



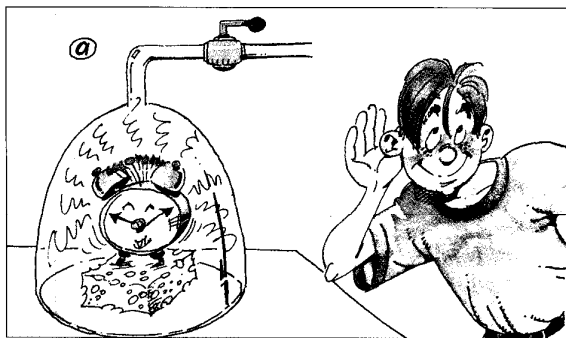
ACOUSTIQUE

1) Le son se propage

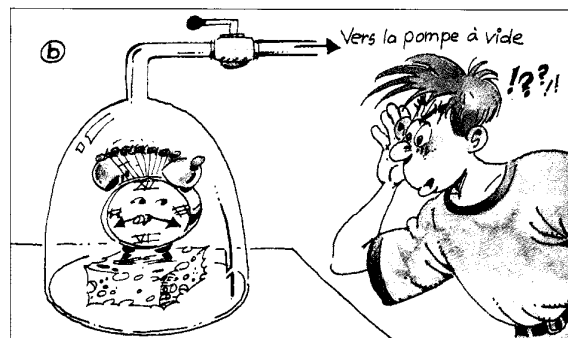
1) La nécessité d'un milieu matériel

Des faits de la vie courante montrent que tout milieu matériel (qu'il soit gazeux, liquide ou solide) transmet le son. Cependant, les corps nous transmettent mal le son : on peut insonoriser une salle en la tapissant de mousse.

L'expérience décrite ci-dessous montre que le son ne peut pas se propager dans le vide.



1. Le réveil est placé sous une cloche à vide en verre. La sonnerie du réveil est perçue à l'extérieur : l'air et le verre transmettent les sons. Quel est le rôle de l'éponge ?



2. Le son s'atténue puis s'éteint lorsqu'on fait le vide dans la cloche. Le vide ne transmet pas les sons.

Le son ne se propage pas dans le vide. Sa propagation nécessite un milieu matériel.

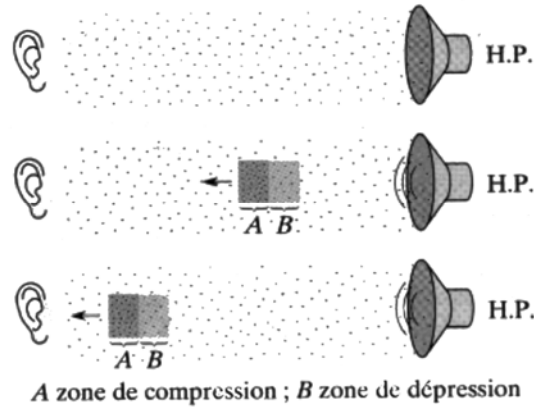
2) La nature de la grandeur physique se propageant dans l'air

Plaçons une bougie allumée devant un baffle n'émettant aucun son : la flamme est longue et fine (a). En revanche, la flamme est courte et épaisse lorsque le haut-parleur fonctionne (b).



Ainsi, lorsque l'émetteur vibre, il secoue et fait vibrer, autour d'une position moyenne, les molécules de l'air situées à son contact. Celles-ci communiquent leur mouvement à leurs voisines, lesquelles en font vibrer d'autres à leur tour : **l'onde sonore se propage.**

Ci-dessous, on a représenté les molécules par des points.



En l'absence de son, dans l'air calme, la pression atmosphérique au niveau de la mer est, en moyenne, de 10^5 pascals (le pascal est l'unité de pression dans le système international d'unités ; son symbole est Pa). Lors de la propagation de l'onde sonore, les molécules d'air sont :

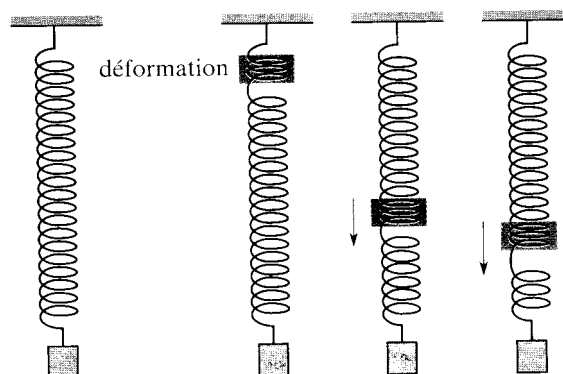
- tantôt rapprochées les unes des autres : il y a alors **compression**, c'est-à-dire augmentation locale de pression ;
- tantôt écartées les unes des autres : il y a alors une **dépression** ou encore une diminution locale de pression.

Une onde sonore est la propagation de vibrations mécaniques ; elle s'accompagne de **variations locales de la pression de l'air**. Ces variations de pression sont de l'ordre de 0,1 Pa, soit un millionième de la valeur de la pression atmosphérique.

Dans l'air, la propagation du son se traduit par la mise en vibration, de proche en proche, des molécules de part et d'autre de leur position moyenne. Il en résulte des variations de pression dans tout l'espace perturbé par l'onde sonore.

Dans les milieux condensés, c'est-à-dire les milieux solides ou liquides, le mécanisme de propagation est analogue. Toutefois, les amplitudes de déplacement des molécules sont encore plus faibles.

L'expérience de propagation d'une perturbation le long d'un ressort donne une bonne image de ce qui se passe, à l'échelle microscopique, pour la propagation du son dans un milieu matériel.



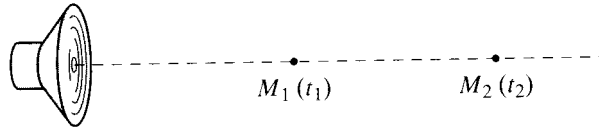
La propagation du son s'effectue sans déplacement global de matière.



II) La vitesse de propagation du son

1) Définition

Considérons un haut-parleur émettant un son. La perturbation passe au point M_1 à la date t_1 ; elle se propage et passe au point M_2 à la date t_2 .



La vitesse V du son est définie par :

$$V = \frac{d(M_1, M_2)}{t_2 - t_1}$$

$d(M_1, M_2)$ est la distance entre M_1 et M_2 , exprimée en mètre (m)

$t_2 - t_1$ est la durée, en seconde (s) ; V est en mètre par seconde (m/s)

2) La vitesse du son dans l'air

La vitesse de propagation ne dépend pas des caractéristiques du son émis, mais de la température de l'air. On la calcule à l'aide de la relation :

$$c(\theta) = 331,4 + 0,607 \times \theta \quad c \text{ en m/s} \quad \theta \text{ en } ^\circ\text{C}$$

La vitesse de propagation du son dans l'air est d'environ 340 m/s à la température ordinaire ($\approx 20^\circ\text{C}$).

3) La vitesse dépend du milieu de propagation

Le son se propage à la fois dans les gaz, les liquides, et les solides.

Les solides conduisent très bien le son : le stéthoscope médical, par exemple, est basé sur ce principe.

La différence de vitesse du son dans les solides est utilisée pour l'étude géologique de la croûte terrestre en analysant l'écho sonore créé par une explosion souterraine.

La vitesse du son dépend du milieu de propagation. Elle est plus importante dans les solides et les liquides que dans l'air.



III) L'onde sonore sinusoïdale

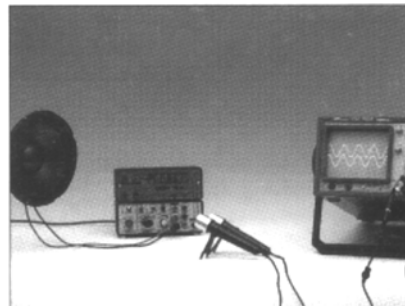
Alimentons un haut-parleur à l'aide d'un générateur B.F. délivrant des signaux sinusoïdaux. Un petit microphone M_1 relié à un oscilloscope permet d'explorer le milieu dans lequel l'onde se propage.



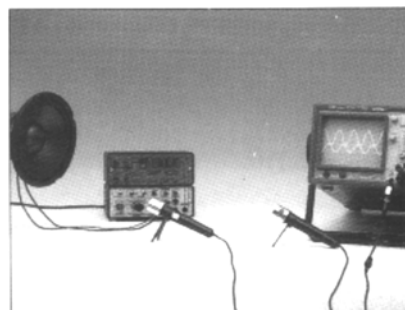
Nous constatons que M_1 détecte des vibrations sonores quelle que soit sa position : tout l'air environnant le haut-parleur est le siège de vibrations.

Sur l'écran apparaît une **sinusoïde** : les vibrations perçues sont sinusoïdales. Mesurons pour quelques positions de M_1 la fréquence et l'amplitude de cette sinusoïde : la fréquence est toujours la même, mais l'amplitude décroît lorsqu'on s'éloigne du haut-parleur.

Plaçons côte à côte deux microphones identiques M_1 et M_2 que nous relierons à chacune des voies de l'oscilloscope. Nous observons deux sinusoïdes identiques que nous pouvons superposer : M_1 et M_2 reçoivent en même temps des vibrations identiques.



Déplaçons maintenant lentement M_2 en l'éloignant du haut-parleur. Les deux sinusoïdes se décalent. Ce décalage horizontal est dû à la propagation des vibrations : M_2 qui est plus loin du haut-parleur que M_1 , reçoit les mêmes vibrations que M_1 , mais un peu plus tard.



Une onde sonore se propage. Puisque l'amplitude des vibrations diminue lorsqu'on s'éloigne du haut parleur, nous dirons que **l'onde sonore s'amortit**.

Un haut-parleur alimenté par un générateur de signaux électriques sinusoïdaux de basse fréquence est une source d'ondes sonores sinusoïdales.



IV) Les propriétés de l'onde sonore sinusoïdale

L'étude précédente nous montre que le phénomène étudié dépend du temps et de l'espace (c'est-à-dire de la position du microphone).

1) La périodicité temporelle

Intéressons-nous à ce qui se passe en un point donné. Pour cela, plaçons un microphone en ce point.

À l'aide de l'oscilloscope, relié au microphone et au générateur B.F., nous constatons que les signaux reçus sont **périodiques** ; ils ont la même fréquence f et la même période temporelle T que la tension électrique délivrée par le générateur B.F., servant à exciter le haut-parleur.

T est la période temporelle de l'onde sonore. En un point donné, pour des durées successives égales à T , le signal capté est le même.

La période temporelle de l'onde est fixée par le générateur alimentant le haut-parleur.

$$\text{A la périodicité temporelle } T \text{ est liée la fréquence telle que : } f = \frac{1}{T}$$

2) La périodicité spatiale

Utilisons les deux microphones précédents. Plaçons-les tout d'abord côte à côte, face au haut-parleur. Sur l'écran de l'oscilloscope, il est alors possible de superposer les deux sinusoïdes : M_1 et M_2 reçoivent en même temps des vibrations identiques. Les vibrations détectées sont maximales en même temps : on dit qu'elles sont en phase.

Déplaçons lentement M_2 parallèlement à l'axe du haut-parleur, M_1 restant fixe. Les sinusoïdes se décalent horizontalement : les vibrations détectées sont déphasées.

Pour une nouvelle position de M_2 , les vibrations reçues par M_1 et M_2 sont à nouveau maximales en même temps : elles sont encore en phase.

Continuons d'éloigner M_2 . Pour des positions successives équidistantes, nous retrouvons des signaux en phase.

L'onde présente une périodicité spatiale pour deux points quelconques séparés par une distance particulière, les vibrations reçues sont en phase.

La longueur d'onde λ est la plus petite distance séparant deux positions pour lesquelles les signaux sonores sont en phase.

La longueur d'onde est la période spatiale.

Ainsi, des signaux arrivant en phase en deux points distants d'un nombre entier de longueurs d'onde seront en phase.



3) La relation entre la périodicité temporelle et la périodicité spatiale

La longueur d'onde λ dépend de la fréquence, donc de la période temporelle T .

Le rapport constant λ/T s'exprime dans les mêmes unités qu'une vitesse (m/s). Il ne dépend pas de la période ou de la fréquence de l'onde; la valeur obtenue est égale à la vitesse V du son.

Nous écrivons la relation :

$$\boxed{V = \frac{\lambda}{T}} \quad \text{ou} \quad \boxed{V = f \times \lambda}$$

λ est la longueur d'onde, en mètre (m) ; T la période, en seconde (s) ;

f la fréquence, en hertz (Hz) ; V la vitesse de propagation, en mètre par seconde (m/s)

À partir de : $V = \frac{\lambda}{T}$, nous obtenons : $\boxed{\lambda = V \times T}$

La longueur d'onde λ de l'onde sonore sinusoïdale est la distance parcourue par le son pendant une période de vibration de la source.

La vitesse du son est indépendante de la fréquence de l'onde : elle permet ainsi aux auditeurs d'un concert, placés loin de l'orchestre, d'entendre en même temps les sons graves et les sons aigus émis simultanément.

4) Le son transporte de l'énergie.

a) L'énergie acoustique

Un bruit très intense, tel celui d'une explosion, peut provoquer une rupture du tympan. Un avion qui franchit le «mur du son» produit un bruit suffisamment intense pour casser les vitres.

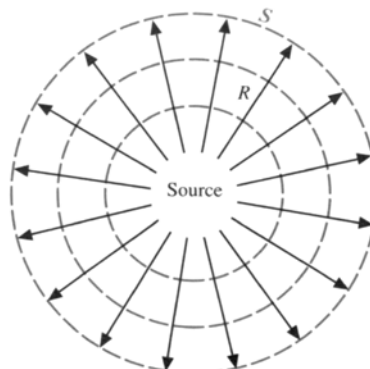
Des sons très aigus émis par la voix d'une chanteuse peuvent briser des verres de cristal.

Lorsque l'onde sonore parvient au tympan, les surpressions et dépressions successives le font vibrer : l'onde sonore lui communique de l'énergie sous la forme de vibrations. Nous appellerons cette énergie : énergie acoustique.

Le son transporte de l'énergie.

b) L'intensité acoustique

Soit une source ponctuelle qui émet un son de puissance P , se propageant uniformément dans toutes les directions, à chaque instant, la surface atteinte par l'onde sonore est une sphère d'aire S .





On appelle **intensité acoustique**, notée I , la **puissance acoustique reçue par unité de surface du récepteur** ; elle s'exprime en **watt par mètre carré (symbole : W/m^2)**.

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

I en W/m^2

Soit I_1 l'intensité du son à la distance R_1 de la source et I_2 l'intensité à la distance R_2 .
L'intensité du son décroît en raison du carré de la distance à la source :

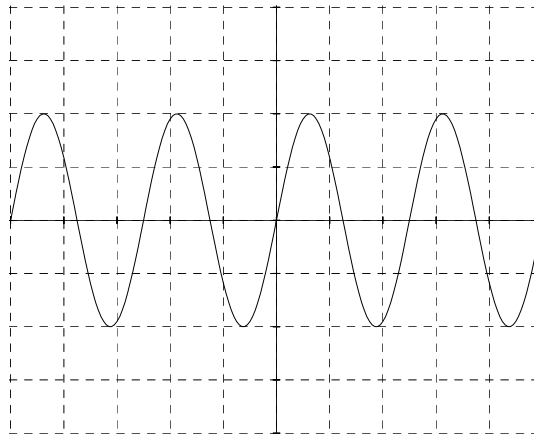
$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2^2}{R_1^2}$$

L'intensité acoustique minimale perçue par l'oreille humaine est de l'ordre de $10^{-12} W/m^2$: c'est le **seuil d'intensité acoustique**.

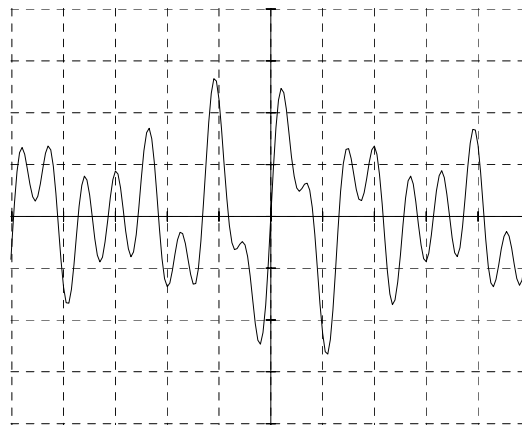
Des puissances acoustiques trop élevées, reçues par le tympan, provoquent des sensations douloureuses ; elles peuvent même entraîner une rupture du tympan. Le **seuil de douleur** est estimé à **25 W**.

V) Son pur et son complexe

Un son pur est un son obtenu à partir d'une seule fréquence.

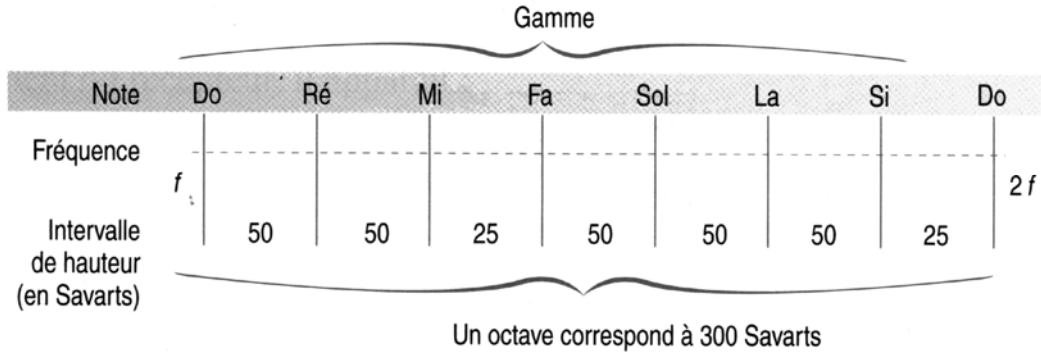


Un son complexe est la superposition d'un son fondamental et d'harmoniques. Les harmoniques de rang 2, 3, 4, ... sont toujours des multiples de la fréquence du fondamental. La somme de deux fonctions sinusoïdales de fréquence f et $2f$ est une fonction périodique de fréquence f .





Pour couvrir l'ensemble des sons audibles, on utilise 11 gammes. Une gamme correspond à un ensemble de hauteurs équivalant à une octave.



La note de référence est celle du **La de la gamme numérotée 3** et sa fréquence est fixée à **440 Hz**

VI) L'oreille

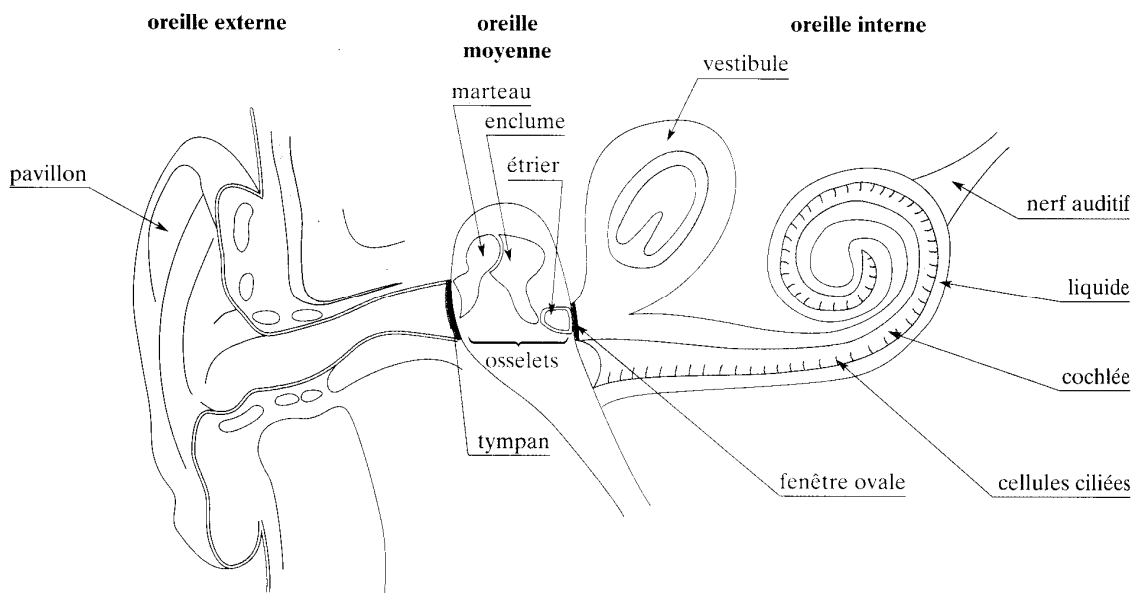
1) Description et fonctionnement

L'oreille comporte trois parties : l'oreille externe (pavillon et conduit auditif, l'oreille moyenne (tympan et chaîne des osselets) et l'oreille interne (cochlée, vestibule, ...).

Le pavillon capte les sons qui sont acheminés au tympan par le conduit auditif d'environ 25 mm de longueur.

Dans l'oreille moyenne, les vibrations du tympan sont communiquées aux osselets : le marteau, l'enclume et l'étrier.

L'étrier, s'appuyant sur la fenêtre ovale qui délimite l'entrée de l'oreille interne, transmet au liquide entourant la cochlée une pression égale à trente fois la pression acoustique reçue par le tympan.



L'oreille est un capteur de pression.

Les rangées de cellules ciliées de la cochlée, excitées par les vibrations du liquide de l'oreille interne, engendrent des messages nerveux transmis au cerveau par le nerf auditif constitué par un réseau de 35 000 fibres.



2) Les fréquences audibles

Une oreille normale perçoit les sons de fréquences comprises entre 15 et 20 000 Hz, cet intervalle s'amenuisant avec l'âge.

	30	300	1250	16 000	
INFRASONS (inaudibles)	GRAVES	MEDIUM	AIGUS	ULTRASONS (inaudibles)	

3) La sensation auditive et le niveau d'intensité acoustique

Le système auditif humain est d'une très grande sensibilité : il peut détecter des sons provoquant des déplacements du tympan de l'ordre de 10 nm !

Les sons audibles ont une intensité acoustique comprise entre 10^{-12} W/m² (seuil d'audibilité) et 100 W/m² (seuil de douleur).

Dans une salle où un haut-parleur fonctionne, l'ajout d'un second haut parleur ne change guère la sensation auditive. L'intensité acoustique double, mais l'oreille ne perçoit pas un son deux fois plus fort.

Ainsi, on définit une grandeur liée à la sensibilité de l'oreille, appelée **niveau d'intensité acoustique**.

Le niveau d'intensité acoustique L (L comme « level » en anglais) est défini par :

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

I_0 est une intensité acoustique de référence

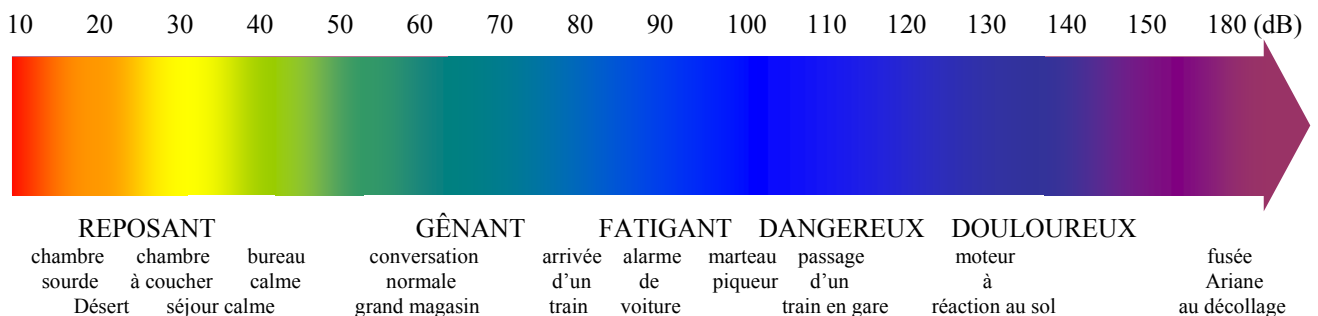
On a choisi $I_0 = 10^{-12}$ W/m² qui est le seuil d'audibilité.

L s'exprime en **décibel** (symbole dB) et se mesure avec un sonomètre.

Quand l'intensité acoustique est multipliée par deux, le niveau d'intensité acoustique augmente de 3 dB.

La sensation auditive n'est pas proportionnelle à l'intensité acoustique I ; elle est liée au niveau d'intensité acoustique L .

Le document ci-dessous donne quelques valeurs de niveaux d'intensité acoustique.

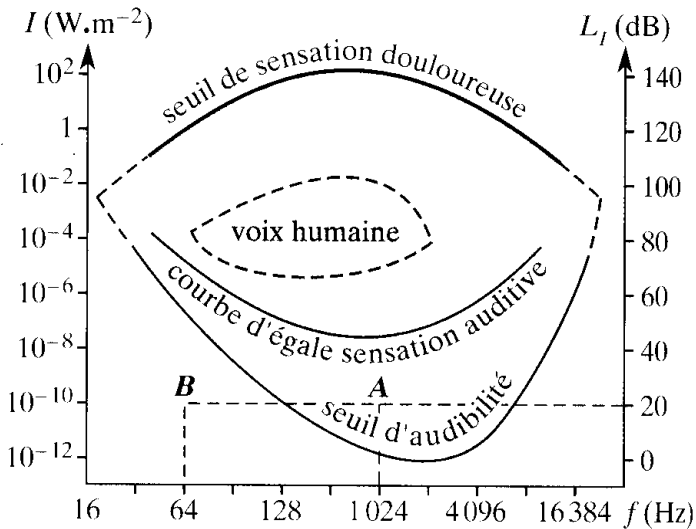




4) La sensation auditive et la fréquence

L'oreille perçoit différemment des sons de même niveau d'intensité acoustique, mais de fréquences différentes.

Par exemple, un son de niveau d'intensité acoustique de 20 dB est entendu lorsqu'il est émis à 1 024 Hz (point A) alors qu'il ne l'est pas à 64 Hz (point B).



Le document ci contre donne des courbes d'égale sensation auditive ainsi que les seuils d'audibilité et de douleur en fonction de la fréquence.

Le **seuil d'audibilité** correspond au niveau d'intensité acoustique minimum qui provoque une sensation perçue par l'oreille. Le **seuil de douleur** correspond au niveau d'intensité à partir duquel la sensation devient insupportable et dangereuse pour l'organisme

5) La stéréophonie

L'audition binaurale (ou par les deux oreilles) augmente peu le niveau acoustique perçu ; en revanche, elle permet de déterminer la direction d'une source sonore, donc de la localiser dans l'espace.

L'oreille la plus proche de la source perçoit le son un peu plus tôt et avec une intensité sonore un peu plus grande que l'autre oreille. Le cerveau interprète ces différences pour localiser la source sonore.

Lorsque l'on écoute le son produit par une seule enceinte acoustique, tous les sons émis proviennent de la même source. Or, lors de l'enregistrement d'un concert, par exemple, les sources sonores sont réparties dans l'espace. L'émission monophonique (avec une seule enceinte) ne pourra pas reproduire la répartition spatiale qui donne le relief sonore du son d'origine.

La stéréophonie est un système de reproduction sonore qui restitue l'impression de répartition des sources sonores dans l'espace. L'enregistrement en stéréophonie consiste à placer plusieurs (au moins deux) microphones, par exemple l'un à droite et l'autre à gauche de la scène.

Les signaux captés par les deux microphones sont enregistrés et traités séparément. La reproduction du son en stéréophonie nécessite alors deux enceintes acoustiques, chaque enceinte restituant l'enregistrement du microphone correspondant.

