce cas présent , il y a une **infinité** de directions de propagation.

- 1 Aspects physiques
 - Nature ondulatoire du son
 - Aspects énergétiques
- 2 Perception du son
 - Système auditif humain
 - Sensibilité en pression
 - Sensibilité en fréquence
 - Capacité de localisation
- 3 Sujets connexes
 - Propagation d'une onde sonore
 - Mur du son
 - Effet Doppler
 - Parole & musique
 - Capteurs et transducteurs

Puissance acoustique d'une source

- La puissance acoustique P (en Watt) est l'énergie délivrée par une source sonore pendant un intervalle de temps donné.
- Dépend uniquement des caractéristiques de la source.
- $P = E/\Delta t$, avec :
 - E l'énergie acoustique en joules (J)
 - Δt un intervalle de temps (s).

Puissance acoustique d'une source

- La puissance acoustique P (en Watt) est l'énergie délivrée par une source sonore pendant un intervalle de temps donné.
- Dépend uniquement des caractéristiques de la source.
- $P = E/\Delta t$, avec :
 - E l'énergie acoustique en joules (J)
 - Δt un intervalle de temps (s).

Attention !

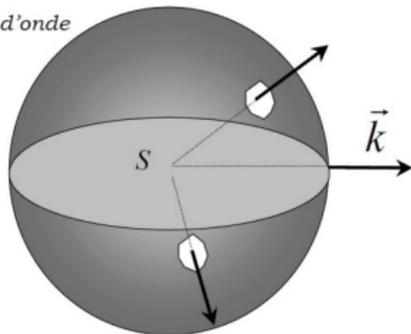
A distinguer de la puissance électrique d'un système de diffusion sonore. (Mais souvent proportionnelle à cette dernière, si on reste dans un fonctionnement linéaire).

- La puissance électrique va permettre de **générer** une puissance acoustique.

Intensité acoustique (ou puissance surfacique)

- L'intensité acoustique correspond à l'énergie qui traverse chaque seconde une surface unitaire perpendiculaire à la direction des ondes sonores.
- Pour une source diffusant en champ libre (diffusion sphérique), l'intensité acoustique est égale à la puissance acoustique divisée par la surface S de la sphère considérée.

Surface d'onde



$$I = \frac{P}{S} \text{ avec } S = 4\pi r^2$$

- I : intensité acoustique ($W.m^{-2}$),
- P : puissance acoustique (W)
- r : distance entre la source et un point de mesure (m).

Intensité acoustique : en pratique

- L'intensité dépend donc :
 - de la source par le biais de la puissance P ,
 - de la distance r du point de mesure par rapport à la source.
- Remarque : l'intensité acoustique n'est pas mesurable directement.

Pour une source ponctuelle rayonnant en champ libre (sphère)

A chaque fois que la distance **double**, la surface de la sphère **quadruple**
⇒ l'intensité acoustique sera divisée par 4.

Intensité acoustique : en pratique

- L'intensité dépend donc :
 - de la source par le biais de la puissance P ,
 - de la distance r du point de mesure par rapport à la source.
- Remarque : l'intensité acoustique n'est pas mesurable directement.

Pour une source ponctuelle rayonnant en champ libre (sphère)

A chaque fois que la distance **double**, la surface de la sphère **quadruple**
⇒ l'intensité acoustique sera divisée par 4.

Démonstration :

$$I(r) = \frac{P}{4\pi r^2} \Rightarrow I(2r) = \frac{P}{4\pi(2 \times r)^2} = \frac{P}{4 \cdot 4\pi r^2} = \frac{I(r)}{4}$$

Pression acoustique

- La pression p est une contrainte appliquée à la surface d'un corps, correspond à une **force** par unité de surface.
- Au repos, les molécules sont soumises à la pression atmosphérique. Lorsque le milieu est perturbé, le mouvement des molécules engendre des **variations locales** de la pression ; c'est la pression acoustique.
- Ordre de grandeur :
 - pression atmosphérique : 105 Pa,
 - onde sonore : de 100 μ Pa à 10 Pa.

Pression acoustique

- La pression p est une contrainte appliquée à la surface d'un corps, correspond à une **force** par unité de surface.
- Au repos, les molécules sont soumises à la pression atmosphérique. Lorsque le milieu est perturbé, le mouvement des molécules engendre des **variations locales** de la pression ; c'est la pression acoustique.
- Ordre de grandeur :
 - pression atmosphérique : 105 Pa,
 - onde sonore : de 100 μ Pa à 10 Pa.
- Pression et intensité acoustique sont liés par la formule :

$$p = \sqrt{I \cdot \rho \cdot c}$$

- p : pression acoustique en un point, en Pascal (Pa),
- I : intensité acoustique ($W.m^{-2}$),
- ρ ("rho") : masse volumique du milieu ($kg.m^{-3}$),
- c : célérité (vitesse de propagation) ($m.s^{-1}$).

Pression acoustique en fonction de la distance

- Rappel : en champ libre, quand la distance double, l'intensité acoustique est divisée par 4.

De façon similaire :

En champ libre, quand la distance double, la pression acoustique est **divisée par 2**.

Pression acoustique en fonction de la distance

- Rappel : en champ libre, quand la distance double, l'intensité acoustique est divisée par 4.

De façon similaire :

En champ libre, quand la distance double, la pression acoustique est **divisée par 2**.

- Demonstration :

$$\begin{aligned} p(2r) &= \sqrt{I(2r) \cdot \rho \cdot c} \\ &= \sqrt{\frac{I(r)}{4} \cdot \rho \cdot c} = \frac{\sqrt{I(r) \cdot \rho \cdot c}}{\sqrt{4}} \\ &= \frac{p(r)}{2} \end{aligned}$$

Vitesse de propagation

- La vitesse de propagation est liée au matériau et aux conditions physiques (température, ...)
 - air : $c = 341 \text{ m/s}$ à 20 °C
 - eau : $c = 1482 \text{ m/s}$
 - acier : $c = 5050 \text{ m/s}$
- Plus le support est dense, plus le son se propage rapidement.
- Dans un gaz, la vitesse de propagation est proportionnelle à la racine carrée de la température absolue (en Kelvin).

$$c = k \cdot \sqrt{T(C^\circ) + 273}$$

(avec k une constante physique)

Vitesse de propagation

- La vitesse de propagation est liée au matériau et aux conditions physiques (température, ...)
 - air : $c = 341 \text{ m/s}$ à $20 \text{ }^\circ\text{C}$
 - eau : $c = 1482 \text{ m/s}$
 - acier : $c = 5050 \text{ m/s}$
- Plus le support est dense, plus le son se propage rapidement.
- Dans un gaz, la vitesse de propagation est proportionnelle à la racine carrée de la température absolue (en Kelvin).

$$c = k \cdot \sqrt{T(\text{C}^\circ) + 273}$$

(avec k une constante physique)

Exercice :

Calculer la vitesse du son à $50 \text{ }^\circ\text{C}$.

$k =$

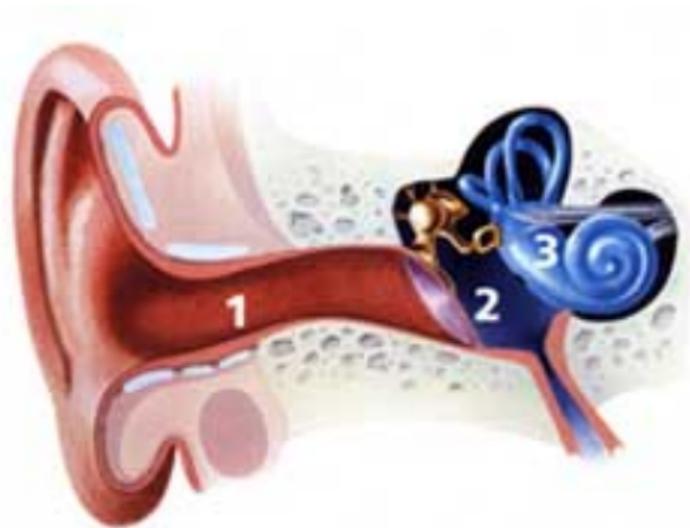
$\Rightarrow c(50 \text{ }^\circ\text{C}) =$

- 1 Aspects physiques
 - Nature ondulatoire du son
 - Aspects énergétiques
- 2 Perception du son
 - Système auditif humain
 - Sensibilité en pression
 - Sensibilité en fréquence
 - Capacité de localisation
- 3 Sujets connexes
 - Propagation d'une onde sonore
 - Mur du son
 - Effet Doppler
 - Parole & musique
 - Capteurs et transducteurs

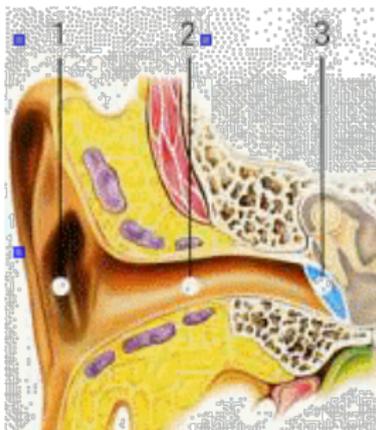
- 1 Aspects physiques
 - Nature ondulatoire du son
 - Aspects énergétiques
- 2 Perception du son
 - **Système auditif humain**
 - Sensibilité en pression
 - Sensibilité en fréquence
 - Capacité de localisation
- 3 Sujets connexes
 - Propagation d'une onde sonore
 - Mur du son
 - Effet Doppler
 - Parole & musique
 - Capteurs et transducteurs

L'oreille

- L'oreille est l'organe qui sert à capter le son.
- On distingue :
 - ① L'oreille externe
 - ② L'oreille moyenne
 - ③ L'oreille interne

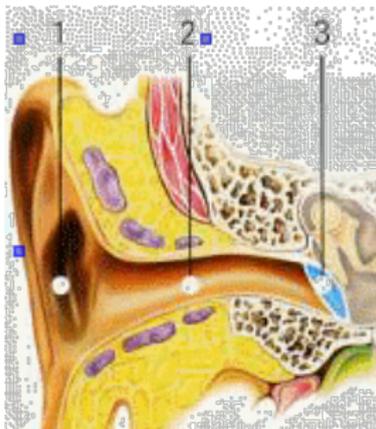


Oreille externe



- L'oreille externe comprend le pavillon (1), le conduit auditif externe (2) et le tympan (3).
- Pavillon : fait de cartilage recouvert de peau, il présente de nombreux replis qui captent les sons, les dirigent et nous permettent de situer leur provenance.
- Le pavillon concentre les ondes sonores à la manière d'un entonnoir, tout en amortissant la brutalité du passage de l'air libre à l'air enclos du conduit auditif.

Oreille externe



- L'oreille externe comprend le pavillon (1), le conduit auditif externe (2) et le tympan (3).
- Pavillon : fait de cartilage recouvert de peau, il présente de nombreux replis qui captent les sons, les dirigent et nous permettent de situer leur provenance.
- Le pavillon concentre les ondes sonores à la manière d'un entonnoir, tout en amortissant la brutalité du passage de l'air libre à l'air enclos du conduit auditif.
- Certains animaux _____ peuvent déplacer leurs pavillons en direction de la source d'un son, mais les muscles qui permettent ces mouvements sont atrophiés et inopérants chez l'homme.
- Le tympan, membrane étanche de _____ est la terminaison acoustique de l'oreille externe.

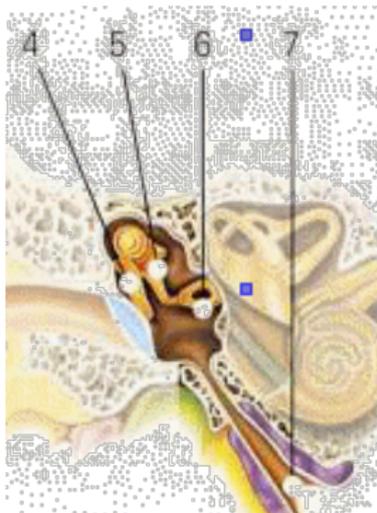
- 2 à 4 cm. de long et de 0,5 à 1 cm. de diamètre.
- Légèrement incurvé, ce qui empêche les insectes d'atteindre le tympan.
- La peau qui le tapisse contient de très nombreuses glandes qui sécrètent le cérumen (substance grasse et jaunâtre) qui joue un rôle protecteur en retenant les poussières.
- Il y a risque d'obstruction du conduit (et donc de perte d'audition) par un bouchon lorsqu'il y a trop de cérumen.
- Le conduit auditif est également une aide auditive naturelle qui amplifie les sons les plus faibles et les moins perçants de la voix humaine. → phénomène de résonance dû à la forme du conduit.
⇒ Le conduit auditif a donc un rôle d'**amplificateur**.

Oreille moyenne



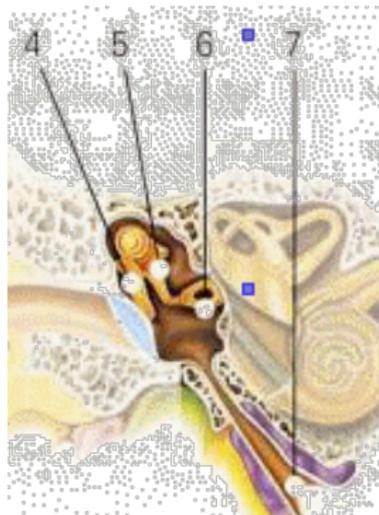
- Rôle double : protéger l'oreille interne et transformer les vibrations aériennes arrivant de l'oreille externe en vibrations solidiennes (analysables par l'oreille interne).
- Petite cavité contenant de l'air ("caisse du tympan") tapissée d'une muqueuse et creusée dans l'os temporal.
- Communique avec le nasopharynx par la trompe d'Eustache (7).

Oreille moyenne



- Rôle double : protéger l'oreille interne et transformer les vibrations aériennes arrivant de l'oreille externe en vibrations solidiennes (analysables par l'oreille interne).
 - Petite cavité contenant de l'air ("caisse du tympan") tapissée d'une muqueuse et creusée dans l'os temporal.
 - Communique avec le nasopharynx par la trompe d'Eustache (7).
-
- Renferme un système de transmission solidienne, la chaîne tympano-ossiculaire, constitué de trois petits os («osselets») :

Oreille moyenne



- Rôle double : protéger l'oreille interne et transformer les vibrations aériennes arrivant de l'oreille externe en vibrations solidiennes (analysables par l'oreille interne).
 - Petite cavité contenant de l'air ("caisse du tympan") tapissée d'une muqueuse et creusée dans l'os temporal.
 - Communique avec le nasopharynx par la trompe d'Eustache (7).
-
- Renferme un système de transmission solidienne, la chaîne tympano-ossiculaire, constitué de trois petits os («osselets») : **le marteau (4), l'enclume (5) et l'étrier (6)**.
 - Le système de levier formé par ces trois osselets transmet les vibrations de l'air présent dans le conduit auditif au liquide lymphatique de l'oreille interne, via la fenêtre ovale.

Trompe d'Eustache

- Conduit oblique qui relie l'oreille moyenne au nasopharynx (partie supérieure de la gorge).
- Normalement, la trompe est aplatie et fermée, mais la déglutition et le bâillement peuvent l'ouvrir momentanément pour équilibrer les pressions.
- La trompe d'Eustache empêche ainsi une accumulation de la pression dans l'oreille.
- Ce mécanisme est important, car le tympan ne peut vibrer librement (et donc transmettre les vibrations) **que** si la pression exercée sur les deux surfaces est égale.
- Dans le cas contraire, le tympan fait saillie vers l'intérieur ou vers l'extérieur, ce qui entrave l'audition et peut-être douloureux.

Le réflexe stapédien

- Deux minuscules muscles (muscle du marteau et muscle de l'étrier) se déclenchent par des sons exceptionnellement forts (dès 80 dB).
- Principe : le muscle du marteau tend le tympan en le tirant vers l'intérieur et le muscle de l'étrier atténue les vibrations de la chaîne des osselets ainsi que les mouvements de l'étrier dans la fenêtre ovale.
⇒ diminue la propagation du son vers l'oreille interne.

Le réflexe stapédien

- Deux minuscules muscles (muscle du marteau et muscle de l'étrier) se déclenchent par des sons exceptionnellement forts (dès 80 dB).
- Principe : le muscle du marteau tend le tympan en le tirant vers l'intérieur et le muscle de l'étrier atténue les vibrations de la chaîne des osselets ainsi que les mouvements de l'étrier dans la fenêtre ovale.
⇒ diminue la propagation du son vers l'oreille interne.
- Se déclenche après une période de latence de 40ms et n'entre en jeu que pour $f < 1\text{kHz}$
⇒ Ne protège **pas** contre les bruits soudains, (armes à feu, explosions,...)
- Durée d'action très limitée (les muscles se fatiguent vite) et protection apportée faible (de l'ordre de 5 à 10 dB).
- Autre rôle : entre en action de façon automatique lors de l'élocution, pour diminuer la perception de sa propre voix.

Oreille interne



- Renferme à la fois l'organe auditif (cochlée) et l'organe de l'équilibre (vestibule).
- Placée dans l'os temporal, à l'arrière de l'orbite Le labyrinthe osseux est un système de canaux tortueux creusés dans l'os, qui comprend deux régions : le vestibule (8), siège de l'équilibre, et la cochlée (9).
- La fenêtre ovale supporte la platine de l'étrier qui, comme un piston, provoque des mouvements du liquide de l'oreille interne. La membrane basilaire, sur laquelle se trouvent les cellules ciliées, s'étend sur toute la largeur de la cochlée. Ces cellules ciliées sont l'élément central de l'organe auditif.
- L'oreille interne se termine par le conduit auditif interne creusé dans l'os, dans lequel passe le _____(10).

- 1 Aspects physiques
 - Nature ondulatoire du son
 - Aspects énergétiques
- 2 Perception du son
 - Système auditif humain
 - **Sensibilité en pression**
 - Sensibilité en fréquence
 - Capacité de localisation
- 3 Sujets connexes
 - Propagation d'une onde sonore
 - Mur du son
 - Effet Doppler
 - Parole & musique
 - Capteurs et transducteurs

- ① L'oreille est capable de percevoir des pressions acoustiques sur une plage de pression très élevée, de l'ordre de $100 \mu\text{ Pa}$ à 10 Pa (rapport de 10^5 !).
- puissance trop faible : pas de perception (silence).
 - puissance trop élevée : douleur, acouphène, et destruction des cellules nerveuses.

- ① L'oreille est capable de percevoir des pressions acoustiques sur une plage de pression très élevée, de l'ordre de $100 \mu\text{ Pa}$ à 10 Pa (rapport de 10^5 !).
 - puissance trop faible : pas de perception (silence).
 - puissance trop élevée : douleur, acouphène, et destruction des cellules nerveuses.
- ② Une différence de niveau de 1 à 2 Pa sera perçue comme la **même variation** qu'une différence de $0,1$ à $0,2 \text{ Pa}$. L'oreille ne ressent pas un doublement de pression acoustique comme un doublement du niveau sonore.

⇒ la perception de la pression acoustique est **logarithmique**

- ① L'oreille est capable de percevoir des pressions acoustiques sur une plage de pression très élevée, de l'ordre de $100 \mu\text{ Pa}$ à 10 Pa (rapport de 10^5 !).
 - puissance trop faible : pas de perception (silence).
 - puissance trop élevée : douleur, acouphène, et destruction des cellules nerveuses.
- ② Une différence de niveau de 1 à 2 Pa sera perçue comme la **même variation** qu'une différence de $0,1$ à $0,2 \text{ Pa}$. L'oreille ne ressent pas un doublement de pression acoustique comme un doublement du niveau sonore.

⇒ la perception de la pression acoustique est **logarithmique**

- On a donc adopté une unité plus adaptée, le **déciBel**, noté dB.

Décibel - définition en acoustique

- Le décibel (**dB**) est le dixième du Bel, et est défini comme le logarithme (en base 10) d'un **rapport** de puissances : $10 \log_{10} \left(\frac{P}{P_0} \right)$, avec P_0 une puissance de référence.

Décibel - définition en acoustique

- Le décibel (**dB**) est le dixième du Bel, et est défini comme le logarithme (en base 10) d'un **rapport** de puissances : $10 \log_{10} \left(\frac{P}{P_0} \right)$, avec P_0 une puissance de référence.
- En acoustique, c'est l'intensité acoustique qui est homogène à une puissance (W/m^2) :

$$L = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) , \text{ avec } I_0 \text{ une intensité acoustique de référence}$$

Décibel - définition en acoustique

- Le décibel (**dB**) est le dixième du Bel, et est défini comme le logarithme (en base 10) d'un **rapport** de puissances : $10 \log_{10} \left(\frac{P}{P_0} \right)$, avec P_0 une puissance de référence.
- En acoustique, c'est l'intensité acoustique qui est homogène à une puissance (W/m^2) :

$$L = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) , \text{ avec } I_0 \text{ une intensité acoustique de référence}$$

- L'intensité acoustique étant proportionnelle au carré de la pression acoustique ($I = k \cdot p^2$), on peut écrire :

$$\begin{aligned} L &= 10 \log \left(\frac{k \cdot p^2}{k \cdot p_0^2} \right) = 10 \log \left(\frac{p^2}{p_0^2} \right) \\ &= 10 [\log(p^2) - \log(p_0^2)] = 10 \cdot 2 [\log(p) - \log(p_0)] \\ &= 20 \log \left(\frac{p}{p_0} \right) \end{aligned}$$

Décibel et référence

- Le dB est une mesure d'un rapport.
- Pour pouvoir l'utiliser pour mesurer un niveau absolu, il faut lui assigner une **référence**.

Décibel et référence

- Le dB est une mesure d'un rapport.
- Pour pouvoir l'utiliser pour mesurer un niveau absolu, il faut lui assigner une **référence**.

En acoustique :

- Le niveau sonore "0 dB" (seuil extrême de l'audition) correspond à une pression de référence $p_0 = 20\mu Pa$, ou une intensité acoustique $I_0 = 1pW/m^2$ (RAPPEL : $p \leftrightarrow$ _____, $\mu \leftrightarrow$ _____))
- Une variation de 1 dB représente à peu près la plus faible variation que les humains puissent distinguer.

Décibel et référence

- Le dB est une mesure d'un rapport.
- Pour pouvoir l'utiliser pour mesurer un niveau absolu, il faut lui assigner une **référence**.

En acoustique :

- Le niveau sonore "0 dB" (seuil extrême de l'audition) correspond à une pression de référence $p_0 = 20\mu Pa$, ou une intensité acoustique $I_0 = 1pW/m^2$ (RAPPEL : $p \leftrightarrow$ _____, $\mu \leftrightarrow$ _____))
- Une variation de 1 dB représente à peu près la plus faible variation que les humains puissent distinguer.
- Deux façons de mesurer coexistent :
 - dB-SPL : mesure absolue, indépendante de l'aspect humain de la perception. (SPL : *Sound Pressure Level*)
 - dB-A : mesure pondérée par la perception associée à une oreille type, et qui correspond plus au ressenti humain.
- Note : dans d'autres domaines (électronique, ...), on rencontre d'autre références (dBV, dBm, etc.)

Décibel, distance et puissance

- Soit une source d'une puissance acoustique donnée P générant à une distance r un niveau sonore L_0 (en dB).
- Si on remplace cette source par une source d'une puissance $2P$, alors l'intensité acoustique est doublée. On en déduit :

$$L = 10 \log \left(\frac{2I}{I_0} \right) = 10 \left[\log \left(\frac{I}{I_0} \right) + \log(2) \right] = L_0 + 10 \cdot 0,3 = L_0 + 3$$

⇒ Le niveau sonore augmente de **3 dB**.

Décibel, distance et puissance

- Soit une source d'une puissance acoustique donnée P générant à une distance r un niveau sonore L_0 (en dB).
- Si on remplace cette source par une source d'une puissance $2P$, alors l'intensité acoustique est doublée. On en déduit :

$$L = 10 \log \left(\frac{2I}{I_0} \right) = 10 \left[\log \left(\frac{I}{I_0} \right) + \log(2) \right] = L_0 + 10 \cdot 0,3 = L_0 + 3$$

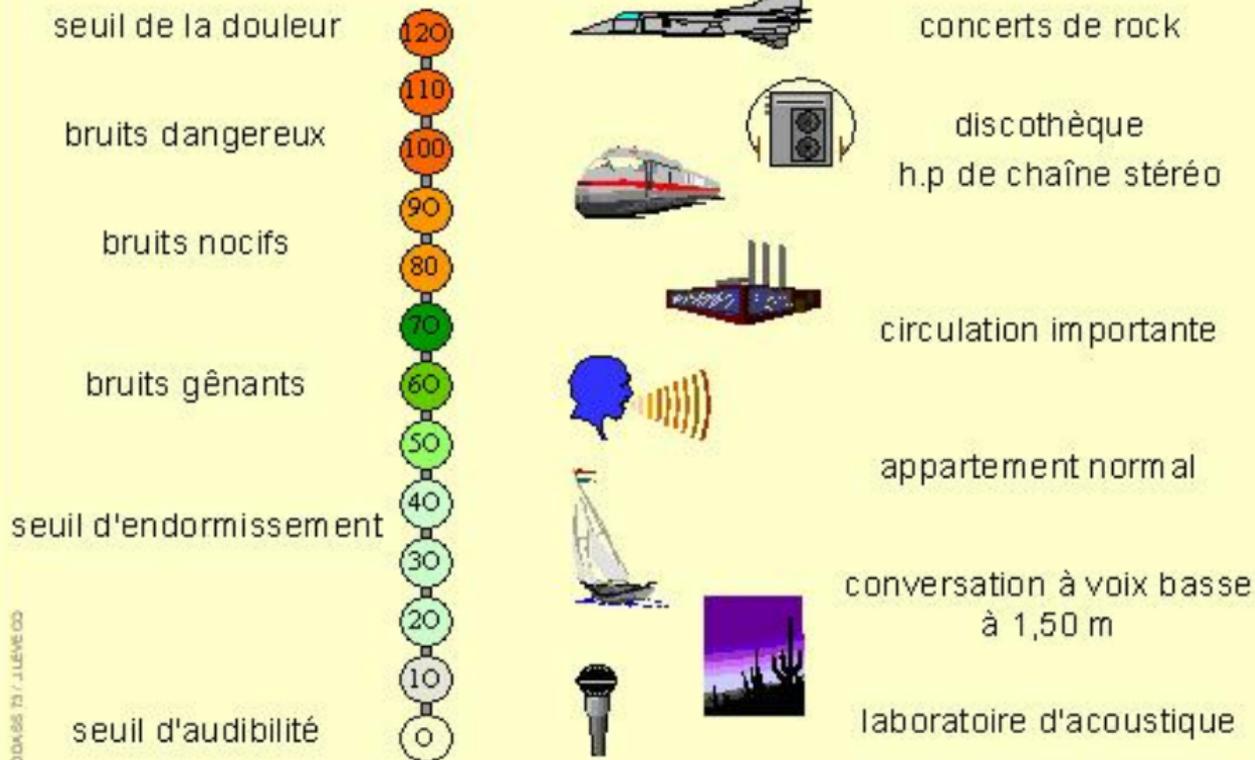
⇒ Le niveau sonore augmente de **3 dB**.

- Si on est en champ libre, et qu'on double la distance, alors l'intensité acoustique est divisée par 4. On en déduit :

$$L = 10 \log \left(\frac{I/4}{I_0} \right) = 10 \left[\log \left(\frac{I}{I_0} \right) - \log(4) \right] = L_0 - 6$$

⇒ Le niveau sonore diminue de **6 dB**.

niveaux en dB(A)



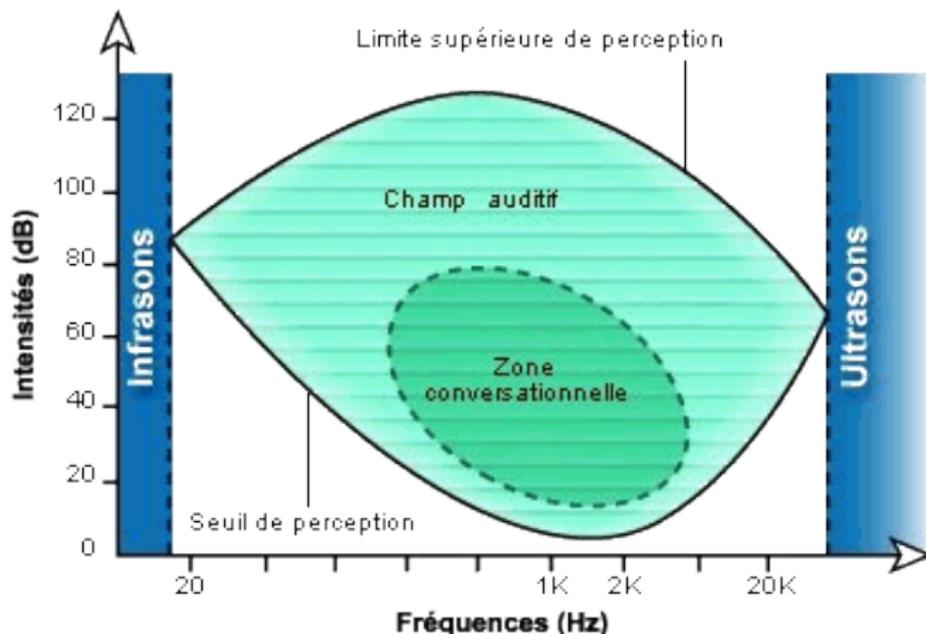
DDA&S TH / J.LÉVÉ CO

- 1 Aspects physiques
 - Nature ondulatoire du son
 - Aspects énergétiques
- 2 Perception du son
 - Système auditif humain
 - Sensibilité en pression
 - **Sensibilité en fréquence**
 - Capacité de localisation
- 3 Sujets connexes
 - Propagation d'une onde sonore
 - Mur du son
 - Effet Doppler
 - Parole & musique
 - Capteurs et transducteurs

- L'oreille humaine est un **capteur** qui ne perçoit ces vibrations que dans une certaine plage de fréquences, selon l'âge, l'état de l'oreille, etc.
 - Fréquence élevée : son aigu
 - Fréquence faible : son grave
- Plage "standard" (retenue comme étant la plus large) : 20 Hz - 20 kHz (3 décades).
 - En dessous de 20 Hz : infrasons
 - Au dessus de 20 kHz : ultrasons
- Certains animaux peuvent percevoir des fréquences bien plus élevées (chiens, chauve-souris, ..)

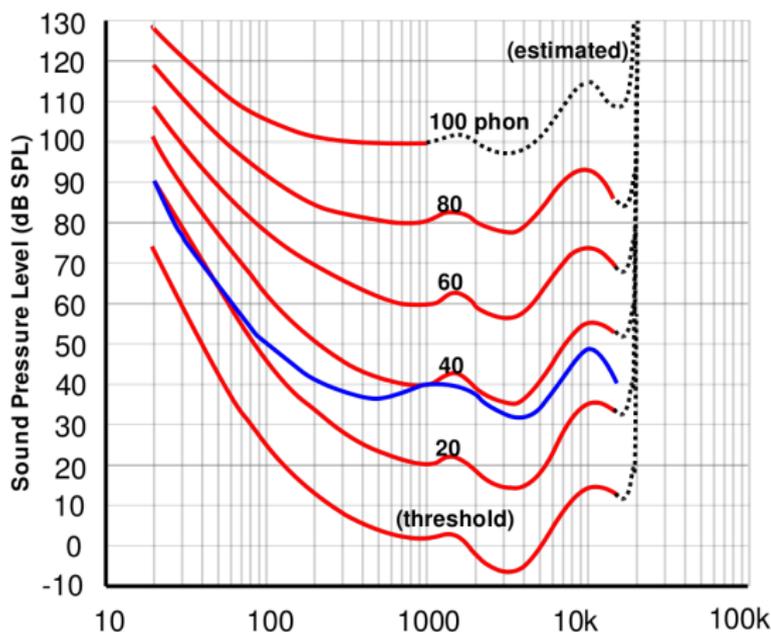
Champ auditif

- L'oreille humaine n'a pas la même sensibilité selon la fréquence du signal.
- Le seuil de perception varie selon la fréquence, on parle de **champ auditif**, correspondant à une zone dans le plan fréquence-niveau.



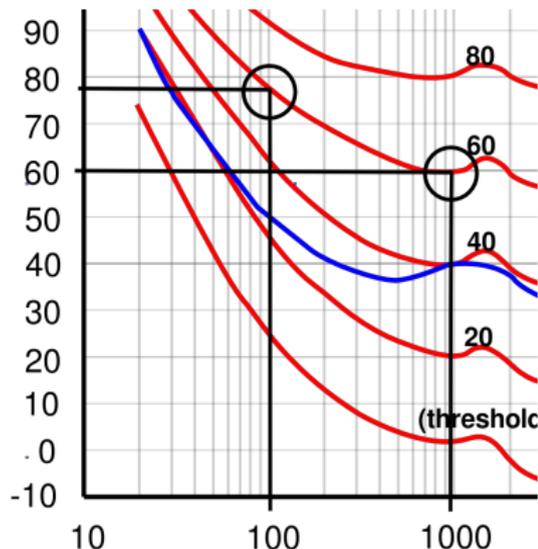
Courbe isosoniques

- Fletcher (1884-1981), physicien américain a mis ceci en évidence via les courbes isosoniques, qui ont été déterminées expérimentalement.
- Ces mesures ont été depuis re-vérifiées et ces courbes ont été normalisées (ISO 226).



Exemple d'utilisation des courbes isosoniques

- Pour être perçu comme étant "du même niveau" qu'un signal à 1 kHz à 60 dB-SPL, un signal à 100 Hz devra avoir un niveau de _____, soit _____ de plus.

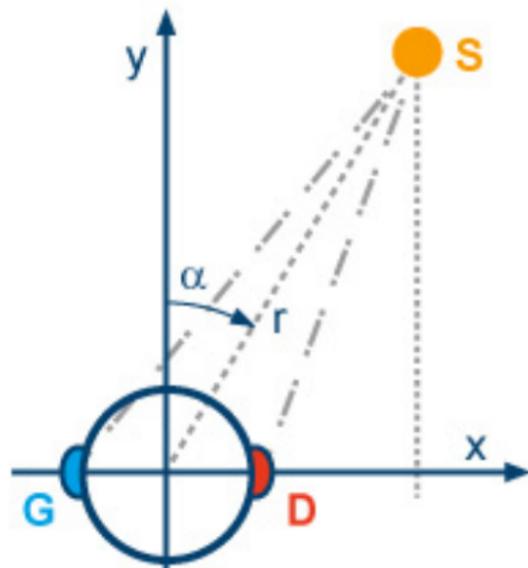


- Ce phénomène est à l'origine du bouton "loudness" sur certains amplis HiFi.
Rôle : compensation de la faible sensibilité de l'oreille dans les graves et les aigus par une amplification de ces fréquences.

- 1 Aspects physiques
 - Nature ondulatoire du son
 - Aspects énergétiques
- 2 Perception du son
 - Système auditif humain
 - Sensibilité en pression
 - Sensibilité en fréquence
 - Capacité de localisation
- 3 Sujets connexes
 - Propagation d'une onde sonore
 - Mur du son
 - Effet Doppler
 - Parole & musique
 - Capteurs et transducteurs

Capacité de localisation

- L'humain est capable d'identifier la direction d'une source sonore en comparant le signal perçu par les deux oreilles.
- Ce mécanisme est complètement inconscient, l'intégration se fait au niveau cérébral.
- Deux mécanismes sont utilisés :
 - la différence de temps d'arrivée de l'onde sonore à chaque oreille ;
 - la différence d'intensité du son perçue par chaque oreille.



Capacité de localisation - 2

- Différence de temps interaurale (ITD : *Interaural Time Difference*)
⇒ plus efficace pour les fréquences graves.
- Différence d'intensité interaurale (IID : *Interaural Intensity Difference*)
La tête tend à s'opposer au passage de l'onde sonore (effet d'ombre).
Le même signal sonore est perçu avec des intensités différentes.
⇒ plus efficace pour les fréquences aiguës.

- Différence de temps interaurale (ITD : *Interaural Time Difference*)
⇒ plus efficace pour les fréquences graves.
- Différence d'intensité interaurale (IID : *Interaural Intensity Difference*)
La tête tend à s'opposer au passage de l'onde sonore (effet d'ombre).
Le même signal sonore est perçu avec des intensités différentes.
⇒ plus efficace pour les fréquences aiguës.
- Le cerveau humain intègre les informations de type IID et ITD, et permet une localisation dans le plan horizontal.
- Il existe une **zone de confusion** qui correspond aux azimuts 0° et 180° (IID et l'ITD quasi identiques).
- En cas de confusion, l'être humain effectue instinctivement de petits mouvements de tête qui lui permettent de créer de nouveaux indices binauraux et monauraux, et ainsi de préciser la position de la source sonore.

- 1 Aspects physiques
 - Nature ondulatoire du son
 - Aspects énergétiques
- 2 Perception du son
 - Système auditif humain
 - Sensibilité en pression
 - Sensibilité en fréquence
 - Capacité de localisation
- 3 Sujets connexes
 - Propagation d'une onde sonore
 - Mur du son
 - Effet Doppler
 - Parole & musique
 - Capteurs et transducteurs

- 1 Aspects physiques
 - Nature ondulatoire du son
 - Aspects énergétiques
- 2 Perception du son
 - Système auditif humain
 - Sensibilité en pression
 - Sensibilité en fréquence
 - Capacité de localisation
- 3 Sujets connexes
 - Propagation d'une onde sonore
 - Mur du son
 - Effet Doppler
 - Parole & musique
 - Capteurs et transducteurs

- En dehors du cas (virtuel) du champ libre (onde se propageant de façon sphérique), la propagation d'une onde est régie par quatre phénomènes :
 - ① Réflexion
 - ② Absorption
 - ③ Diffraction
 - ④ Réfraction
- La réfraction désigne simplement le changement de direction de propagation d'une onde lors d'un changement de milieu, et a peu d'applications dans le cas des ondes sonores.

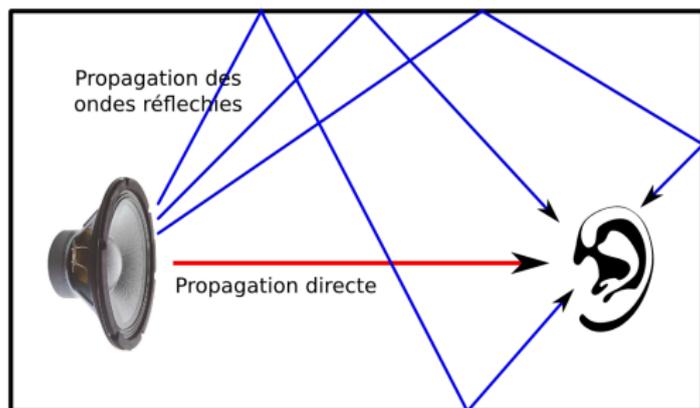
Réflexion et absorption

- Une onde sonore va rebondir sur toute surface lisse, avec un angle à la normale identique.
- Une partie de l'énergie sera réfléchie, l'autre partie absorbée par le matériau : ceci est caractérisé par un coefficient α_S .
- Des matériaux différents donneront des rapports α_S différents, et qui seront fonction de la fréquence.
 - Exemple : Béton lisse : reflexion importante



Problème lié à la réflexion

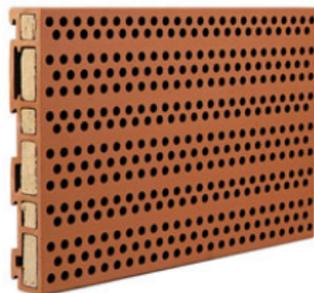
- Le phénomène de réflexion est une préoccupation **majeure** pour des locaux recevant du public (salles de réunion, salles de classe, cantines, gymnases, etc.)
⇒ On parle de "phénomène de réverbération" : le son semble "amplifié" par les réflexions multiples des ondes sonores.



Traitement de la réflexion

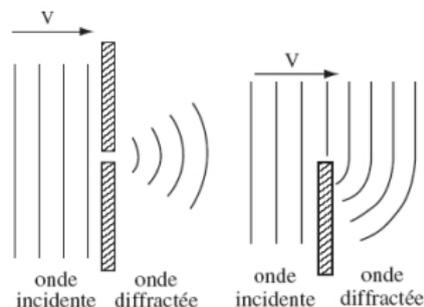
- Deux approches possibles :

- ① Recouvrir les surfaces lisses avec des matériaux absorbants, ou mettre en place des "pièges à son".
- ② Lors de la conception, éviter les surfaces planes parallèles.



Diffraction

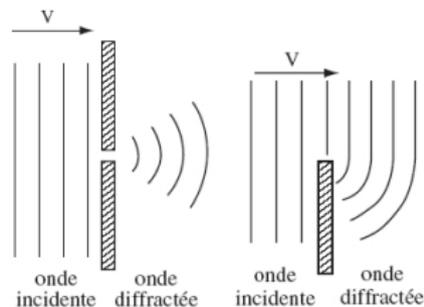
- La diffraction est la capacité d'une onde à "contourner" un obstacle, ou à passer dans une fente.



- Pour un même obstacle, les grandes longueurs d'onde (sons graves) vont contourner plus facilement l'obstacle que les faibles longueurs d'onde (sons aigus). ⇒ **Les sons graves "portent" plus loin.**

Diffraction

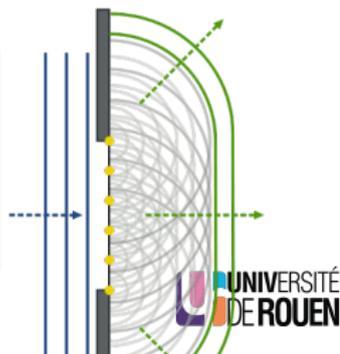
- La diffraction est la capacité d'une onde à "contourner" un obstacle, ou à passer dans une fente.



- Pour un même obstacle, les grandes longueurs d'onde (sons graves) vont contourner plus facilement l'obstacle que les faibles longueurs d'onde (sons aigus). ⇒ **Les sons graves "portent" plus loin.**

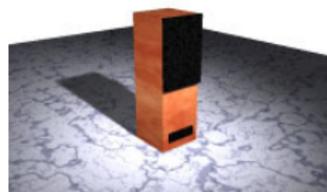
Principe d'Huygens :

"Chaque point d'un front d'onde peut être considéré comme une source ponctuelle d'onde se déplaçant dans la même direction de propagation que l'onde initiale. Le front suivant s'obtient en faisant la résultante de ces nouvelles ondes."



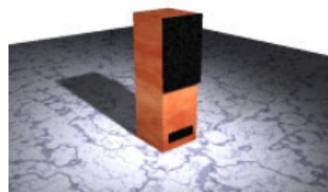
Propagation : influence des murs

- Si une source est placée sur le sol, la propagation est réduite à une **demi-sphère** et la puissance sonore est **doublée**.
⇒ L'augmentation est donc de 3dB.



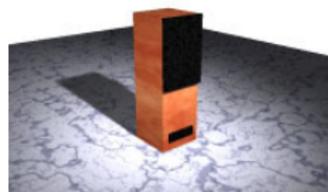
Propagation : influence des murs

- Si une source est placée sur le sol, la propagation est réduite à une **demi-sphère** et la puissance sonore est **doublée**.
⇒ L'augmentation est donc de 3dB.
- On ajoute au niveau de la source un deuxième plan orthogonal au premier (un mur par exemple), la propagation se réduit à un quart de sphère et la puissance sonore est à nouveau doublée.
⇒ Augmentation totale : 6dB.



Propagation : influence des murs

- Si une source est placée sur le sol, la propagation est réduite à une **demi-sphère** et la puissance sonore est **doublée**.
⇒ L'augmentation est donc de 3dB.
- On ajoute au niveau de la source un deuxième plan orthogonal au premier (un mur par exemple), la propagation se réduit à un quart de sphère et la puissance sonore est à nouveau doublée.
⇒ Augmentation totale : 6dB.
- On ajoute un troisième plan orthogonal aux deux autres. La propagation se réduit à un huitième de sphère et la puissance sonore est à nouveau doublée.
⇒ Augmentation totale : 9dB.



- 1 Aspects physiques
 - Nature ondulatoire du son
 - Aspects énergétiques
- 2 Perception du son
 - Système auditif humain
 - Sensibilité en pression
 - Sensibilité en fréquence
 - Capacité de localisation
- 3 Sujets connexes
 - Propagation d'une onde sonore
 - **Mur du son**
 - Effet Doppler
 - Parole & musique
 - Capteurs et transducteurs

- Lorsqu'un objet dépasse la vitesse du son, il y a génération d'une onde de choc conique, qui parcourt le sol.

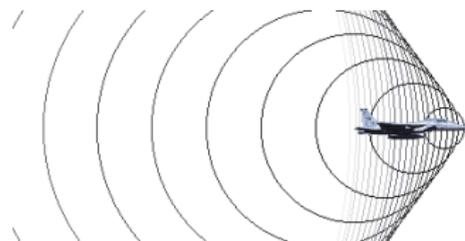


Vitesse subsonique : l'avion reste à l'intérieur des ondes sphériques qu'il génère.

- Lorsqu'un objet dépasse la vitesse du son, il y a génération d'une onde de choc conique, qui parcourt le sol.



Vitesse subsonique : l'avion reste à l'intérieur des ondes sphériques qu'il génère.



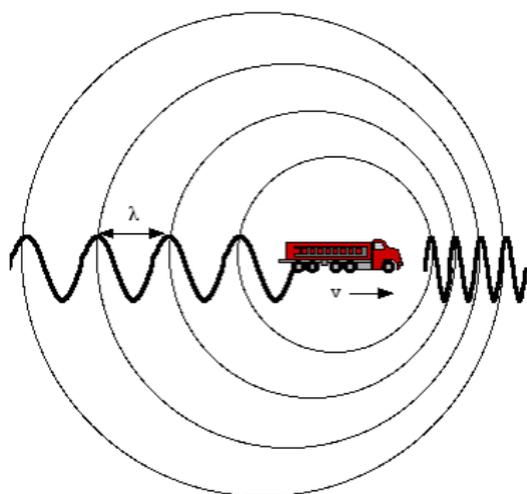
Vitesse supersonique : l'avion dépasse les ondes sphériques qu'il génère, ce qui provoque une onde de choc sur toute la trajectoire, le long du cône.

- Ernst Mach (1838-1916), physicien et philosophe autrichien.
- Rapport entre la vitesse d'un mobile et la vitesse du son dans les mêmes conditions de pression et de température.
 - $Ma < 1$: vitesse *subsonique*.
 - $Ma > 1$: vitesse *supersonique*.
- La zone $0,94 < Ma < 1,2$ est appelée vitesse *transsonique*.
- Fonction de la température (et par extension, de l'altitude).
- Sert surtout en aérodynamique et en balistique.

- 1 Aspects physiques
 - Nature ondulatoire du son
 - Aspects énergétiques
- 2 Perception du son
 - Système auditif humain
 - Sensibilité en pression
 - Sensibilité en fréquence
 - Capacité de localisation
- 3 Sujets connexes
 - Propagation d'une onde sonore
 - Mur du son
 - Effet Doppler
 - Parole & musique
 - Capteurs et transducteurs

Effet Doppler

- Christian Doppler (1803-1853), mathématicien et physicien autrichien.
- Le son est différent selon que l'on est dans le véhicule (l'émetteur est immobile par rapport au récepteur), que le véhicule se rapproche du récepteur (le son est plus aigu) ou qu'il s'éloigne (le son est plus grave).

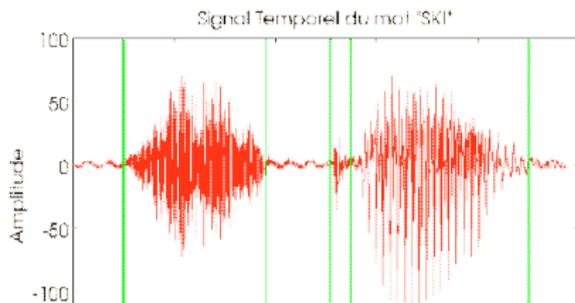


- 1 Aspects physiques
 - Nature ondulatoire du son
 - Aspects énergétiques
- 2 Perception du son
 - Système auditif humain
 - Sensibilité en pression
 - Sensibilité en fréquence
 - Capacité de localisation
- 3 Sujets connexes
 - Propagation d'une onde sonore
 - Mur du son
 - Effet Doppler
 - Parole & musique
 - Capteurs et transducteurs

Représentation d'un son réel : spectrogramme

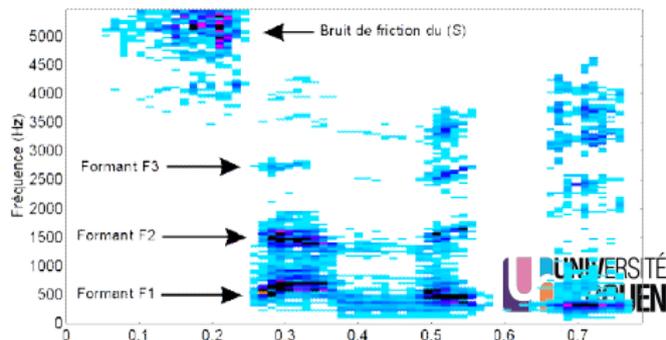
- Un signal de parole est un signal complexe, dont les paramètres (amplitude, période, spectre) varient très rapidement.
- La représentation temporelle rend l'analyse difficile, la représentation sous forme de spectrogramme montre mieux l'évolution des paramètres.
- Un spectrogramme montre l'évolution dans le temps du contenu spectral du signal, calculé avec une FFT (*Fast Fourier Transform*). La couleur représente l'intensité de la fréquence.

- Représentation temporelle du mot "SKI"



S. Kramm (IUT SRC)

- Spectrogramme du mot "SAMEDI"



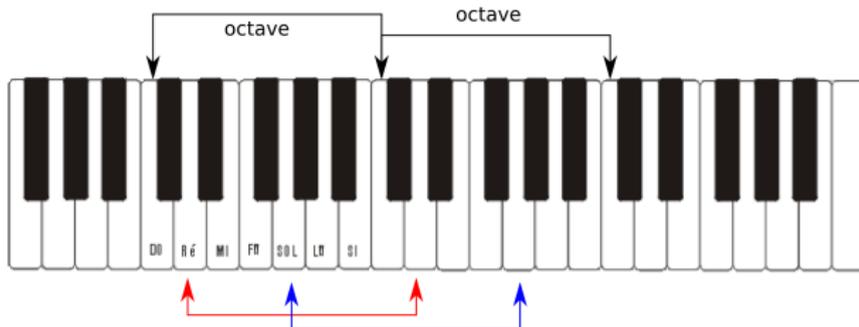
SCI130 : Son

2012-2013

54 / 60

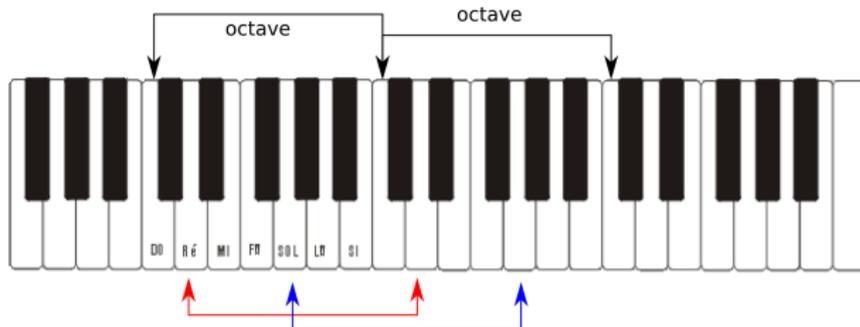
Perception de hauteur de son

- La perception de la hauteur d'un son (sa fréquence) est également logarithmique : deux sons de 100 Hz et 200 Hz seront perçus comme ayant le **même écart** de hauteur que deux sons de 400 Hz et 800 Hz. \Rightarrow Cet intervalle de 2 s'appelle une **octave**.



Perception de hauteur de son

- La perception de la hauteur d'un son (sa fréquence) est également logarithmique : deux sons de 100 Hz et 200 Hz seront perçus comme ayant le **même écart** de hauteur que deux sons de 400 Hz et 800 Hz. \Rightarrow Cet intervalle de 2 s'appelle une **octave**.



- En musique, on a établi une "fréquence de référence" : LA3 (au milieu du piano) = 440 Hz, donnée par un **diapason**.



Découpage de l'octave en notes

- La musique occidentale découpe une octave en 12 demi tons de hauteur égale : $f_{n+12} = f_n \times 2$

Découpage de l'octave en notes

- La musique occidentale découpe une octave en 12 demi tons de hauteur égale : $f_{n+12} = f_n \times 2$
- Les fréquences associées aux notes suivent une **série géométrique** :
 $f_{n+1} = k \cdot f_n$,
- Le coefficient multiplicatif vaut : $k = \sqrt[12]{2} = 2^{\frac{1}{12}}$
 $k \times k \times k \times \dots \times k = 2$

Découpage de l'octave en notes

- La musique occidentale découpe une octave en 12 demi tons de hauteur égale : $f_{n+12} = f_n \times 2$
- Les fréquences associées aux notes suivent une **série géométrique** :
 $f_{n+1} = k \cdot f_n$,
- Le coefficient multiplicatif vaut : $k = \sqrt[12]{2} = 2^{\frac{1}{12}}$
 $k \times k \times k \times \dots \times k = 2$
- Par exemple :
 - la note "La # 3" a une fréquence de $440 \times k$,
 - la note "Si 3" a une fréquence de $440 \times k \times k = 440 \times k^2$,
 - la note "Do 4" a une fréquence de $440 \times k^3$,
 - etc.
 - ... jusqu'à la note "La 4", qui a une fréquence de $440 \times k^{12} = 440 \times (\sqrt[12]{2})^{12} = 440 \times 2 = 880$ Hz.

- 1 Aspects physiques
 - Nature ondulatoire du son
 - Aspects énergétiques
- 2 Perception du son
 - Système auditif humain
 - Sensibilité en pression
 - Sensibilité en fréquence
 - Capacité de localisation
- 3 Sujets connexes
 - Propagation d'une onde sonore
 - Mur du son
 - Effet Doppler
 - Parole & musique
 - Capteurs et transducteurs

Microphone

- Un microphone convertit une onde sonore (pression acoustique) en signal électrique.
- Caractéristiques :
 - Sensibilité moyenne, exprimée en V/dB ou en V/Pa .
 - Courbe de réponse, spécifiant la sensibilité exacte en fonction de la fréquence.
 - Courbe de directivité, spécifiant la sensibilité spatiale du micro.

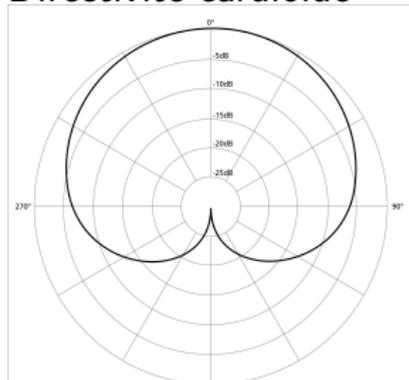


Microphone

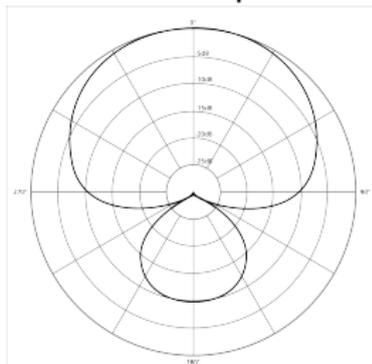
- Un microphone convertit une onde sonore (pression acoustique) en signal électrique.
- Caractéristiques :
 - Sensibilité moyenne, exprimée en V/dB ou en V/Pa .
 - Courbe de réponse, spécifiant la sensibilité exacte en fonction de la fréquence.
 - Courbe de directivité, spécifiant la sensibilité spatiale du micro.



Directivité cardioïde



Directivité supercardioïde

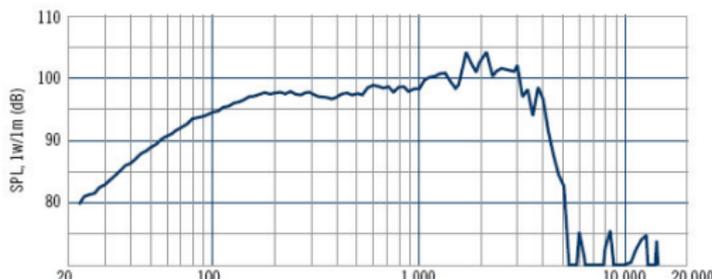


Haut parleur

- Un haut parleur est un transducteur qui convertit une énergie électrique en pression acoustique.
- Paramètres importants :



- Rendement (moyen), exprimé sous la forme d'un niveau sonore (dB-SPL) mesuré à 1 m pour une puissance d'entrée de 1W.
- Courbe de réponse, précisant ce niveau pour toute la bande de fréquences considérées.
- Angle de couverture, en degrés.
- Impédance électrique.



- <http://www.cochlea.org>
- <http://www.audiosonica.com/fr/cours/>
- [http://fr.wikipedia.org/wiki/Son_\(physique\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/Son_(physique))