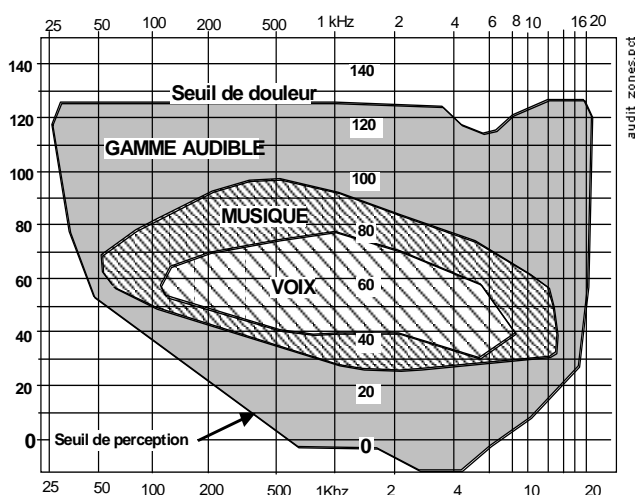


Les textes ci-dessous sont les textes bruts d'un document qui n'a jamais été fini et publié. Ils peuvent cependant vous être utiles. En particulier aux débutants en acoustique et prise de son.

Notions d'acoustique...

Le son

Le Son est un mouvement vibratoire se propageant en milieu fluide ou solide. Généralement pour le preneur de son, c'est un mouvement ondulatoire de l'air audible à l'oreille humaine.



Les sons qui intéressent particulièrement le preneur de son sont généralement compris dans la gamme des sons et intensités sonores audibles. (Fig. à gauche). C'est à dire toutes les fréquences comprises entre le « **seuil d'audibilité** » dit aussi « **seuil de perception** » ; et le « **seuil de la douleur** ». Les sons compris entre ces deux seuils sont considérés comme audible

La propagation sonore.

Lors de la génération d'un son quelconque, les ondes sonores se propagent dans l'air de la même manière que se propagent les ondes à la surface de l'eau lorsque nous y jetons un caillou.

Des cercles concentriques et séparés par des distances égales s'éloignent à une vitesse constante du point d'impact. **En aucun cas, il n'y a déplacement de l'eau.** Il suffit pour s'en convaincre de faire flotter un bouchon à proximité du point d'impact pour constater que le bouchon oscille à chaque passage d'une vague (onde), mais qu'en aucun cas, il ne suit le déplacement de celle-ci.

Il en est de même en ce qui concerne la propagation des **ondes sonores** dans l'air, avec cependant une différence notable : si au niveau de l'eau, nous ne pouvons constater cette propagation que selon un plan (la surface de l'eau), nous devons imaginer que dans l'air, cette propagation s'effectue dans les trois dimensions, telles des sphères concentriques dont le rayon de chacune d'elle augmenterait régulièrement à la vitesse de **340 m/s**. Imaginez que s'il y avait déplacement d'air, la vitesse de se courant d'air serait de 1224 km/h !

Dans de l'air calme (pas de courant d'air), chaque molécule est stable.

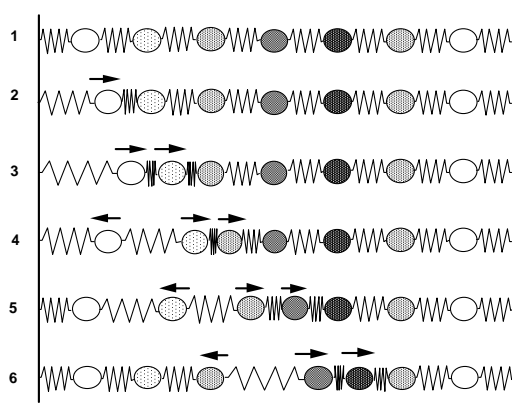
Dans le cas d'un ébranlement sonore, les molécules d'air ébranlées vont osciller sur une distance **infinitésimale**, puis revenir à leur point de repos. Les molécules sont appelées par

la viscosité de l'air que l'on peut assimiler à des "ressorts" invisibles reliant les molécules d'air entre elles.

Chaque molécule dans son mouvement va pousser la molécule suivante qui, elle même poussera la suivante, et ainsi de suite. Chaque "ressort" contribue à modifier la place dans l'air de la molécule suivante, puis à ramener la molécule à sa position initiale. Mais en même temps, il absorbe une fraction de l'énergie initiale qui a contribué à cet ébranlement. Ce phénomène oscillatoire aura donc lieu jusqu'à épuisement total de l'énergie engendrée par l'ébranlement. Le calme revenu, chaque molécule aura rejoint son point de repos, chacune ayant été ramenée par le petit « ressort » à son point de départ.

Il y a bien eu **propagation de l'ébranlement** dans l'air, et ce, à une vitesse de 340 m/s, en aucun cas il n'y a eu **déplacement** de l'air ambiant. Fig. ci dessous.

L'amortissement d'un son dû à la viscosité de l'air croît avec la fréquence.



Dit d'une autre manière, **l'élasticité de l'air** (les petits ressorts qui relient les molécules) étant constante et donc indépendante de la fréquence d'agitation des molécules, fait que plus on veut agiter rapidement ces molécules et plus il faut d'énergie. Donc pour une énergie constante, son absorption sera plus grande pour les hautes que pour les basses fréquences. De ce fait, à intensité égale, les sons aigus portent moins loin que les sons graves.

Petit exemple pratique pour mieux comprendre : Ouvrez une porte à moitié puis faites la osciller sur environ 30 ou 40 cm de battement. Si vous le faite très lentement (basse fréquence), vous n'éprouverez aucune difficulté. Mais si vous essayez d'accélérer le mouvement, très rapidement l'inertie opposée par le poids du battant vous demandera un effort considérable. L'augmentation de l'effort nécessaire (ou énergie) augmentera avec la fréquence de votre mouvement d'oscillation.

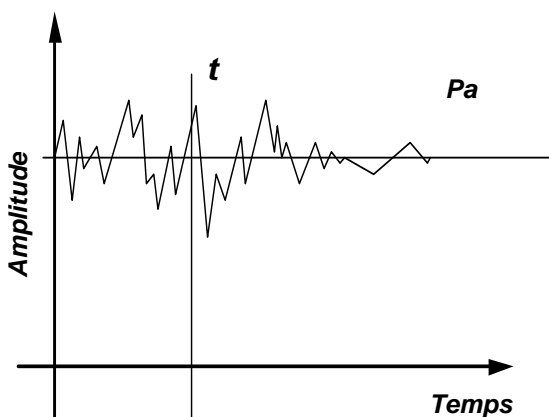
La célérité

Elle est la **vitesse de propagation de l'ébranlement sonore** dans l'air calme (vitesse de propagation des ondes) et sous une pression atmosphérique normale. Elle est de 330 m/s à 0° C et de 340 m/s à **20° C au niveau de la mer**. Ce qui sous entend qu'elle variera avec l'altitude ou avec les variations de pression atmosphériques dépendante du temps qu'il fait. Si nous reprenons l'exemple des ondes à la surface de l'eau, celles-ci s'éloigneraient du point d'impact à la vitesse de 340 m/s, soit 1224 km/h. (Tien ! la vitesse du son et le mur du même nom !)

La pression acoustique.

La **pression Acoustique** (P) est la différence de pression entre la **pression Atmosphérique** (P_o) et la **pression Totale** (P_t) à un instant donné 't'. (fig. suivante)

Partons du principe que la pression atmosphérique est stable dans le temps. Dans le cas d'un ébranlement sonore, la pression atmosphérique varie en plus et en moins autour de sa pression initiale. Si, pendant la durée de l'ébranlement sonore nous mesurons la pression à un instant "t", nous pouvons déterminer la pression acoustique (P_a) à cet instant "t" qui est égale à la pression totale (P_t) moins la pression atmosphérique (P_o). Ainsi : **$P = P_t - P_o$**



Le seuil de l'audibilité.

La **pression acoustique** (P) de **référence** (0 dB SPL) correspond au **seuil de l'audibilité** à **1 000 Hz** pour lequel une pression acoustique de **2.10^{-5} N/m²** est nécessaire afin de créer une sensation auditive en écoute binaurale effectuée en chambre sourde (niveau de bruit très faible, sans écho ni réverbération) dite aussi "**anecoïde**". On considère qu'en dessous de ce niveau de pression acoustique (0 dB SPL) l'homme n'entend rien à cette fréquence de référence.

Le **0 dB SPL** pour "**Sound Pressure Level**" pour lequel :

$$P_o = 2.10^{-5} \text{ N/m}^2 = 0 \text{ dB SPL} \quad (\text{N/m}^2 = \text{Newton par mètre carré})$$

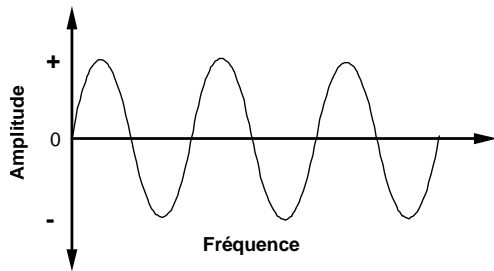
$$1 \text{ Pa} = 94 \text{ dB SPL} \quad (\text{Pa} = \text{Pascal})$$

94 dB SPL représentent une pression 50118 fois supérieure à celle du seuil de l'audibilité à 1000 Hz.

Son pur.

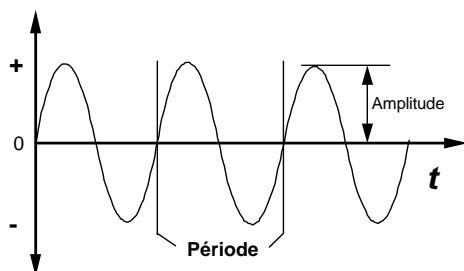
L'ébranlement de l'air produit par un diapason génère un son pur. C'est un phénomène oscillatoire périodique (de période) qui peut être représenté par une sinusoïde. (fig. ci-dessous).

Sinusoïde



Pratiquement tous les sons dans la nature sont formés non pas d'une, mais d'un ensemble de fréquences, alors qu'un son pur n'est formé que d'une seule fréquence. Un son pur ressemble assez à une note sifflée. Ainsi, certains sons d'oiseaux sont assez près de ce que l'on qualifie de « son pur ».

Sinusoïde



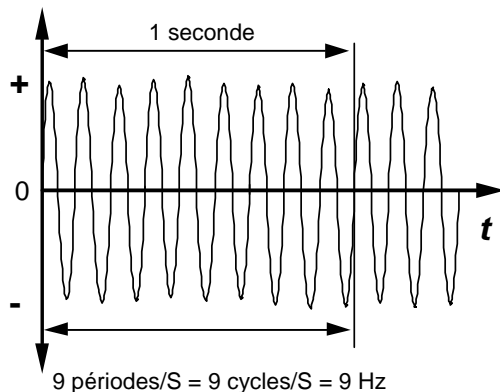
La période.

Elle est une excursion complète de la trace d'un signal quelconque dit « **périodique** » entre le moment où elle se trouve au point de repos (pression atmosphérique) et le moment où elle y revient de nouveau après être passée par les deux maxima haut et bas. (Fig. ci-contre)

L'amplitude

Elle est la "Distance" qui sépare un **maxima** du **point repos**, et ce **quelque soit la forme d'onde « périodique »**. (fig. ci-dessus).

Fréquence



La fréquence.

Nombre de **périodes** ou « **cycles** », contenus dans une seconde. (fig. ci-contre)

Formule : f = fréquence en **périodes par seconde** ou en "**Hertz**" du nom du physicien qui l'a étudié.

T = temps en secondes

$$f = \frac{1}{T} \text{ (Hz)} \quad \Rightarrow \quad T = \frac{1}{f} \text{ (s)}$$

La longueur d'onde. λ (en mètres)

La longueur d'onde est la distance parcourue par le son (à 340 m/s) pendant la durée d'une oscillation (période) de la source. (Fig. suivante).

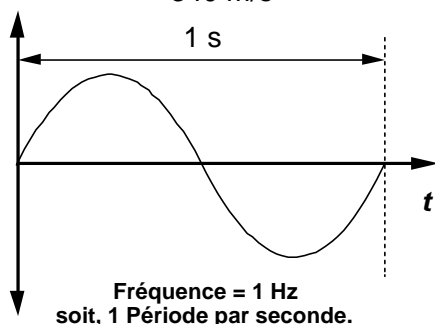
Prenons une fréquence de 1000 Hz et une durée de 1 seconde.

Pendant cette seconde, tout ébranlement sonore se sera déplacé de 340 m. Pendant ce même temps auront été générés 1000 périodes de ce son, puisque 1000 Hz est égal à 1000 périodes par seconde. Ainsi, une période aura pour **longueur d'onde** $1/1000^{\text{e}}$ de 340 m, soit :

$$340/1000 = 0,34 \text{ m ou } 34 \text{ cm}$$

Autre exemple : Prenons une fréquence de 1 Hz (infrasons), soit une période complète par seconde. Etant donnée la vitesse de propagation du son dans l'air (340 m/s), lorsque le cycle de cette période se terminera, le début du cycle de cette même période aura parcouru 340 m.

Vitesse de propagation du son dans l'air
340 m/s



Dans le cas d'une fréquence de 1 000 Hz, lorsque le cycle de cette période se terminera, le début du cycle de cette même période aura parcouru un millième de la distance de l'exemple précédent, soit :

$$340 \text{ m} / 1\,000 = 0,340 \text{ m}$$

Formule :

$$\lambda = C / f \text{ ou } \lambda = C * T \text{ et } f = C / \lambda$$

Exemple :

$$\lambda = 340 \text{ m/s} / 1000 \text{ Hz} = 0,340 \text{ m}$$

$$\lambda = 340 \text{ m/s} * 0,001 \text{ s} = 0,340 \text{ m}$$

$$f = 340 \text{ m/s} / 0,340 \text{ m} = 1\,000 \text{ Hz}$$

Pour qu'un obstacle influe sur la propagation d'une onde sonore quelconque, il faut que ses dimensions soient **égales ou supérieures** à la longueur d'onde de ce son.

Exemple : Sur un terrain herbeux, si les fréquences graves d'un cri sont parfaitement réfléchies par le terrain qui présente à ces fréquences une surface parfaitement plane et lisse, les fréquences aiguës de ce même cri sont en grande partie absorbées par l'herbe présente sur celui-ci, à partir du moment où la taille de l'herbe est égale ou supérieure aux longueurs d'ondes des harmoniques du son concerné.

La hauteur

C'est la **sensation subjective** correspondant à la fréquence du **fondamental** d'un son (voir "Sons complexes"). Elle est aussi en partie dépendante de l'intensité de ce son (voir plus loin). Ainsi, si l'on attribue le « La 440 » (La3) à un son, cela signifie que la fréquence du fondamental de ce son (fréquence la plus grave entrant dans sa composition) est de 440 Hz.

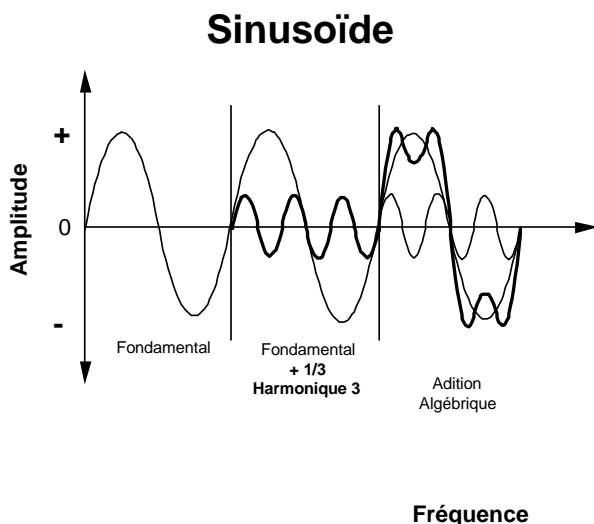
D'une autre manière nous pouvons dire que si nous sommes capable de reconnaître un « La 440 » généré par divers instruments comme étant un même et unique note, c'est parce que la fréquence du **fondamental** de ces sons est identique. C'est aussi ce qui nous permet de dire que telle note est plus aiguë ou plus grave que telle autre note.

L'octave.

En musique, l'**octave** couvre un intervalle de fréquence dans un rapport de 1 à 2. La fréquence de référence en musique est le **La3** fixé à **440 Hz**, ainsi le **La2** (octave inférieure) sera égal à la moitié, soit **220 Hz**, et le **La4** (octave supérieure) au double, soit **880 Hz**. Cette notion d'octave est aussi valable pour toutes les autres notes de la gamme.

Si en musique, la hauteur de référence est le La3 fixé à 440 Hz, en acoustique, la fréquence de référence la plus souvent utilisée est le 1 000 Hz.

Les sons complexes.



Les sons simples ou purs (composés d'une seule fréquence), **sont inexistant dans la nature** (exemple de son pur artificiel : sinusoïde issue d'un générateur de fréquence à faible taux de distorsion, son d'un diapason). Cependant, certains sons d'oiseaux peuvent s'en approcher

On démontre par le théorème de FOURIER (un truc assez compliqué) qu'un signal périodique de forme quelconque peut être décomposé en un nombre plus ou moins grand de signaux sinusoïdaux. (Fig. ci-contre)

Ainsi, si nous disposions d'un filtre passe bande à bande extrêmement étroite (qui ne laisserait passer qu'une seule fréquence à la fois), en balayant du plus grave au plus aiguë le spectre d'un son « AAAAA » généré par une voix d'homme, nous verrions apparaître une première fréquence parfaitement sinusoïdale, le **fondamental** aux alentours de 150 Hz, puis en progressant vers l'aiguë, une seconde dont la fréquence serait le double de la première, puis une 3^e dont la fréquence serait le triple de la première, et ainsi de suite...)

Inversement, le mélange de signaux sinusoïdaux de fréquences multiples émis simultanément produit un son complexe (Synthèse additive). (Fig. ci-dessus).

Le fondamental

La plupart des sons sont composés d'une fréquence appelée "Fondamental" ou "Harmonique 1" ou encore, H1 (fréquence la plus grave contenue dans le spectre du son) qui détermine la

hauteur de ce son, et de plusieurs “Partiels Harmoniques” ou “Harmoniques” dont la fréquence est un multiple entier de la fréquence du Fondamental.

Exemple : Le fondamental d’un son est 440 Hz.

Nous percevons la hauteur de ce son comme étant de 440 Hz, c’est à dire un “la”, même si ce son est en fait composé de plusieurs harmoniques qui pourraient être :

Fondamental : 440 Hz (dit aussi “Harmonique No 1”), noté fo

Harmonique No 2 : $440 * 2 = 880$ Hz

Harmonique No 3 : $440 * 3 = 1\ 320$ Hz

Harmonique No 4 : $440 * 4 = 1\ 760$ Hz

etc...

La figure suivante représente dans sa partie gauche, une période du **fondamental** d’un son.

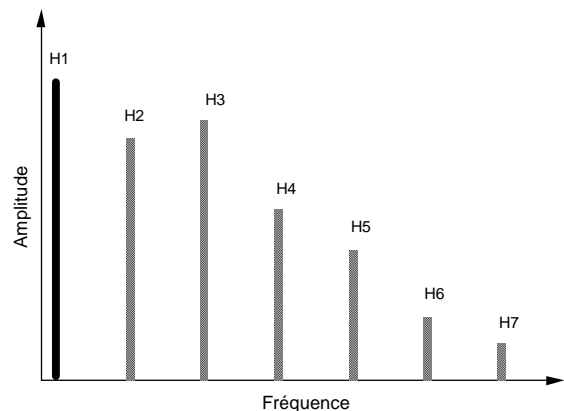
Dans la partie centrale, le **fondamental** plus l’**harmonique 3**, en gras, (3 période pendant le temps d’une période du fondamental).

Et enfin, dans la partie droite de la figure en trait gras, **la somme algébrique** du fondamental et de l’harmonique 3.

Spectre harmonique

Du nombre d’Harmoniques composant un son et de leurs amplitudes respectives dépendra en partie, la couleur de ce son. C’est entre autres à la **composition harmonique** d’un son, dit aussi “**spectre harmonique**” que nous devons de pouvoir différencier deux sons de même forme, hauteur, durée et de même intensité. Mais à lui seul, ce paramètre est insuffisant dans de nombreux cas pour permettre l’identification d’un son et (ou) de sa source.

Spectre de raies.



Un son complexe peut être représenté par un “**spectre de raies**”, où la place de chaque raie sur l’axe horizontal indique son rapport en fréquence avec le fondamental (2, 3, 4, etc. **fois** la fréquence du Fondamental). La longueur de chaque raie représente l’amplitude de l’harmonique (ou partiel) représenté. (fig. ci-contre)

Les amplitudes des Harmoniques qui composent le spectre d’un son ne forment pas toujours une série régulièrement décroissante, **certaines harmoniques sont souvent prépondérants dans le spectre sonore**. Ainsi, la fréquence du fondamental d’un son peut avoir une amplitude beaucoup moins importante que certains des harmoniques qui composent ce son.

Le timbre.

Il recouvre sous un même terme **le contenu harmonique**, ainsi que les phénomènes de **transitoires d’attaque et de fin** qui participe de façon importante à l’identification des sons complexes.

Lorsqu’on corrige un son à l’aide d’un correcteur d’aigus nommé à juste titre “CORRECTEUR DE TIMBRE”, c’est en grande partie le contenu harmonique de ce son que l’on modifie, mais aussi l’aspect de ses transitoires. De ce fait, il est très facile de dénaturer un son, surtout à l’aide des correcteurs du type **égaliseur** qui présentent aujourd’hui des gains et atténuations pouvant facilement atteindre et dépasser les ± 20 dB et grâce auxquels chaque correction peut avoir une étendue d’effet réduite au 1/3 d’octave ou moins, ce qui permet de diviser le spectre sonore en ± 31 bandes de fréquences dont l’amplitude de chacune d’elle peut-être indépendamment modifiée (Voir : Egaliseur).

Du 1er au 16eme harmonique, la décroissance globale de l’intensité est en générale voisine de 40 dB. Exception faite des sons générés artificiellement par des synthétiseurs.

L’expérience montre qu’une amplitude excessive des harmoniques de rang 7 et 9 donne un son rauque et criard.

Le bruit.

Avant de parler de bruit, il nous faut définir ce que nous entendons par « BRUIT ».

Généralement, nous utilisons ce mot en terme de « gêne ». Nous qualifions un son de « **bruit** » dès lors que celui-ci n’est pas désiré, en fait, généralement tous les sons que nous ne produisons pas nous même, que ceux-ci soit harmonieux ou non. Ceci dit :

Description physique du bruit.

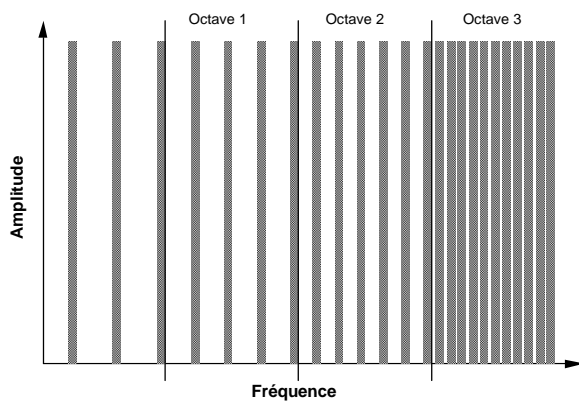
Dans le cas du Bruit (dans le sens physique du terme), on ne parle pas de composantes harmoniques, mais de **composants** ou **partiels non harmoniques**.

La grande différence entre un son composé d’harmoniques (composantes sonores, ou partiels présentant un rapport de fréquence entier avec le fondamental de ce son), et un bruit (pris dans le sens physique du terme), est que le bruit est composé de partiels ne représen-

tant pas un rapport en fréquence **entier** avec le fondamental, mais un spectre continu en fréquences.

Selon que l'énergie moyenne de ce spectre est située dans le **grave**, le **médium** ou l'**aigu**, le bruit présentera un caractère de **bourdonnement**, **métallique** ou d'un **sifflement** (SSSS), ceci pour un spectre stable et un régime continu. Dans le cas d'un son complexe composé d'harmoniques, nous ne parlerons plus en terme de "**graves**", "**médiums**" ou "**aigus**", mais de **hauteur**. Dans la plupart des cas, le spectre sera évolutif et l'enveloppe d'amplitude, caractéristique.

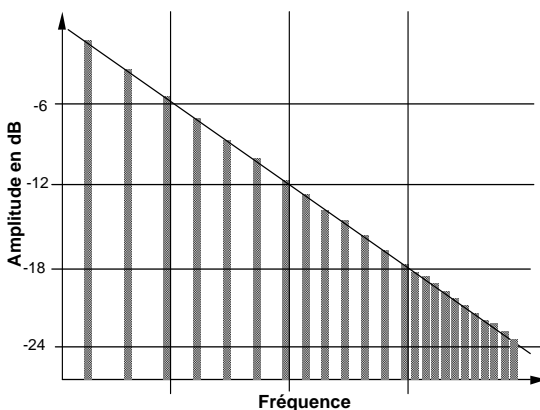
Bruit BLANC.



Le Bruit Blanc est un bruit défini par un spectre continu en fréquences où **toutes les fréquences le composant présentent une amplitude identique**. Ce type de bruit ne présente pas une énergie constante par octave, et pour cause : 100 fréquences pour l'octave de 100 à 200 Hz, 1000 fréquences pour l'octave de 1000 à 2000 Hz et 10 000 fréquences pour celle de 10 000 à 20 000 Hz. (Fig.ci-contre)

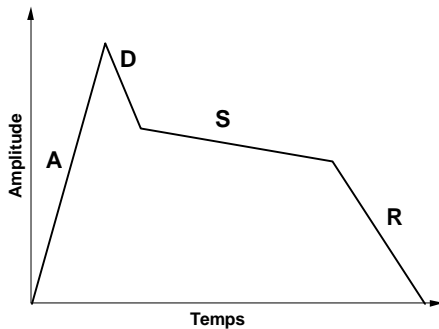
De ce fait on ne perçoit de ce bruit que les octaves les plus élevées. Celui-ci ressemble à un "CHHHHHH" prononcé d'une façon très incisive.

Bruit ROSE.



Il présente à l'origine les mêmes caractéristiques que le bruit BLANC auquel on a fait subir un filtrage de 6 dB/Octave. Ainsi, ce type de bruit présente une énergie identique par Octave puisque une atténuation de 6 dB revient à diviser l'amplitude par 2. Il est perçu comme un souffle grave (écouter le souffle inter-station sur la bande FM, si bien entendu, il reste encore de l'espace inter-station). (Fig. ci-contre).

Enveloppe d'amplitude



Nous n'avons parlé jusqu'ici que du **régime permanent** des sons, mais ce régime est la plupart du temps insuffisant pour permettre l'identification de certains sons, ceci malgré une parfaite restitution et audition et reconnaissance de leur fréquence, de leur amplitude et de leur contenu harmonique.

L'enveloppe d'amplitude nous permet **en partie** de différencier les sons entre eux. On peut grossièrement découper l'enveloppe sonore d'un son en 5 paramètres :

1 - L'attaque	A - Attack
2 - 1ère chute	D - Decay
3 - Durée	S - Sustain
4 - Chute	R - Release

Ces paramètres sont souvent libellés **A.D.S.R.** sur les synthétiseurs.

La différence entre les caractéristiques d'enveloppe d'amplitude du son d'un Piano et celles d'un Violon permet de différencier aisément ces deux instruments.

L'attaque du son d'un violon est plutôt progressive, alors que celle d'un piano est brutale.

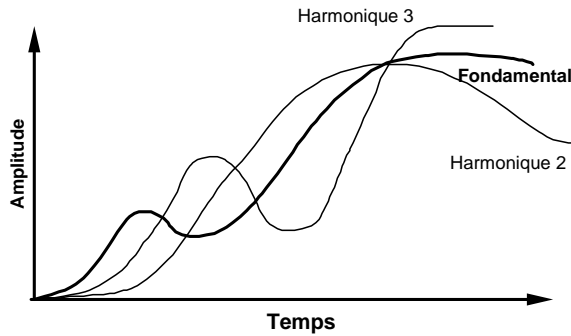
La durée d'une note de violon dépend de l'interprète, alors qu'elle est inexistante dans le cas d'un piano.

La résonance (ou Chute) est rapide pour le violon, alors qu'elle est longue pour le piano.

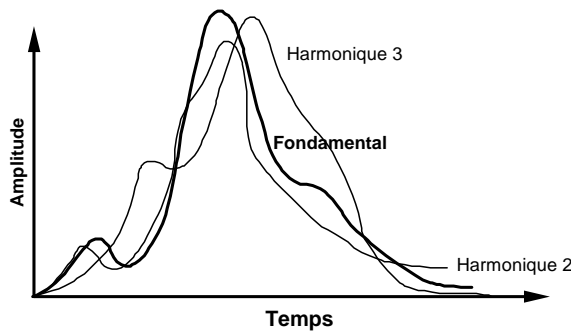
Un test très intéressant présent sur un CDROM édité par le constructeur de microphones Neumann demande de reconnaître et de re-attribuer à leurs sources les sons d'une voix de femme, d'une flûte à bec, d'un violon, et d'une clarinette. Ce simple exercice s'avère en fait particulièrement difficile et demande une grande attention, habitude et acuité auditive.

Les transitoires.

Il existe, lors de l'établissement du son, des variations importantes du niveau des différents harmoniques qui le composent et qui ne se stabilisent qu'après un certain temps (durée du phénomène de transition).(Fig.ci-dessous).



Violon



Piano

On peut alors parfaitement confondre le corps du son d'une guitare avec celui d'un violon ou même d'un cor, dont les contenus harmoniques en régime établi sont très ressemblants. C'est donc entre autres ces transitoires qui nous permettront de reconnaître, non seulement un son, mais aussi, dans le cas d'un instrument de musique, l'interprète... En cela, le violon particulièrement révélateur. Si l'instrumentiste est débutant, l'attaque sera hésitante, et le régime établi du son long à se mettre en place. Alors que dans le cas d'un musicien chevronné, l'attaque sera nette, franche, et le contenu harmonique très vite stabilisé.

Lors du montage d'une bande sonore, il faudra veiller à ne surtout pas supprimer accidentellement ces transitoires d'attaque ou de fin.

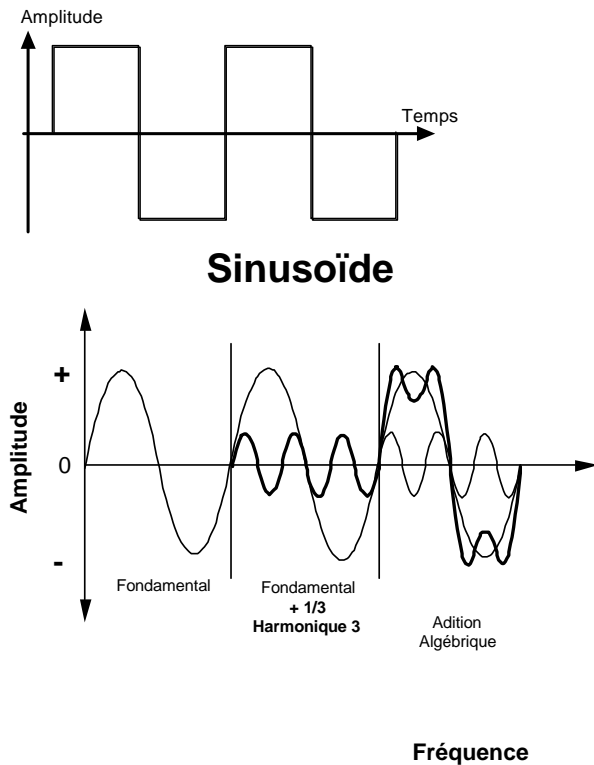
Il faut savoir que plus le phénomène transitoire est brutal et plus grande est la perturbation par rapport à l'état initial. Cette perturbation se traduisant par un enrichissement du spectre qui comporte durant ce laps de temps une gamme continue d'oscillations à toutes les fréquences, **c'est-à-dire un bruit**. Ainsi, plus le transitoire est bref, plus il est riche en partiels de fréquences élevées et plus large doit être la bande passante de la chaîne de transmission et d'amplification afin de restituer celle-ci dans son intégralité.

Partons de la représentation d'une **oscillation périodique rectangulaire** (Fig. suivante) (temps de transition théoriquement nul) **composée d'une série infinie d'harmoniques sinusoïdaux de rangs impairs** dont l'amplitude représenterait le $1/3$, $1/5$, etc. du fondamental..

C'est entre autres de ce phénomène que découle la difficulté de synthétiser parfaitement un son complexe car si certains synthétiseurs peuvent recomposer remarquablement le contenu harmonique du son (en régime établi) d'un instrument donné, ils sont incapables de reproduire le phénomène de transition de l'attaque de ce son.

Dans le cas de la synthèse sonore, le rapport d'amplitude entre les différents harmoniques est directement celui du régime établi (partie comprise après l'attaque de celui-ci et avant sa chute, partie qui correspond généralement à la durée, dit aussi sustain).

Ainsi, lors de l'écoute d'un son amputé de ses transitoires d'attaque et de fin, il peut arriver qu'il y ait méprise totale quant à son identification.



D'après ce schéma, on peut, ne serait-ce qu'à l'aide des harmoniques 1, 3, et 5, se rendre compte d'un début de ressemblance avec un signal rectangulaire (Fig. ci-dessous à gauche). Il ne le deviendrait parfaitement rectangulaire que par l'adjonction des harmoniques impairs de rang supérieurs **allant jusqu'à l'infini**.

Avec 10 harmoniques (rang 21) (fig. ci-dessus à droite), nous serions encore loin d'un véritable signal carré. Ce qui signifie clairement que pour restituer parfaitement un signal dont le temps du transitoire d'attaque serait nul, il faudrait une bande passante infinie (en raison de son contenu harmonique dont le nombre de rangs serait lui aussi infini).

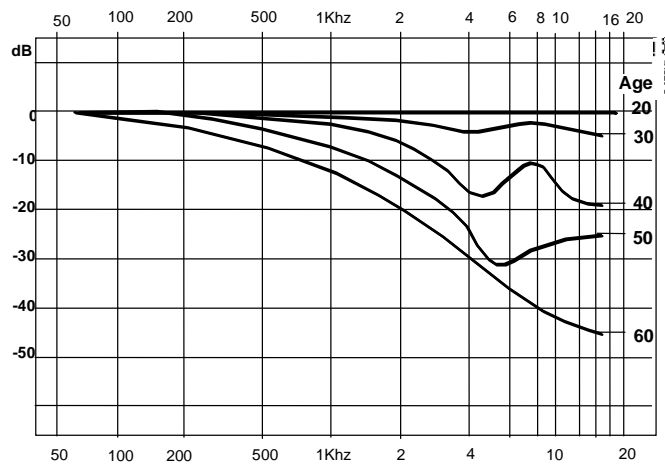
Le vieillissement de l'oreille

Il est admis que l'être humain perçoit les sons dont la fréquence est comprise entre 20 et 20 000 Hz. Cependant, cette largeur de bande perçue n'est réelle qu'à la naissance.

10 ans - 18 000 Hz
 20 ans - 16 000 Hz
 30 ans - 14 000 Hz
 40 ans - 12 000 Hz, etc.

On estime que l'homme perd en moyenne 2 000 Hz par décennie... Ne sont pas pris en compte les personnes ayant subi des pressions excessives lors de concerts, de rave parties et autres joyusetés du genre. Pas plus que des personnes ayant travaillé toute leur vie dans des conditions de bruit particulièrement pénibles (industrie du verre, tôlerie, fonderie, etc.)

Perte de Sensibilité avec l'âge



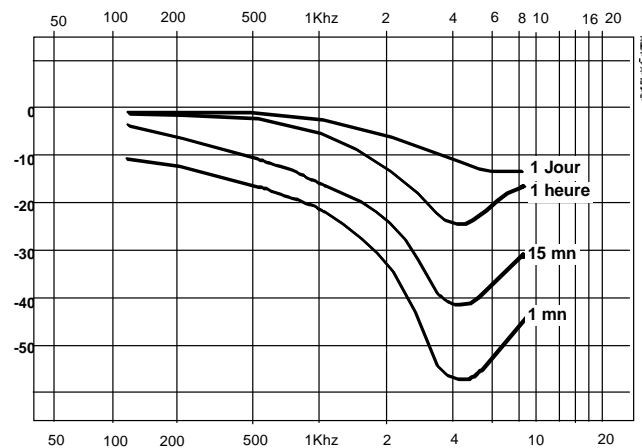
Il doit être clair que cette **limite supérieure** n'est du type « tout ou rien ». En fait, selon notre âge, nous continuons à percevoir les fréquences au delà de ces limites, mais pour les percevoir, leur intensité devra être bien supérieure aux seuils auxquels nous les aurions perçues avant cet âge.

Cette perte de sensibilité dans le registre aigu n'est en fait qu'une **valeur moyenne**. Elle peut varier d'un individu à l'autre. D'une part, elle est due au vieillissement de l'oreille qui entraîne entre autres, une perte de souplesse du tympan, d'autre part, elle est largement tributaire du milieu acoustique dans lequel vit et travaille l'individu en question.

Sur la figure ci-dessus, la courbe « **20 ans** » est plane parce que prise en **référence**, Elle ne représente donc en rien la courbe **réelle** de personnes âgées de 20 ans.

Les autres courbes représentent les pertes de sensibilité de l'oreille d'échantillons de personnes âgées de 30, 40, 50 et 60 ans **par rapport** à celles de 20 ans. Il apparaît clairement que l'âge n'est pas sans incidence sur notre audition.

Fatigue Auditive



Cet ensemble de courbes représente la **fatigue auditive** d'un sujet « moyen » soumis pendant **15 mn** à un bruit blanc d'une pression acoustique de **110 dB**. Après cette **courte** exposition, on a fait subir au sujet un audiogramme (relevé de la sensibilité de l'oreille aux fréquences audibles) **1 mn** après l'interruption du bruit, puis **15 mn**, **1 heure** et enfin **1 jour** après. (fig. suivante)

Il est intéressant et instructif de comparer les courbes concernant le **vieillessement de l'oreille** avec celles concernant la **fatigue auditive**.

D'une part pour leur similitude, et d'autre part pour vous permettre d'envisager ce que peut donner le cumul de ces deux dégradations.

Ce n'est que depuis le début de l'année 1996 qu'a été adoptée une limitation obligatoire à **114 dB** de la pression acoustique délivrée par les casques des walkman, ce qui d'ailleurs est une relative fumisterie puisqu'il suffit de changer le casque pour un modèle présentant un meilleur **rendement** afin de pouvoir à nouveau dépasser allègrement le niveau imposé.

Grâce à ces deux graphiques, nous pouvons mieux comprendre le choix de la fréquence maximum transmissible (15 000 Hz) pour les transmissions radiophoniques en Modulation de fréquence. Fréquence supérieure largement suffisante au vu de ces courbes.

La puissance acoustique = Énergie

La puissance acoustique est l'énergie fournie par la source.

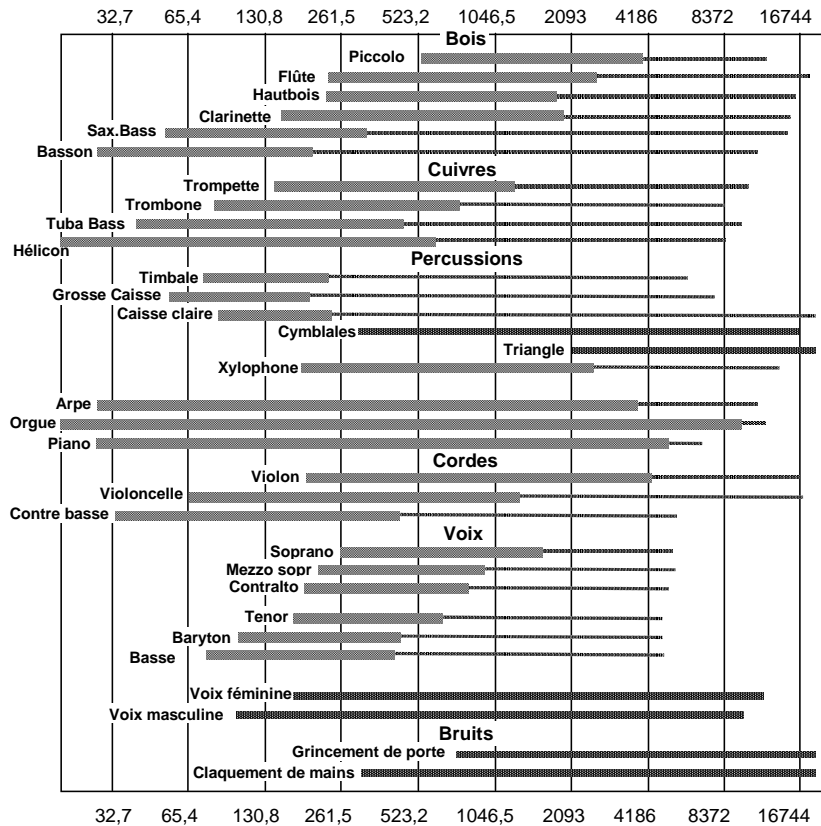
Elle est véhiculée par les ondes acoustiques. Si la source est ponctuelle et éloignée de tout obstacle matériel, les ondes sphériques qui l'entourent présentent une surface proportionnelle au carré de leur rayon. Ainsi, l'énergie ou intensité acoustique en chaque point est inversement proportionnelle au carré de ce rayon, donc, de la distance. La règle est la même en ce qui concerne la lumière qui, elle aussi est inversement proportionnelle au carré de la distance. Ainsi, quand on double la distance, l'énergie lumineuse comme acoustique est divisée par 4.

L'intensité acoustique = Énergie par seconde

Elle est la quantité d'énergie transmise en moyenne par unité de temps (1s) à travers une surface de 1m^2 (surface unité). Elle s'exprime en W/m^2 . Elle est proportionnelle au carré de la pression acoustique.

L'intensité acoustique de référence est de $10^{-12}\text{ W}/\text{m}^2$, elle correspond au seuil de l'audibilité de l'oreille humaine à 1 000 Hz.

La tessiture.



L'écart entre la note la plus grave et la note la plus aiguë dans lequel un instrument de musique ou une voix peut le mieux s'exprimer s'appelle "**tessiture**" de l'instrument ou de la voix.

Les **fondamentaux** des divers instruments de musique (à part le synthétiseur) ne dépassent pas **5 000 Hz**, alors que le **contenu harmonique** de ces mêmes instruments peut atteindre et dépasser les **15 000 Hz**. Ceci explique l'importance d'une bande passante large et plate du matériel électroacoustique, afin de respecter et l'étendue et le timbre des sons à transmettre ou à enregistrer.

Si un combiné téléphonique peut transmettre la tessiture de la plupart des instruments de musique, l'étrécissement de sa bande passante (300 à 3000 Hz) et sa non linéarité en fréquence rend incertain leur identification par le timbre (Forte atténuation ou suppression de certaines harmoniques supérieures et mauvaise transmission des transitoires d'attaques de certains sons).

En ce qui concerne la voix humaine, même si les harmoniques supérieures d'une **voix de femme** ne dépassent pas la fréquence de **1050 Hz** environ, les harmoniques supérieures de celle-ci dépassent les **8500 Hz**. Il ne faudra jamais perdre de vue que les "CHHH" et les "SSS" en particulier requièrent une bande passante s'étendant largement jusqu'à 15000, voir 18000 Hz.

La dynamique.

La dynamique est l'écart entre l'énergie acoustique la plus faible et la plus forte existant dans un son ou ensemble de sons.

En règle générale, on essaiera de respecter cette dynamique lors d'un enregistrement. Faut-il encore que **l'enregistreur** soit capable de la supporter. Tout l'art du preneur de son sera de donner « **l'impression** » de son respect, même dans les cas les plus critiques.

Une dynamique de 30 dB seulement est inenvisageable dans un appartement conventionnel.

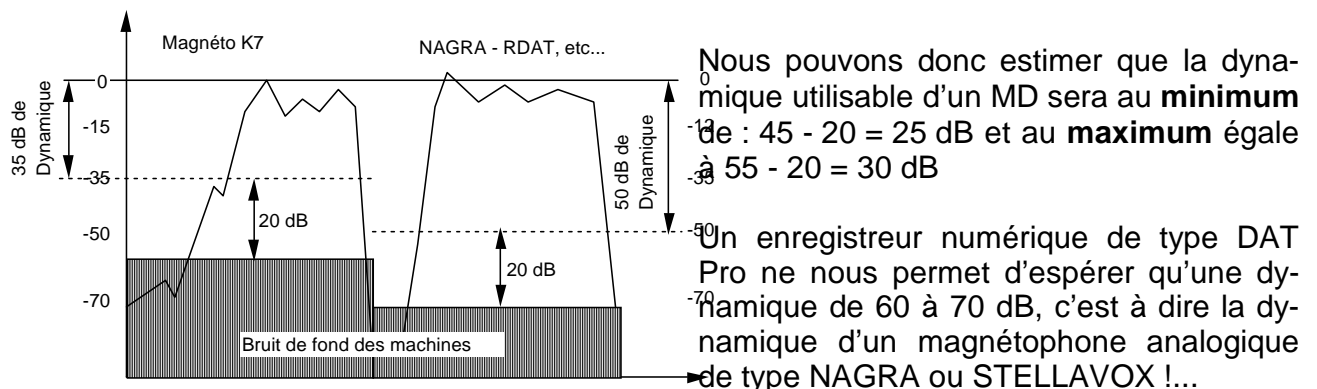
Le **Rapport S/B** (Signal sur Bruit) est le rapport qui existe entre le **signal maximum** admissible par une machine et le **bruit de fond** généré par l'électronique de celle-ci ou par son support d'enregistrement. En Numérique, celui-ci se réduit au bruit de fond électronique.

Le Numérique offre théoriquement un rapport S/B d'environ **90 dB en 16 BITS**, à condition toute fois que l'électronique suive, ce qui est malheureusement rarement le cas en particulier au niveau des **entrées micros** pour lesquels un **rapport S/B de 60dB** est déjà une belle performance. Trop souvent, les préamplificateurs de micros génèrent un bruit de fond qui réduit dans d'assez grandes proportions la dynamique acceptable par l'appareil.

Ainsi **l'entrée micro** d'un petit enregistreur numérique présente un rapport S/B de 45 à 55 dB seulement. Cela signifie que le bruit de fond généré en grande part par le préamplificateur de l'entrée micro est 45 à 55 dB inférieur à celui du niveau maximum enregistrable par cette machine.

Respecter la dynamique existant entre le décollage d'un jet enregistré à quelques mètres (130 dB) et la rumeur de la campagne environnante une fois le calme revenu (45 dB), exigerait un appareil capable de supporter une dynamique d'environ 85 dB ($130 \text{ dB} - 45 \text{ dB} = 85 \text{ dB}$). Nous sommes loin des 45 à 50 dB offerts par un MD.

D'autre part, un appareil affichant un rapport S/B de 55 dB ne signifie absolument pas qu'il supporte une dynamique équivalente. Il est nécessaire que le niveau de la modulation la plus faible soit au moins **supérieur de 20 dB au niveau du bruit de fond** pour que celui-ci ne soit pas trop perceptible.

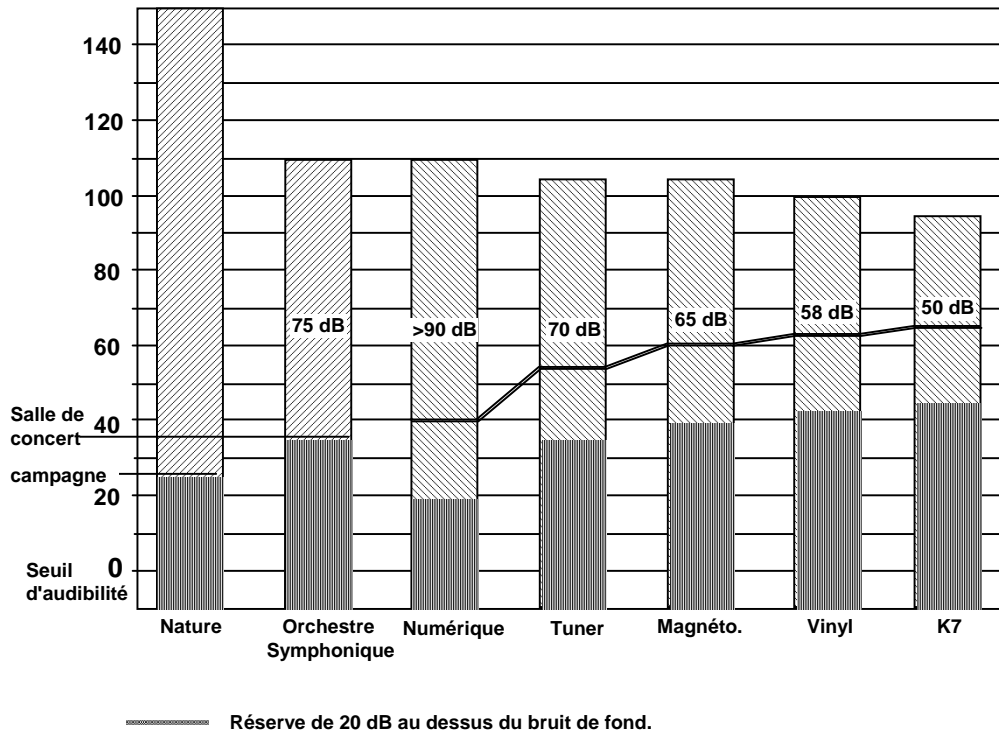


Bien souvent, l'absence de dynamique dans un enregistrement, rendra celui-ci sans grand intérêt. Un son fort ne peut exister que par référence à un son faible, et inversement. C'est la dynamique qui dans la prise de son est en grande partie porteuse d'émotion.

Dans le tableau suivant, la première colonne représente d'une part la pression acoustique maximum générée par les sources les plus bruyantes (foudre par exemple), et la partie grisée du bas, le bruit de fond de la campagne calme.

La dynamique de **l'orchestre symphonique** est partiellement réduite à cause du niveau de la rumeur existant dans les salles (bruits de fauteuils, toux, froissement de papier, etc.)

Les colonnes suivantes représentent d'une part les niveaux sonores les plus élevés enregistrables, et d'autre part, les bruits de fond générés par ces médias.

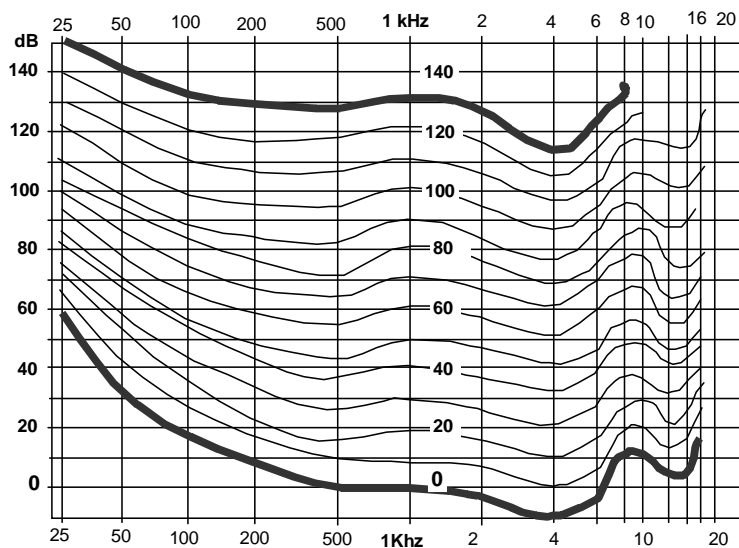


Courbes de FLETCHER ET MUNSON

L'OREILLE, premier et dernier juge d'un son, n'est linéaire ni en fréquence, ni en sensibilité.

La sensation croit comme le logarithme de la pression acoustique (Pour doubler la sensation acoustique, il faut multiplier par 10 la puissance de la source). Il en va de la sensation de poids comme de la sensation d'intensité sonore ou de chaleur.

L'ensemble de courbes ci dessous indique la sensibilité de l'oreille en fonction de la fréquence et du niveau de Pression acoustique.



La courbe du bas représente le **seuil d'audibilité**, ensemble des minima de pression nécessaires afin d'éveiller une sensation auditive, en deçà de laquelle nous ne percevons aucun son.

La sensibilité maximale de l'oreille se situe entre **1000** et **3000 Hz**. Elle demande un niveau minimum de pression acoustique de $2 \cdot 10^{-5}$ N/m² à 1000 Hz.

Si l'oreille humaine avait une sensibilité **inférieure** de quelques dB à ce seuil, nous percevrions le choc des molécules d'air contre nos tympans.

En revanche, pour percevoir les fréquences aux extrêmes du spectre audible (de 20 et 20000 Hz), cette pression acoustique doit être considérablement supérieure à celle nécessaire à 1000 Hz.

Si on augmente progressivement l'intensité sonore, on parvient à un niveau acoustique où l'audition devient douloureuse. Au delà de ce niveau qualifié de "**seuil de la douleur**" aucune augmentation de sensation n'est plus perceptible. L'oreille est saturée (courbe supérieure). Cette courbe est franchement plus linéaire que la première.

A **1000 Hz**, le rapport de pression entre ces deux courbes extrêmes (**seuil d'audibilité** et **seuil de la douleur**) est de **120 dB**, soit un rapport de **1 000 000** en pression. Belle dynamique, non ?

Courbes d'égalité sonore ou ensemble de courbes Isosoniques (*)

* - iso pour égale, sonie pour intensité perçue

Afin d'établir les courbes de la figure précédente, un son pur dont la fréquence est de 1000 Hz a été arbitrairement choisi comme fréquence de référence.

Chacune de ces courbes dites aussi "**isosoniques**" est graduée en **dB**. La courbe du bas étant la courbe du **seuil de l'audibilité**, et celle du haut, celle de la **douleur**.

Si nous prenons la 3ème courbe en partant du bas, son niveau est noté **20 dB à 1000 Hz**. Cela signifie que **n'importe quelle fréquence** de cette courbe provoque la **même sensation sonore** (sonie identique) que le point **1000 Hz** de celle-ci.

Comment détermine-t-on ces courbes ? Explication :

On prend un certain nombre de sujets auxquels on fait entendre à l'aide d'un casque, une fréquence de **1000 Hz**, à un niveau de **10 dB** (par exemple). Cette écoute s'effectue par l'intermédiaire d'un casque dont les caractéristiques acoustiques sont parfaitement connues. A cette fréquence de 1000 Hz, on ajoute une seconde fréquence différente de la première dont on augmente progressivement le niveau (**50 Hz** par exemple). On demande au témoin de dire à quel moment le **niveau des deux fréquences diffusées** lui paraît **identique**. Il ne reste plus qu'à noter ce niveau sur un graphique, et recommencer l'expérience avec une nouvelle fréquence à comparer (**100 Hz** par exemple).

Une fois toutes les fréquences du spectre audible testées à ce niveau de pression (par 1/3 d'octave par exemple), on augmente le niveau sonore de la fréquence 1000 Hz de 10 dB et on entreprend le tracé d'une nouvelle courbe. Et ainsi de suite jusqu'à un niveau maximum de 120 dB.

Lorsque toutes les courbes entre 0 et 120 dB ont été testées sur l'un des sujets, on passe au sujet suivant, et ainsi de suite jusqu'au dernier sujet afin de pouvoir faire une moyenne des relevés et dessiner ainsi les courbes **d'égaux sensations sonores**, dites **isosoniques**, représentatives pour une population et une tranche d'âge donnée.

Le seuil d'audibilité de l'oreille humaine (**0 dB SPL** - SPL pour : Sound Pressure Level ou Niveau de Pression Sonore) est pris comme niveau référence de l'échelle des niveaux de pression sonore, mesuré à 1000 Hz, lors d'une audition binaurale en "**chambre Sourde**" ou "**Anéchoïde**".

On constate selon la courbe du bas notée **0 dB**, que, d'une part, pour commencer à percevoir un signal pur ayant une fréquence de **50 Hz**, il faut que son niveau de pression sonore soit augmenté d'environ **60 dB**, soit un rapport de **1000** par rapport à la pression acoustique nécessaire à la perception d'une fréquence de **1000 Hz** à un niveau de **0 dB SPL**.

D'autre part, que pour commencer à percevoir un signal pur d'une fréquence de **15000 Hz**, on constate d'après cette même courbe **d'égaux sensations sonore** que la pression acoustique devra être d'environ **20 dB** supérieure à celle nécessaire à **1000 Hz**, soit un rapport de pression **10 fois supérieur** à la pression acoustique nécessaire à la perception d'un signal pur de **0 dB à 1000 Hz**.

Nous constatons ainsi que la "sensibilité" de l'oreille humaine n'est absolument pas linéaire pour les très faibles niveaux de pressions acoustiques.

Si la sensibilité de l'oreille est maximum pour les fréquences médiums du spectre audible, elle s'atténue fortement au fur et à mesure que l'on se rapproche des extrêmes de ce spectre, que ce soit celui des graves ou celui des aigus.

Considérons maintenant la courbe supérieure du graphique :

Le niveau de pression sonore nécessaire afin d'obtenir une égale sensation sonore, et ce, quelque soit la fréquence concernée, peut être considéré comme constant.

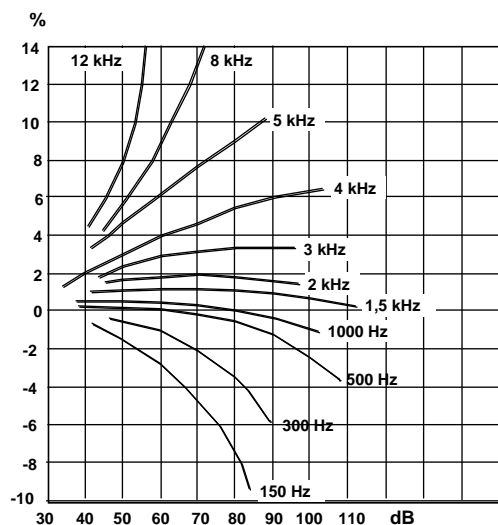
Nous constatons ainsi que la "sensibilité" de l'oreille humaine est pratiquement linéaire pour les niveaux très élevés de pression acoustique.

Si nous analysons les courbes intermédiaires, nous pouvons constater que, plus elles représentent des niveaux de pression acoustique importants, moins ces courbes sont incurvées. Ce qui indique qu'**avec l'augmentation de la pression acoustique, la sensibilité de l'oreille gagne en linéarité, et ce, quelque soit les fréquences concernées.**

L'ensemble de ces courbes démontrent ainsi la non-linéarité de l'oreille humaine.

Sensibilité de l'oreille en fréquence.

Si notre oreille n'est pas linéaire en sensibilité, elle ne l'est pas plus en fréquence ainsi que le démontre l'ensemble des courbes de la figure suivante.



Le son d'un diapason ne semblera pas avoir la même hauteur selon la distance à laquelle il sera écouté, et donc selon son intensité à laquelle il sera perçu. Comme la fréquence générée par un générateur semblera changer de hauteur selon son niveau de diffusion.

Pour les fréquences **inférieures à 2 000 Hz**, plus la pression acoustique sera importante, plus il semblera que le son devient grave. A l'inverse, pour les fréquences **supérieures à 2 000 Hz**, la fréquence paraîtra augmenter avec le niveau de pression.

Expérience : Générez une fréquence de **1000 Hz** avec un générateur de fréquence (Logiciel de son sur ordinateur, générateur présent sur une console de mix., générateur de mesure). Puis, partant d'un niveau de diffusion très faible, augmentez le volume sonore de ce signal jusqu'à un niveau fort et ce en environ 1 seconde. Si votre oreille n'est pas détruite par l'écoute du walkman ou par une fréquentation trop assidue des discothèques, vous devrez percevoir assez clairement un changement dans la hauteur du 1000 Hz (il vous semble plus grave).

Selon cette figure, il est intéressant de constater que **ce sont les fréquences auxquelles l'oreille présente la plus grande sensibilité** (Zone 1 000 à 3 000 Hz de l'ensemble des courbes d'égales sensations sonores) **qui sont les moins sujettes aux variations de fréquences**, et ce, quelque soit la pression acoustique concernée.

De la même façon, plus les fréquences concernées sont proches des extrêmes du spectre audible, plus la **non-linéarité de l'oreille** en fréquence est importante.

Petit détour sur la perception...

Il peut paraître étonnant que des partiels harmoniques d'un son résultent une impression partielle de dissonance.

Dans le cas d'un accord de plusieurs instruments joué très fort, les harmoniques supérieures de ces sons seront perçues plus hautes que lors d'une écoute à un niveau normal, alors que les fondamentaux ou les harmoniques situées en de ça de 1000 Hz seront perçues à leur véritable hauteur ou même, en de ça de celle-ci. Ce désaccord se traduira par une sensation de dissonance alors que les accords joués sont parfaitement consonants. Cette sensation provient du fait que la hauteur d'un son perçu par l'oreille dépend dans une certaine mesure de son intensité. Revoir le paragraphe LINEARITE DE L'OREILLE EN FREQUENCE.

Rapport Hauteur/Durée

La perception de la hauteur d'un son varie aussi avec sa durée. **Ainsi, la hauteur d'un son de durée inférieure à 1 seconde sera perçue comme ayant une hauteur différente d'un son permanent de même fréquence.** Par exemple, un son de 1000 Hz d'une durée de 0,02 s est perçu comme un son de fréquence inférieure. Qu'advient-il alors d'un son de violons joué en **pizzicato** et la position identique jouée en **notes tenues** ? Le violoniste modifierait-il sa position des doigts sur l'instrument afin que quelque soit la durée jouée, elle reste « juste » ? Sans doute puisque la justesse d'un violon est directement dépendante de l'oreille du violoniste (pas de barrettes sur le manche d'un violon)

L'effet Doppler.

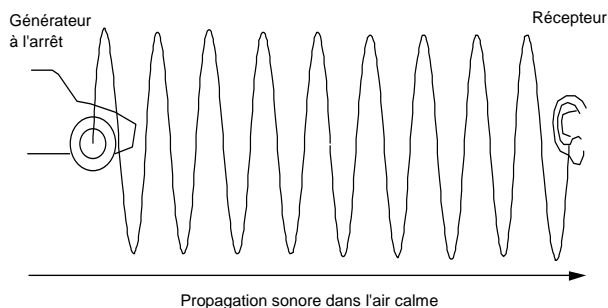


Fig.1

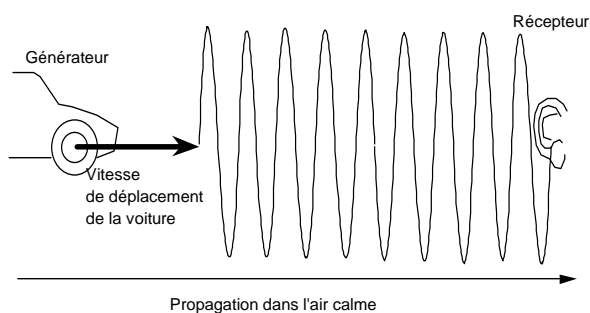


Fig.2

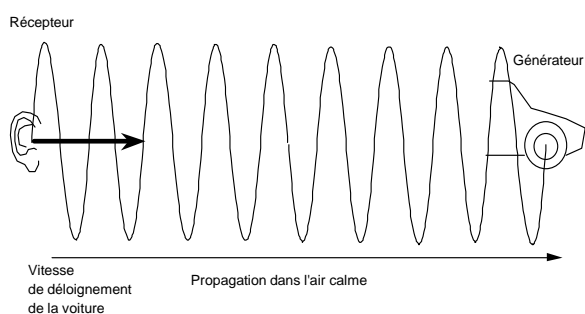


Fig.3

Il se traduit par une variation de la hauteur du son d'une source sonore perçue par un auditeur à la condition qu'au moins l'un des deux (source ou auditeur) soit en mouvement par rapport à l'autre. Mais aussi que la vitesse de déplacement relative de la source par rapport à l'auditeur soit supérieure à $? \text{ m/s}$, en deçà de laquelle l'écart en fréquence n'est plus perceptible.

Prenons pour exemple le passage d'une voiture dont la vitesse de déplacement est stabilisée. (fig. 1)

Durant la phase d'approche, la longueur d'onde du son est compressée en rapport de la vitesse du véhicule, d'où, augmentation de la fréquence perçue. (fig. 2)

Durant la phase d'éloignement, la longueur d'onde est expansée, d'où, réduction de la fréquence perçue. (fig.2)

Ex : Un véhicule se déplace dans l'air calme à 100 Km/H. Soit, 27.77 m/s. Nous pouvons calculer ce que représente 27.77 m/s par rapport à la célérité du son dans l'air qui est de 345 m/s.

$$(27.77/345) * 100 = \mathbf{8.04 \%}$$

La fréquence du son du véhicule (bruit de roulement et moteur) sera donc augmentée de 8.04 % pendant la phase d'approche, et diminuée d'autant pendant son éloignement.

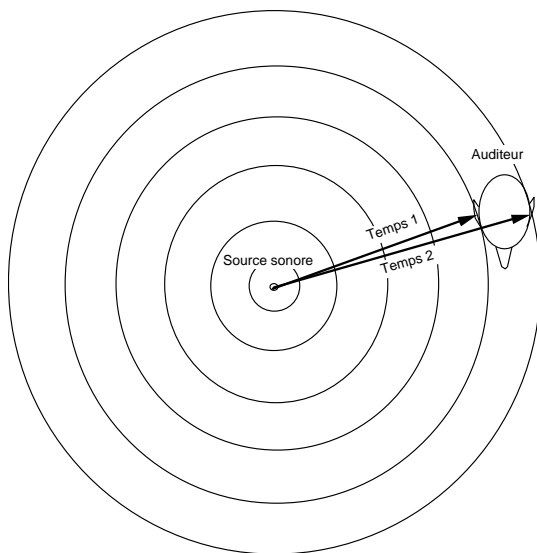
Localisation Spatiale D'un Son

Localisation par antériorité.

Dans le cas de sons riches en **transitoires** (d'attaque, de corps ou de fin), la localisation de la source se fait en particulier grâce au **phénomène d'antériorité**, c'est à dire que suivant l'angle d'incidence du son par rapport à l'axe **sagittal** de la tête, le front d'onde d'un transitoire concernée ébranlera d'abord le tympan le plus proche de la source (antériorité).

Il faut savoir que la parole comprend de nombreuses transitoires dont des transitoires brutales favorisant particulièrement la localisation par **phénomène d'antériorité** : les « **K** », « **T** », « **P** » par exemple.

Ce moyen de localisation prévaudra sur tous les autres procédés de localisation. Le contenu harmonique du son ne sert alors plus qu'à permettre une localisation avant/arrière par comparaison.



Le transitoire en question parvient avec une différence de temps aux deux oreilles. Cette différence dépend directement de l'angle d'incidence de ce son avec l'axe de symétrie de la tête et non de la distance séparant la source sonore du sujet. Le second tympan ne sera donc excité qu'une fraction de seconde plus tard, après que le transitoire concernée ait parcouru à 340 m/s la distance séparant les deux oreilles. Distance dépendante de l'angle d'incidence du son concerné.

Dans le cas d'une source située perpendiculairement par rapport à l'axe sagittal de la tête (90°), le temps le plus long, lors d'une même excitation, qui séparera les 2 tympan sera de $(0,02/340 = 5,88 \cdot 10^{-5} \text{ S})$ soit 0.58mS. Ce qui signifie que les temps pris en compte pour toutes les autres incidences (de 0 à 90°) sont pour certains angles considérablement inférieurs (!).

Par le l'intensité

Rappel : Pour qu'une fréquence soit réfléchiée ou absorbée par un obstacle, il faut que les dimensions de cet obstacle soient égales ou supérieures à la longueur d'onde de la fréquence concernée.

Ex : Pour une fréquence de 200 Hz dont la longueur d'onde est de $340 / 200 = 1,7 \text{ m}$, il faut que l'obstacle ait une dimension égale ou supérieure à 1.70 m sans quoi celui-ci n'existe pas pour cette fréquence.

Pour une fréquence de **10 000 Hz** dont la longueur d'onde est de $340 / 10\ 000 = 3.4\text{ cm}$, tout obstacle de plus de **3.4 cm** interférera sur la propagation de cette fréquence. Ainsi, par ces deux exemples, nous constatons que dans le premier cas, la tête humaine ne représente en rien un obstacle (dimension largement inférieure à la longueur d'onde), alors que dans le second cas, elle provoquera une sérieuse atténuation.

Cette localisation n'est possible que pour des fréquences supérieures à **2000 Hz**. Au-dessous de celles-ci, l'effet de masque dû aux dimensions de la tête n'intervient pas.

On peut dans une certaine mesure, affiner la localisation d'une source sonore grâce à l'effet directif du pavillon de l'oreille, mais uniquement pour des sons comportant des fréquences supérieures à **10 000 Hz**. Le pavillon provoque une atténuation ou une amplification de ces fréquences et modifie le timbre des sons perçus (**il suffit pour s'en convaincre de prolonger de ses paumes de mains le pavillon de ses oreilles**).

L'intérêt de ce type de localisation est qu'il est possible qu'avec une oreille. C'est en cherchant par différentes orientations de la tête, le meilleur rendu du timbre du son à localiser que nous pouvons le situer de façon approximative. Il est certain que plus un son sera riche en harmoniques de rang élevé, plus aisément il sera localisable.

Lors d'une écoute binaurale, on recherche inconsciemment par rotation de la tête l'équilibre du spectre reçu par les deux oreilles. La source est alors parfaitement axée **devant** ou **derrière** la tête. Le doute est assez facilement levé. Un son situé derrière la tête est détimbré par rapport à un son situé devant (l'effet directif du pavillon de l'oreille favorisant les sons en provenance de l'avant). Les caractéristiques acoustiques du lieu dans lequel est effectuée cette localisation peuvent rendre celle-ci difficile, voire impossible (Local particulièrement réverbérant).