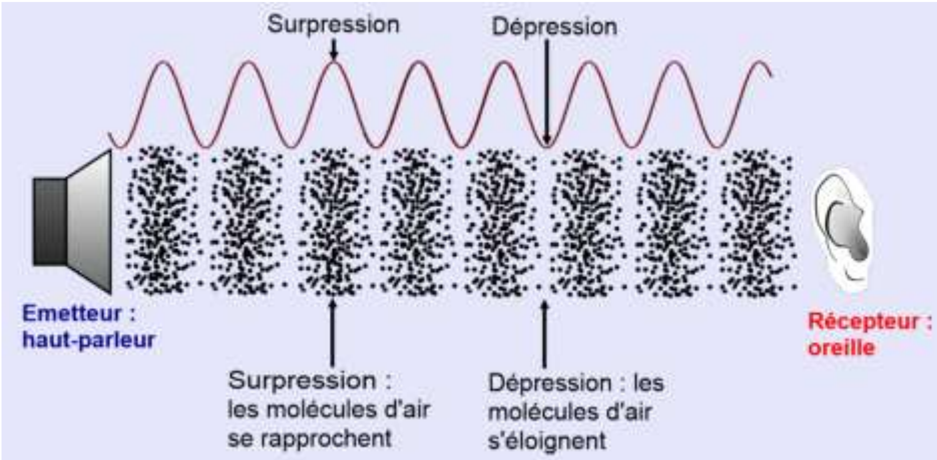
Le son

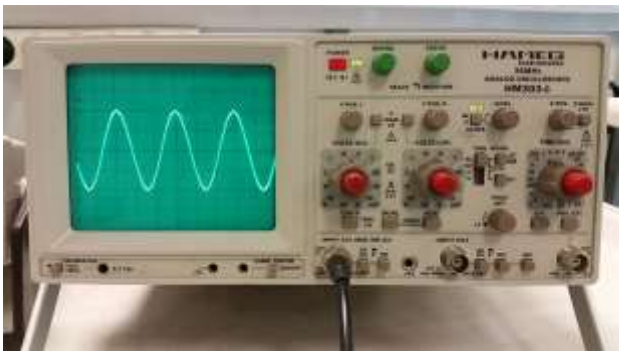
1) Nature du phénomène son

Le son est une perturbation de la pression de l'air qui se propage à la vitesse de 340 m/s au niveau du sol. On parle **d'onde acoustique**.



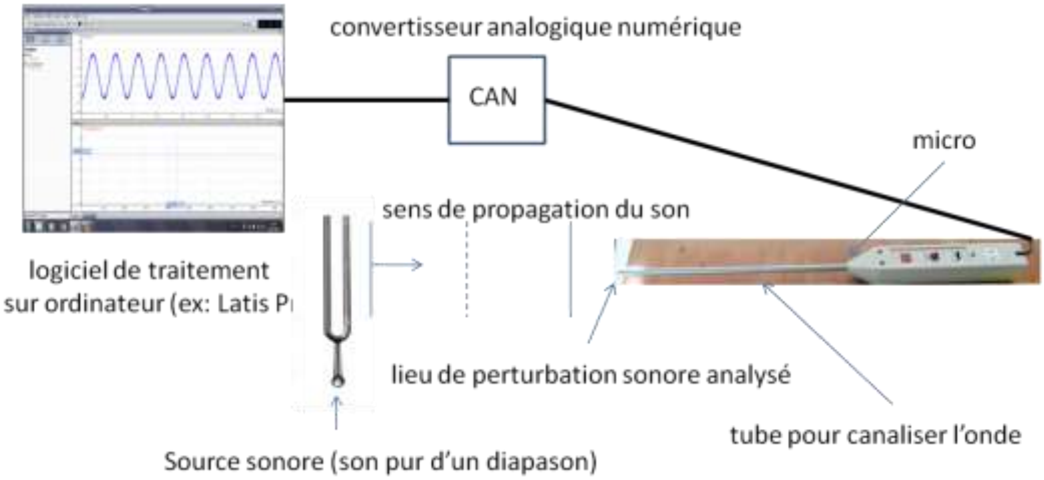
Un son peut être capté par la membrane d'un microphone laquelle génère par sa vibration un courant électrique puis une tension analogique qui peut être visualisée de deux manières :

- A l'aide d'un **oscilloscope**, qui fera apparaitre sur l'écran un signal de tension analogue



Type de signal obtenu pour un micro placé devant un diapason en train de vibrer

- A l'aide d'un **convertisseur analogique numérique (CAN)** et d'un ordinateur sur l'écran duquel apparaitra une suite discrète de points dont on peut choisir la fréquence d'échantillonnage afin de ne pas trop perdre d'informations sur le signal à analyser. Il est à noter que ce genre de dispositif tend à supplanter l'oscilloscope analogique dont il peut réaliser toutes les fonctions et bien plus, grâce à la numérisation, comme l'analyse de Fourier du signal.

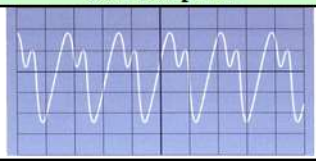
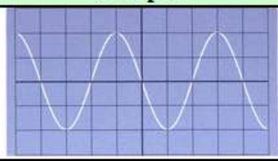


Dispositif utilisé au lycée La Salle Passy-Buzenval

2) Types de sons et analyse d'un son

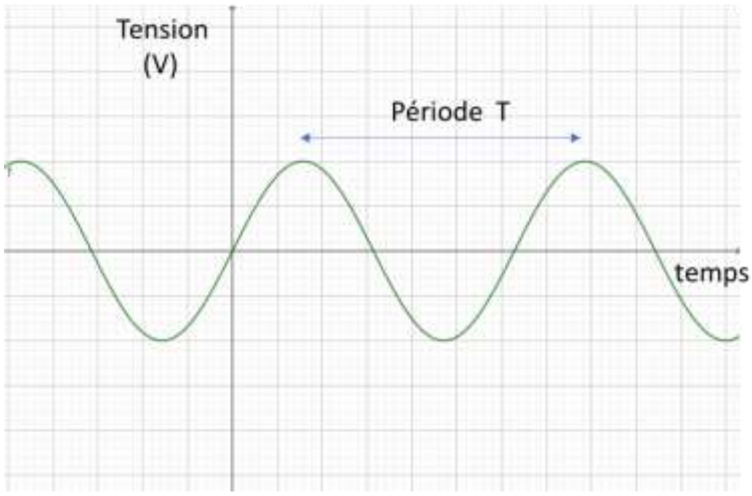
Il existe deux types de sons :

- Les sons purs : ils sont très rares, c'est le cas du son émis par un diapason. L'analyse d'un tel son fait apparaitre à l'oscilloscope un signal sinusoïdal
- Les sons complexes : ils correspondent à la plupart des sons allant de sons musicaux à du bruit, même si la différence entre ces deux dernières catégories n'est pas vraiment franche.

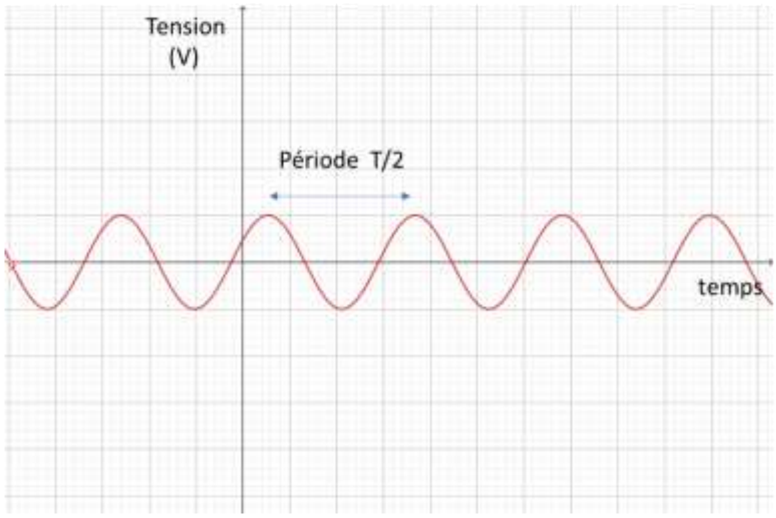
		Son complexe	Son pur
Forme du signal			
Définition	Signal confus, désordonné	Il présente un signal périodique (« composé de motifs qui se répètent régulièrement ») que l'on appelle son « timbre »	
		Signal périodique mais non sinusoïdal	Signal sinusoïdal
Exemples de sources	Claquement de porte, ambiance de la rue,…	Toutes sources animées d'un **mouvement vibratoire**	
		Une lame métallique fixe, une corde tendue, un haut-parleur alimenté par un générateur basse fréquence (GBF), une corde vocale	Un diapason lorsqu'il est frappé 

Génération d'un son complexe :

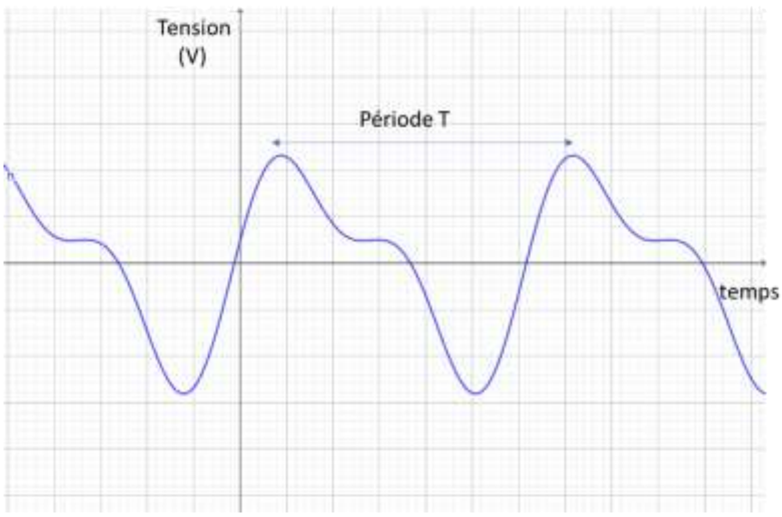
A l'aide d'un générateur basse fréquence (GBF) relié à un haut-parleur on peut générer un son « presque » pur de fréquence choisie visualisable à un mètre de distance face au haut-parleur avec un oscilloscope sous la forme :



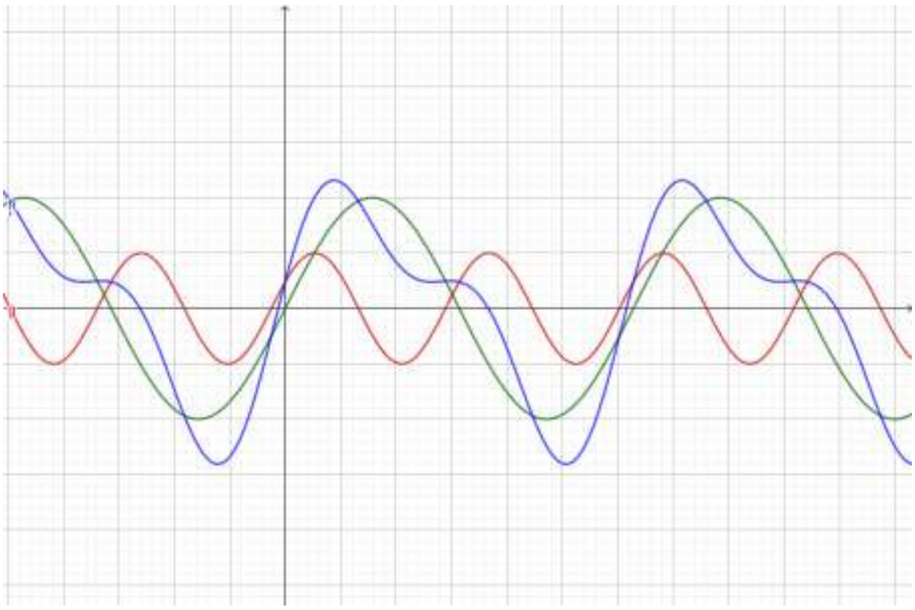
Supposons qu'un second générateur de même type réglé sur une fréquence double et avec une amplitude différente donne un son « presque » pur visualisé comme dans la situation précédente sous la forme



Alors, en faisant marcher les deux générateurs ensembles, on visualise à l'oscilloscope un signal de la forme :

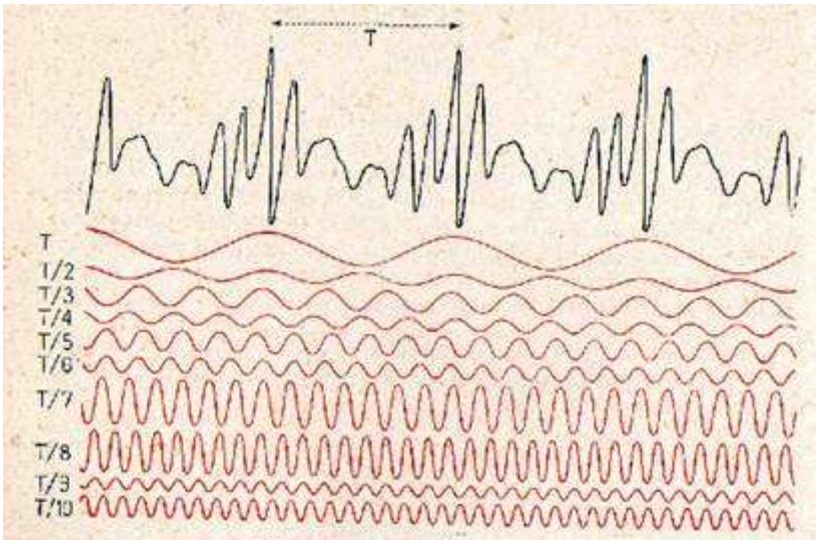


Nous avons porté sur un même graphique les trois signaux de tension, celui en bleu étant la somme de celui en vert et celui en rouge.



<u>Analyse d'un son complexe</u> :

Tout son complexe peut être vu comme produit par un ensemble de sources de sons purs comme des sortes de diapasons de fréquences différentes (Rappelons que les diapasons employés dans le domaine musical ont toujours la même fréquence, 440 Hz, car ils servent à accorder les instruments). La figure ci-dessous montre le signal donné par le son d'un basson ainsi que la décomposition de ce son en ses principales composantes sinusoïdales constituées dans ce cas d'un son pur fondamental, celui de plus grande période, et de sons purs dits harmoniques de périodes qui sont des divisions entières de la période du fondamental, T/2, T/3, T/4,etc, donc de fréquences qui sont des multiples de la fréquence fondamentale 2 f, 3 f, 4 f, etc...



265. Analyse du timbre du basson.

L’oreille humaine réalise elle-même la décomposition d’un son grâce à des cellules ciliées qui, selon leur longueur, résonnent en quelque sorte au passage de l’onde dans le canal cochléaire à une fréquence spécifique et transmettent un message au cerveau via le nerf auditif. Les cellules ciliées en début de canal réagissent aux aigus et celles en fin de canal aux graves.

3 Caractéristiques d’un son pur : fréquence et intensité

Un son pur se visualise à l’oscilloscope analogique ou numérique (CAN) sous forme d’une tension sinusoïdale analogue à la surpression acoustique $\Delta p = p - p_0$ régnant au point où on a fait la mesure, p étant la pression en ce point et qui varie à tout instant du passage de l’onde, p_0 étant la pression constante régnant dans tout l’espace et dans le temps en l’absence de perturbation sonore.

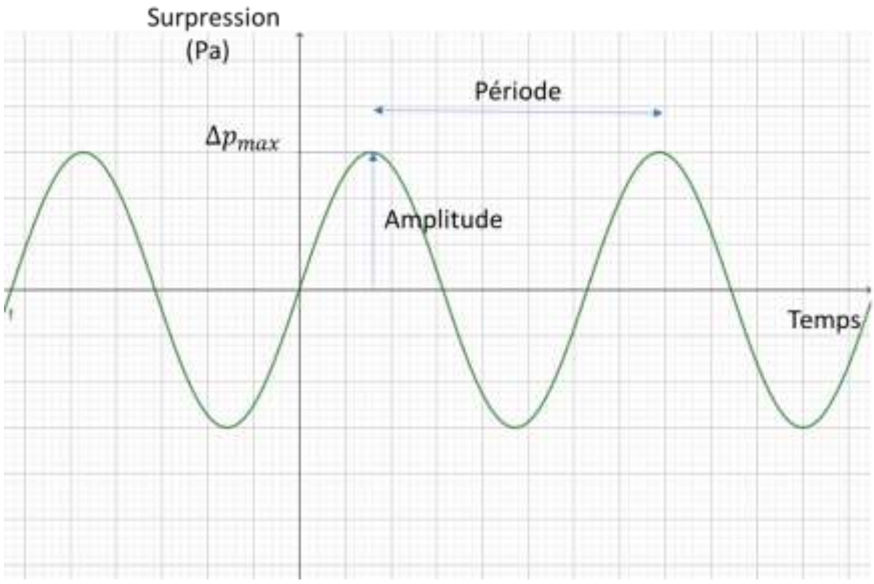
Le signal sinusoïdal de pression présente alors deux caractéristiques, une période à laquelle est associée une fréquence, et une amplitude.

La période T est la durée sur laquelle se produit un motif. La fréquence f est le nombre de motif produits par seconde. La relation entre période et fréquence est donc :

$$\boldsymbol{f \times T = 1}$$

formule dans laquelle f est en Hertz (Hz) et T en secondes (s)

L’amplitude est la valeur maximale atteinte. Elle correspond donc à une surpression acoustique Δp_{max} maximum.

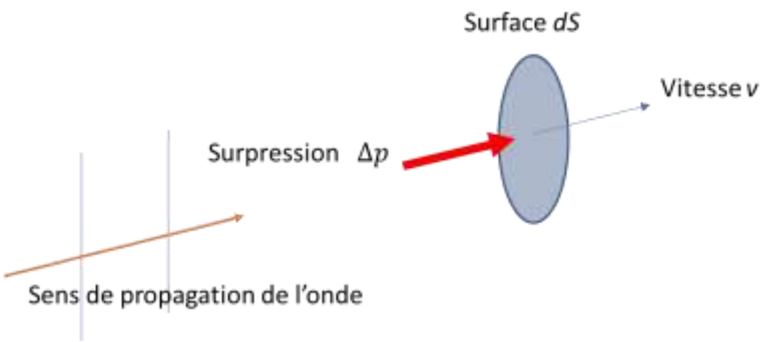


Avant d’aborder la notion d’intensité sonore, disons un mot sur le concept de travail d’une force. Imaginons un cheval qui tire une charrette en exerçant une force de 1000 N sur une distance de 100 m. Alors ce cheval exerce sur la charrette un travail égal au produit de l’intensité de la force par le déplacement opéré dans le sens de cette force. Il est noté W (work en anglais) et s’exprime en Joule. Il vaut dans notre exemple $W = 1000 \times 100 = 100\ 000\ J = 100\ kJ$. Si le cheval a mis un temps $\Delta t = 40\ s$ pour produire ce travail, on définit la puissance de la force qu’il a exercé comme étant le travail opéré par cette force par unité de temps (la seconde) soit :

$$P = \frac{W}{\Delta t} = \frac{100\ 000}{40} = 2\ 500\ W$$

Si la force est variable au cours du temps, on définit la puissance instantanée de cette force, comme étant le produit de l'intensité de cette force par la vitesse du point qu'elle déplace, si toutefois ce dernier se déplace dans la direction de son action.

Voyons ce qu'il en est dans le domaine acoustique.



Considérons une surface dS très petite, on dit élémentaire, en un point de l'espace. Le centre de cette surface ayant à un instant donné une vitesse v, dû au passage de l'onde sonore, la force exercée sur cette surface, qui est égale au produit de la variation de pression Δp (exprimée en pascals, symbole Pa) par la surface, a une puissance instantanée :

$$P = \Delta p \ \times dS \times v$$

On peut ainsi faire apparaitre une puissance instantanée par unité de surface :

$$\frac{P}{dS} = \Delta p \ \times v$$

L'intensité sonore est alors la valeur moyenne de cette dernière. Elle se note I et s'exprime en watt par mètre-carré de symbole W/m^2. C'est cette intensité sonore qui, si elle dépasse un certain seuil, peut endommager nos tympans ou bien nos cellules ciliées, produisant une baisse d'audition précoce ou bien des phénomènes d'acouphènes.

Voici un exemple de calcul avec un son parvenant sur un tympan de surface $S = 60\ mm^2$ avec une intensité $I = 10^{-1}\ W/m^2$ qui correspond, comme nous le verrons plus loin, à un niveau de 110 dB et qui peut provoquer une baisse d'audition irréversible.

La puissance moyenne absorbée par le tympan est :

$$P = I \times S = 10^{-1} \times 60 \times 10^{-6} = 6 \times 10^{-6}\ W = 6\ \mu W$$

et sur une durée d'exposition de $\Delta t = 10$ minutes, cela donne une énergie absorbée de :

$$E = P \times \Delta t = 6 \times 10^{-6} \times 600 = 3{,}6 \times 10^{-3} J = 3{,}6\ mJ$$

On démontre, grâce aux équations de l'acoustique, que l'intensité d'un son pur est proportionnelle au carré de la variation de pression maximale, soit :

$$\boxed{I = k \times (\Delta p_{max})^2}$$

4) Intensité sonore d'un son complexe-sonomètre

On définit comme pour un son pur, l'intensité de toute onde sonore, que ce soit un son complexe ou un bruit. Cette intensité dépend du point où on la considère et elle se mesure à l'aide d'un instrument appelé **sonomètre**.

Toutefois, la valeur affichée est en décibels et non en watt par mètre-carré (Voir plus loin l'échelle des décibels)

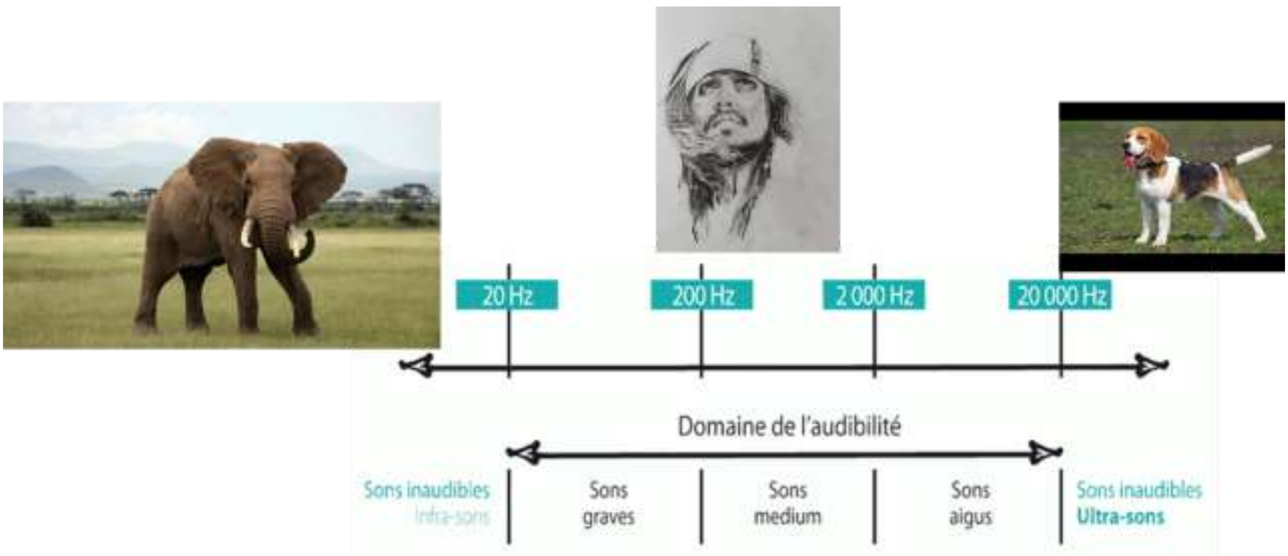
5) Sensibilités auditives de l'oreille humaine :

L'oreille humaine n'est pas aussi sensible que les capteurs physiques dont on dispose. Elle perçoit les sons dans une gamme de hauteurs (ou fréquences) et dans une gamme d'intensité.

a) Sensibilité à la fréquence sonore :

L'oreille humaine moyenne perçoit des sons dont la fréquence est comprise entre 20 Hz et 20 000 Hz. Les composantes d'un son qui se situent en dessous de 20 Hz font partie de la famille des **infrasons**. Elles ne sont pas perçues par une oreille humaine mais par certains animaux comme les éléphants.

Les composantes d'un son qui se situent au-dessus de 20 000 Hz font partie de la famille des **ultrasons**. Elles ne sont pas perçues par une oreille humaine mais par certains animaux comme les chiens ou les chauves-souris.



b) Sensibilité à l' intensité sonore :

L'oreille humaine moyenne est sensible à des sons pouvant descendre jusqu'à une intensité sonore $I_0 = 10^{-12}\ W/m^2$ et les sons les plus forts auxquels elle peut être exposée, de façon d'ailleurs destructive, sont ceux produits à proximité de volcans en éruption et dont l'intensité sonore atteint des valeurs de l'ordre de $10^8\ W/m^2$. Cette gamme de sensibilité étant très large, on a créé une échelle plus pratique appelée échelle des décibels qui mesure ce qu'on appelle le niveau d'intensité sonore. Le principe est simple. On pose que le niveau d'intensité sonore 0 dB correspond à l'intensité sonore de $10^{-12}\ W/m^2$. Puis chaque fois que l'intensité sonore est multipliée par 10, on augmente le niveau d'intensité sonore de 10 dB, comme indiqué dans le tableau :

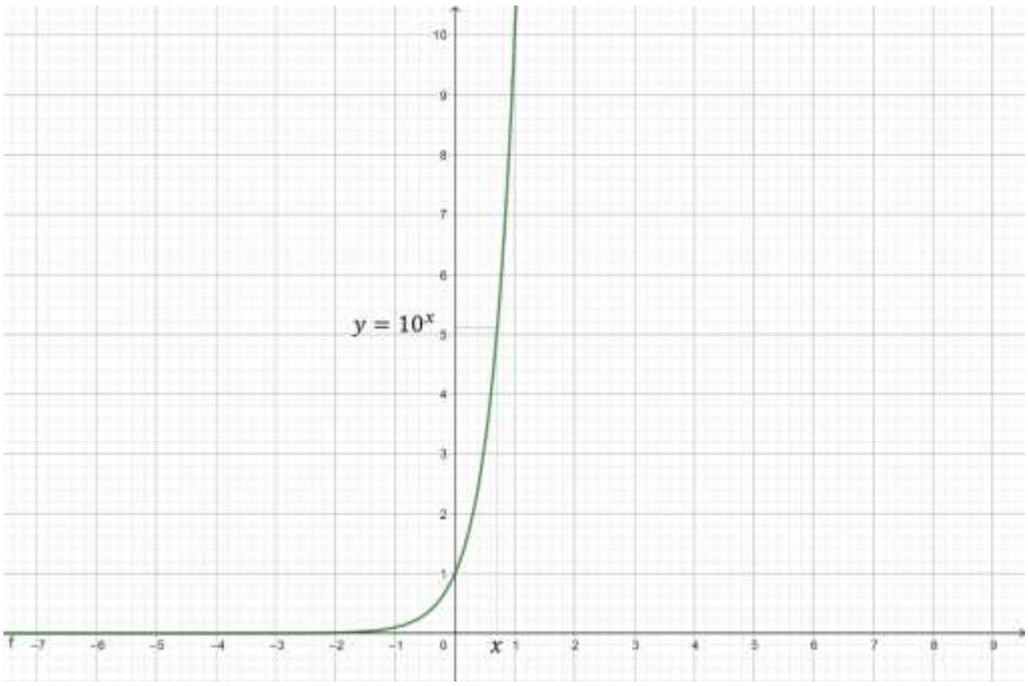
$I\ (W/m^2)$	10^{-12}	10^{-11}	10^{-10}	10^{-9}	10^{-8}	...	10^6	10^7	10^8
$L\ (dB)$	0	10	20	30	40	...	180	190	200

Ainsi, si l'intensité sonore est $I = 10^3\ W/m^2$ on écrit : $I = I_0 \times 10^{15}$ autrement dit, il faut multiplier 15 fois par 10 pour passer de l'intensité de référence I_0 à l'intensité considérée I. On multiplie alors 15 par 10 pour obtenir le niveau d'intensité sonore qui est donc de 150 dB.

Qu'en est-il alors quand I n'est pas une puissance entière relative de 10, de qui sera généralement le cas. Il nous faut trouver alors le nombre x tel que : $I = I_0 \times 10^x$ et multiplier ce nombre par 10 pour obtenir le niveau d'intensité sonore qui sera alors $L = 10\,x$ (L pour level en anglais). Ainsi nous aurons la relation entre intensité sonore en W/m^2 et niveau d'intensité sonore en dB :

$$\boldsymbol{I = I_0 \times 10^{\frac{L}{10}}}$$

Un problème se pose cependant, comment déterminer pour un nombre réel strictement positif quelconque y le nombre x tel que $y = 10^x$. La réponse vient en traçant la courbe :



Si on penche la tête et qu'on prend l'axe des y comme axe des abscisses et l'axe des x comme axe des ordonnées, on obtient la fonction réciproque qui a reçu le nom de logarithme décimal. Ainsi :

$$x = log(y)$$

On a donc pour tout réel x :

$$\boldsymbol{log(10^x) = x}$$

Le logarithme est donc un lecteur de l'exposant d'un nombre mis sous forme de puissance de 10.

On a également pour tout réel $y > 0$:

$$10^{log(y)} = y$$

Mais il y a mieux !

$$log(10^x \times 10^{x'}) = log(10^{x+x'}) = x + x' = log(10^x) + log(10^{x'})$$

Ainsi, pour tout couple de nombres strictement positifs (y, y') comme ce couple peut être mis sous forme de puissances de 10 :

$$\boldsymbol{log(y \times y') = log(y) + log(y')}$$

On pourra retenir qu'un logarithme transforme un produit en somme.

Appliqué au son, on déduit de :

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

la formule

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

Finalement :

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

<u>Exemple</u> :

Soit un son d'intensité sonore $I = 2,5 \times 10^{-2}\ W/m^2$, le niveau d'intensité sonore est obtenu à la calculette en faisant :

$$L = 10\ log\left(\frac{I}{I_0}\right) = 10\ log\left(\frac{I}{I_0}\right) = 10\ log\left(\frac{2,5 \times 10^2}{10^{-12}}\right) = 10\ log(2,5 \times 10^{10}) \approx 104\ dB$$

<u>Remarque</u> : Attention !!! Les décibels ne s'additionnent pas. Expliquons-nous. Si vous mettez deux enceintes produisant chacune une intensité sonore de 70 dB au niveau de votre tympan, vous n'aurez pas un niveau d'intensité sonore de 140 dB, ce qui endommagerait de façon irréversible votre membrane de transmission sonore. Voyons comment il faut procéder pour connaitre ce niveau.

Si on note I l'intensité sonore produite par chaque enceinte au niveau de votre tympan et L le niveau d'intensité sonore associé, le tympan reçoit l'intensité sonore $2\ I$ car les intensités sonores s'additionnent. Le niveau en décibels associé est donc :

$$L' = 10\ log\left(\frac{2\ I}{I_0}\right) = 10\ log\left(2 \times \frac{I}{I_0}\right) = 10\ \left(log(2) + log\left(\frac{I}{I_0}\right)\right) = 10\ log(2) +\ 10\ log\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

Or :

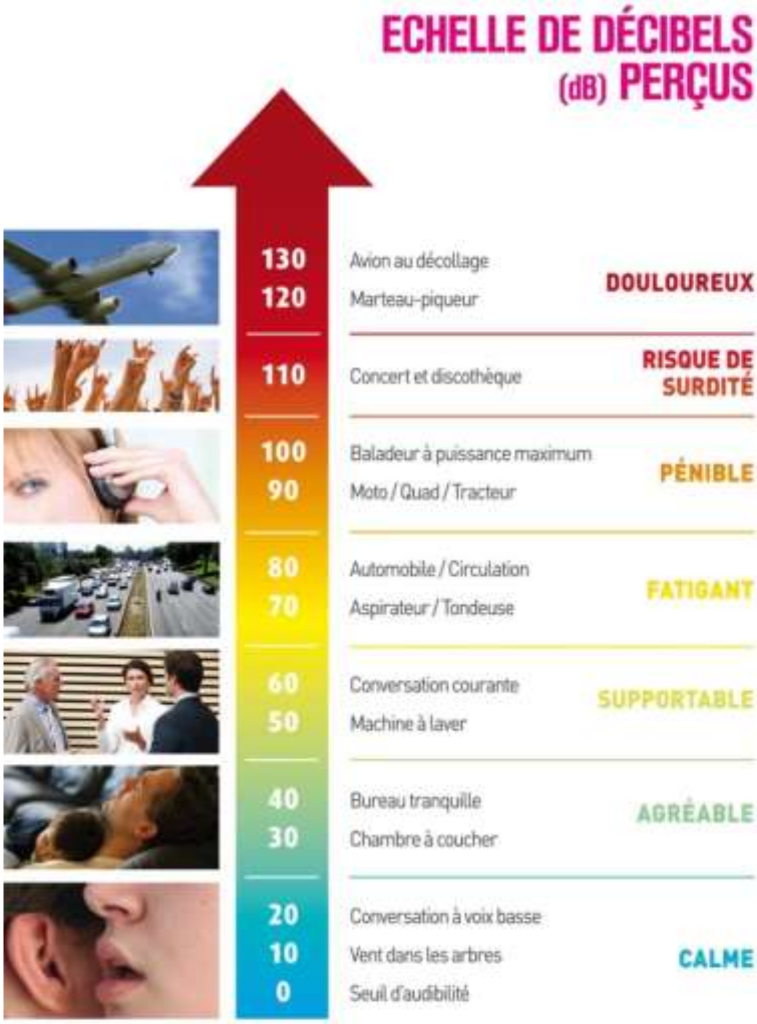
$$10\ log(2) \approx 3$$

Donc :

$$\boldsymbol{L' = L + 3}$$

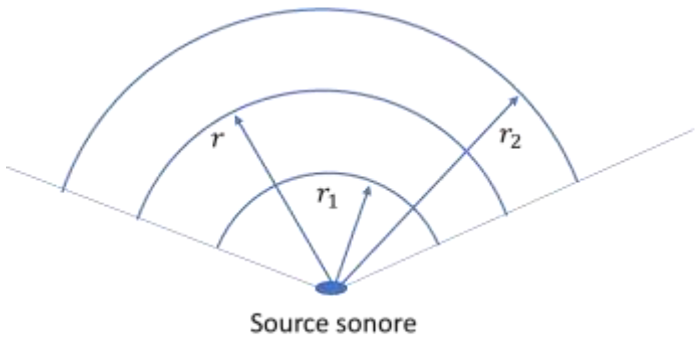
On pourra retenir qu'en doublant le niveau d'intensité sonore en un point, on augmente de 3 dB le niveau d'intensité sonore en ce point

Ci-dessous quelques exemples d'exposition humaine à différents niveaux d'intensité acoustique



6) Variation du niveau d'intensité sonore en fonction de la source

On se place à une distance de la source sonore grande devant ses dimensions de telle sorte que la source peut être considérée comme ponctuelle, émettant dans un cône tel que représenté sur le schéma :



Une portion de sphère de rayon r dont le centre serait la source et qui tel un tympan géant ou la membrane souple d'un micro capterait l'onde sonore, recevrait la puissance (énergie par unité de temps) :

$$P = I(r) \times S$$

où $I(r)$ est l'intensité sonore qui est la même en tout point de cette surface et S l'aire de la portion de sphère.

Or la surface d'une portion de sphère est tout comme la surface d'une sphère, proportionnelle au carré du rayon donc de la forme :

$$S = k\, r^2$$

Plus précisément, k est la valeur en m^2 de l'aire de la portion de sphère pour $r = 1\, m$, ce qu'on définit comme étant l'angle solide sous lequel on voit depuis son centre la portion de sphère et qui se mesure en stéradians (vient de stéréo = espace et radian) . Ainsi :

$$P = k\, I(r)\, r^2$$

Dans le cas où la source émet de la même façon dans toutes les directions, k vaut $4\,\pi$ et la formule s'écrit :

$$P = 4\,\pi\, I(r)\, r^2$$

Or l'atténuation par l'air d'une onde acoustique étant très faible, la puissance acoustique est la même pour toutes les portions de sphère associé au même angle solide. Ainsi :

$$I(r) = \frac{P}{k\, r^2} = \frac{c}{r^2}$$

où c est une constante. Autrement dit :

L'intensité acoustique associée à une source ponctuelle est inversement proportionnelle au carré de la distance à cette source.

Plus précisément, si nous considérons deux distances r_1 et r_2 quelconques, nous avons, pour les niveaux d'intensité sonore associés exprimés en décibels :

$$L(r_1) = 10\, log\left(\frac{I(r_1)}{I_0}\right)$$

$$L(r_2) = 10\, log\left(\frac{I(r_2)}{I_0}\right)$$

Soit par différence :

$$L(r_2) - L(r_1) = 10\, log\left(\frac{I(r_2)}{I_0}\right) - 10\, log\left(\frac{I(r_1)}{I_0}\right) = 10\, log\left(\frac{I(r_2)}{I_0} \times \frac{I_0}{I(r_1)}\right)$$

$$\boxed{\boldsymbol{L(r_2) - L(r_1) = 10\, log\left(\frac{I(r_2)}{I(r_1)}\right)}}$$

Or :

$$\frac{I(r_2)}{I(r_1)} = \frac{c}{{r_2}^2} \times \frac{{r_1}^2}{c} = \frac{{r_1}^2}{{r_2}^2}$$

Ainsi :

$$L(r_2) - L(r_1) = 10\, log\left(\frac{{r_1}^2}{{r_2}^2}\right) = 20\, log\left(\frac{r_1}{r_2}\right) = -20\, log\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

Donc :

$$\boxed{\boldsymbol{L(r_2) - L(r_1) = -20\, log\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}}$$

On voit ainsi qu'en doublant la distance à la source $(r_2 = 2\, r_1)$, le niveau d'intensité sonore baisse de $20\, log(2) \approx 6\, dB$.

<u>Exemple d'application</u> :

Dans certains concerts, près des enceintes (disons 1 m pour simplifier), le niveau d'intensité sonore peut atteindre les 140 dB ce qui créerait des dommages irréversibles à tout tympan qui s'y exposerait. Sachant que pour éviter un risque de surdité précoce, il vaut mieux ne pas être exposé à un niveau supérieur à 100, à quelle distance de l'enceinte un fan des guitares qui crachent doit il se placer pour avoir ses oreilles en sécurité ?

Réponse : Il faut enlever au minimum 7 fois 6 dB soit 42 dB pour passer sous la barre des 100. Il faut donc doubler la distance initiale de 1 m 7 fois, ce qui donne une distance :

$$d = 2^7 = 128\, m$$

Ami(es) des concerts tonitruants où les groupies se déchainent au premier rang sur un riff endiablé d'un Jimmy (çà c'était à mon époque, ce serait plutôt K-pop de nos jours ou autres !), je dois préciser Hendrix ou Page pour ne pas confondre avec un certain Jimin plus moderne (précise ma fille) prévoyez, si vous vous vous sentez l'âme d'une groupie ou d'un groupy, une bonne paire de boules Quiès, ou un casque audio afin de protéger vos délicats systèmes auditifs, tant du côté tympan que du côté oreille interne, et même très interne côté cellules ciliées, qui n'apprécient pas du tout les brusques montées sonores et peuvent vous le faire payer cher un jour en acouphènes.