

Guide technique : Sonorisation > Physique

Physique

Comprendre les paramètres physiques qui définissent le son passe par une approche théorique : sa transmission, sa perception et sa mesure.



Guide technique : Sonorisation > Physique > Le son

Le son

Le son est une matière complexe : sa vitesse dépend de nombreux facteurs, de même que sa transmission et sa réverbération.



Guide technique : Sonorisation > Physique > Le son

Définition du son

Le son est une sensation auditive provoquée par une vibration.

Trois éléments sont nécessaires à l'existence d'un son :

une source qui produit le son

un milieu qui transmet la vibration

un récepteur : l'oreille et l'ouïe

Production des sons : la source

Le son est produit par la vibration d'un corps solide, liquide ou gazeux qui constitue la source sonore. L'origine de cette vibration peut-être de diverse nature : choc, frottement, variation de pression, stimulation électrique...

Propagation des sons : le milieu



Les vibrations produites par une source sonore sont transmises à l'air ambiant auquel elles imposent une variation de pression.

Ces variations de pression se propagent dans l'air et dans tout milieu élastique - sauf dans le vide - sans qu'il y ait déplacement de matière, mais seulement transmission d'énergie de proche en proche : la vibration provoque le déplacement des particules autour de l'objet qui s'entrechoquent avec les particules voisines pour revenir à leur point de départ.

Ces variations de pression sont des ondes sonores. Elles sont semblables aux vibrations de la source sonore qui leur a donné naissance.

Ce mouvement de particules se propage en s'atténuant, car une perte d'énergie se produit au fur et à mesure que le champ sonore engendré par la vibration s'étend. D'autre part, l'amortissement du son modifié par la viscosité de l'air croît avec la fréquence : les sons aigus portent moins loin que les sons graves à intensité égale. On peut comparer la propagation des ondes sonores avec les cercles concentriques provoqués lorsque l'on jette un caillou dans une étendue d'eau tranquille.

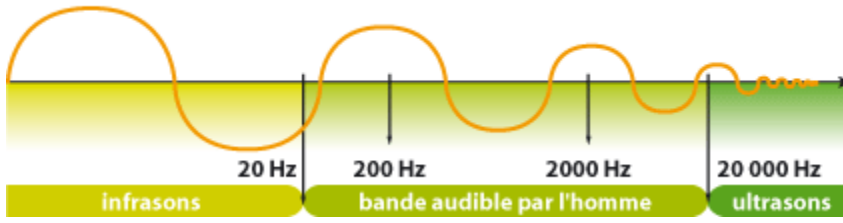
Le récepteur : l'oreille et l'ouïe

Pour devenir des sons, ces vibrations doivent agir sur un de nos sens : l'ouïe.

Notre oreille est sensible aux vibrations entre 16 Hz et 20 000 Hz (le HERTZ est l'unité de mesure de la fréquence : 1 Hz = 1 oscillation par seconde) ; en dessous de 16 Hz ce sont des infrasons que nous pouvons percevoir par la paroi abdominale.

Au-dessus de 20 000 Hz, il s'agit d'ultrasons que seuls certains animaux perçoivent (chiens, chauve-souris, dauphins...).

▼ bande de fréquences audibles par l'homme

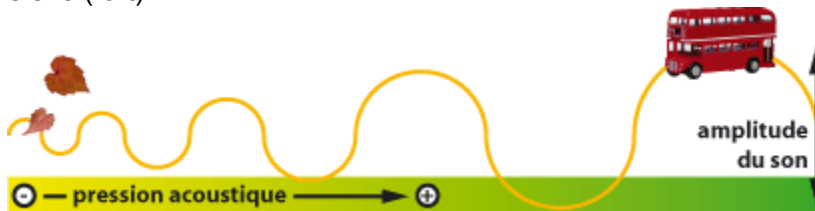


Guide technique : Sonorisation > Physique > Le son

Caractéristiques d'un son

Un son est défini par 3 paramètres : **son intensité, sa hauteur tonale et son timbre.**

Son intensité ou volume dépend de la pression acoustique créée par la source sonore (nombre de particules déplacées) ; plus la pression est importante et plus le volume est élevé (fort).



Sa hauteur tonale ou fréquence est définie par les vibrations de l'objet créant le son. Plus l'objet vibre rapidement, plus le son sera aigu.

Le nombre de vibrations par seconde s'exprime en hertz. Ainsi le La 440 (situé au milieu du clavier du piano) signifie que la source vibre 440 fois par seconde.

Le spectre audible de l'homme (de 16 Hz à 20.000 Hz) est divisé en octaves. Une octave représente l'intervalle séparant 2 notes dont la fréquence de l'une est le double de la fréquence de l'autre.

Exemple : La₃ – 440 Hz ; La₄ – 880 Hz

La plupart des sources sonores produisent des sons complexes qui sont composés d'une fréquence fondamentale et d'harmoniques.

Les harmoniques sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale f .

On distingue les harmoniques :

- paires : $2f, 4f, 6f, 8f...$

- impaires : $3f, 5f, 7f, 9f...$ que l'oreille n'apprécie guère (harmoniques anti-musicales)

Exemple : pour $f = 1$ kHz

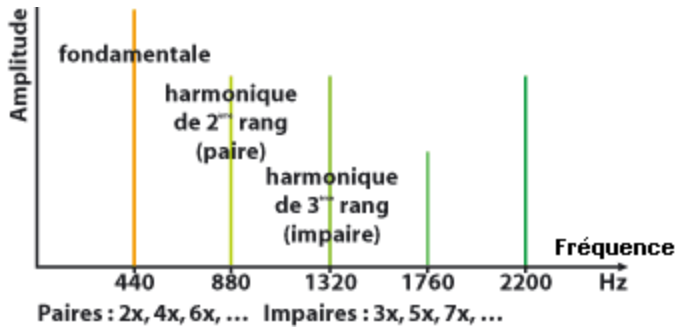
harmoniques paires 2 kHz, 4 kHz, 6 kHz...

harmoniques impaires 3kHz, 5kHz, 7 kHz

Son timbre ou couleur est donné par le nombre et l'intensité des harmoniques qui le compose et permet de reconnaître la personne qui parle ou l'instrument qui est joué.

Exemple : une flûte et un piano jouent un La 440 à égale puissance.

La fréquence fondamentale est la même, mais le nombre et l'intensité de leurs harmoniques respectives sont différents et l'oreille distingue les deux instruments.



▼ Tableau donnant les fréquences audibles sur 10 octaves ainsi que les fréquences fondamentales et les harmoniques des principaux instruments de musique et voix.



Guide technique : Sonorisation > Physique > Le son

La vitesse d'un son

Les sons ne se propagent pas dans le vide. Dans l'air, la vitesse de propagation des sons augmente avec la température.

A 0°C, la vitesse du son dans l'air est de 331 mètres/secondes.

A 20°C, elle est de 340 m/s. Soit 2,94 milli-secondes par mètre.

On retiendra pour des calculs rapides : 3 ms/mètre.



Rappelez-vous l'histoire de l'orage qui s'éloigne ou qui se rapproche.

En comptant le nombre de secondes qui s'écoulent entre le moment où l'on aperçoit l'éclair et le moment où l'on entend le tonnerre, on peut déterminer la distance qui nous sépare du centre de l'orage ; chaque seconde

représente 340 m.

Guide technique : Sonorisation > Physique > Le son

La longueur d'onde

On identifie la longueur d'onde par le symbole λ .

λ est égale à $\frac{C}{F}$ (vitesse du son dans l'air : 340 m/s)
F (fréquence en hertz)

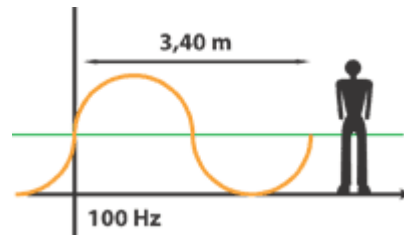
Exemples :

à **10 Hz** : $\lambda = 34$ mètres

à **100 Hz** : $\lambda = 3,4$ mètres

à **1000 Hz** : $\lambda = 0,34$ mètres

à **10 kHz** : $\lambda = 3,4$ centimètre

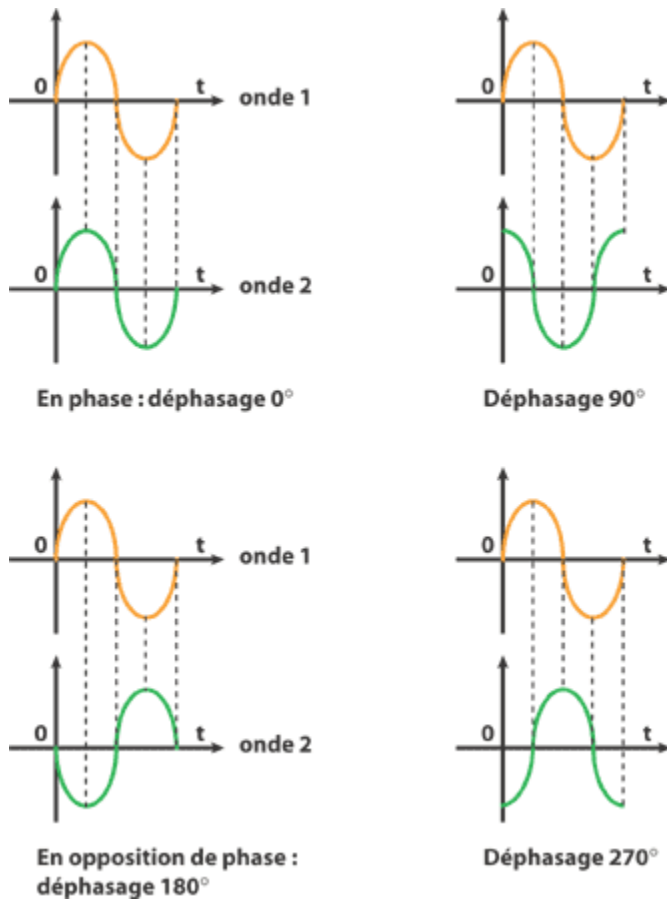


Guide technique : Sonorisation > Physique > Le son

La phase

Deux ondes sont en phase lorsqu'elles ne sont pas décalées dans le temps.

On appelle déphasage d'une onde par rapport à une autre leur décalage dans le temps.



NB : Deux ondes en opposition de phase s'annulent en monophonie. En stéréophonie, une opposition de phase entre la gauche et la droite se traduit par l'impression d'un trou au centre de l'espace stéréophonique et par un manque de fréquences basses.

Phase électrique

Les fils conducteurs (câbles microphones, câbles haut-parleurs) devront être soudés de la même manière, en respectant les normes de câblage. Attention aux inversions

dans les connecteurs !

Phase acoustique

La phase acoustique dépend essentiellement de l'emplacement des microphones captant une source identique.

Exemple :



Prise de son d'une caisse claire par deux micros : on renverse la phase du micro du dessous.

Guide technique : Sonorisation > Physique > Le son

La réflexion

Lorsqu'une vibration frappe la surface d'un corps dont la densité est plus grande que celle de l'air, elle est partiellement réfléchiée et partiellement absorbée.

Une paroi dure et lisse (pierre, verre, métal...) réfléchit la presque totalité de l'énergie sonore.

Une matière poreuse ou flexible (tissu, matière plastique expansée, laine de roche...) l'absorbe en grande partie.

Lorsque la paroi est plane, l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence et les trajets des deux ondes sont situés dans le même plan.

Par contre, lorsque la paroi est courbe, c'est l'angle formé avec la tangente au point d'incidence qu'il faut considérer.



Lorsqu'un son rencontre un obstacle, la propagation est fonction de sa dimension. Si la longueur d'onde est supérieure aux dimensions de l'obstacle, la vibration le contourne et sa propagation est peu troublée. Par contre, si la longueur d'onde est plus petite que les dimensions de la surface touchée, elle est partiellement réfléchiée et peut produire des ondes stationnaires.

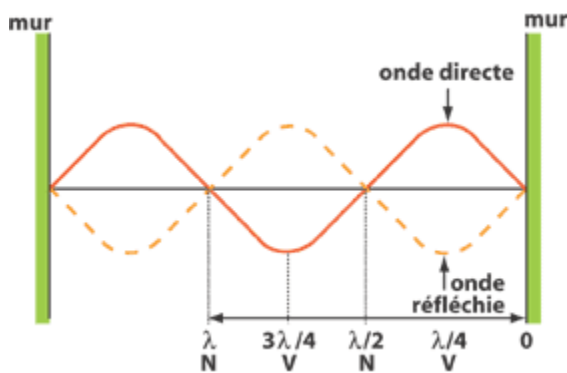
Guide technique : Sonorisation > Physique > Le son

Les ondes stationnaires

Lorsque deux trains d'ondes de même fréquence se propagent en sens contraire se rencontrent, il se forme des ondes stationnaires.

Ces ondes peuvent provenir de deux sources différentes ou d'un même signal dont une partie est réfléchiée par un obstacle.

Les ondes stationnaires sont formées par des zones où l'air est soumis à des mouvements de compression et de dépression qui ne se déplacent pas. Ces zones sont situées à une distance l'une de l'autre égale à la moitié de la longueur d'onde du signal qui les produit : ce sont des ventres **V**, mouvement de compression maximale où le son est fort, et des noeuds acoustiques **N** où il est nul.



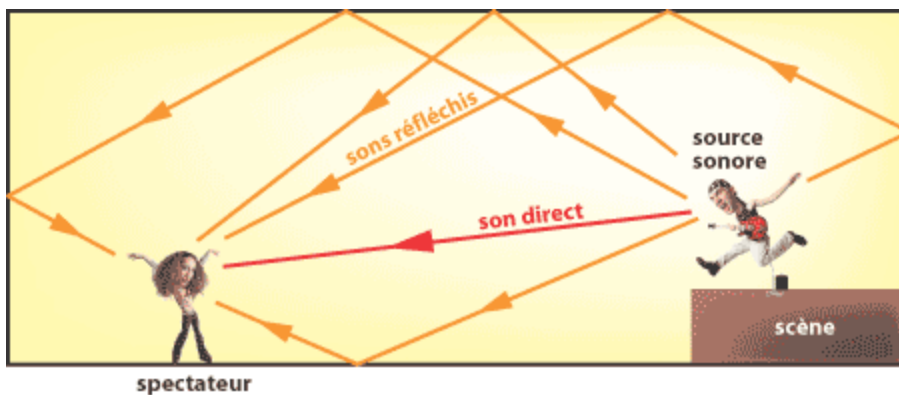
Ce phénomène est à la base de nombreux instruments de musique. En acoustique, il est très gênant. On l'élimine en traitant les salles.

Guide technique : Sonorisation > Physique > Le son

Réverbération

La réverbération est le phénomène qui prolonge l'énergie sonore après un arrêt net de la source sonore. Une onde sonore émise dans une salle se propage dans toutes les directions à la vitesse de 340 m/s. Très rapidement elle rencontre le plafond, le sol et les murs. Selon la nature de ces parois, une fraction de l'énergie acoustique est absorbée et le reste est réfléchi.

Réverbération d'une salle



En règle générale, l'absorption est plus faible pour les graves (il faut beaucoup de masse pour atténuer les graves, alors que des pièces de tissu de type pendrillons suffisent pour les aigus). C'est pourquoi une salle insuffisamment traitée paraît "sourde" du fait d'une augmentation relative du niveau des graves par rapport à celui des aigus qui sont plus absorbés.

Plus la salle est réverbérante, plus le niveau sonore des sons réfléchis est élevé par rapport à celui provenant de la source. Près de la source (des haut-parleurs, par exemple), le son direct est prépondérant, alors que plus loin, ce sont les sons réfléchis qui le deviennent. Le champ sonore est alors diffus, l'intelligibilité est médiocre ou mauvaise.

Dans une petite salle, la différence de temps entre l'onde directe et les ondes réfléchies est faible et la compréhension de la parole n'est pas affectée. Par contre, dans un grand local, cette différence de temps peut être importante. Les syllabes de la parole se superposent alors et nuisent à l'intelligibilité.

En extérieur nous n'avons pas de réverbération, mais des échos (répétitions franches « bonsoir, soir, soir, soir ») dus aux réflexions sur des bâtiments, montagnes...

La réverbération et la parole

La réverbération n'est pas toujours souhaitée pour un orateur, sauf effets spéciaux. Elle doit être courte pour une bonne compréhension du texte ; au maximum 0.8 seconde. Au-delà, les syllabes se chevauchent et l'intelligibilité diminue.

La réverbération et la musique

L'absence de réverbération provoque un rendu sec et dur sur la musique ; on recherche toujours une prolongation du son. Une bonne salle de musique présente une réverbération de 1.0 à 2.5 secondes. L'orgue nécessite une réverbération plus longue : c'est le cas des églises.

La musique et la parole s'accrochent mal du même local. L'utilisation de processeurs de réverbération numériques permet de recréer la réverbération idéale selon le type de musique pour des enregistrements ou prises de son réalisés avec des temps courts.

Avant l'existence de ces appareils numériques il fallait enregistrer ou produire les spectacles dans des lieux adaptés à leur type de musique (salle de concert, auditorium, églises ou cathédrales...)

Certains studios d'enregistrement étaient équipés d'un puit dont on utilisait l'effet de résonance pour fabriquer une réverbération artificielle. On injectait le son que l'on voulait traiter dans un haut-parleur placé dans le puit. Un micro, que l'on pouvait suspendre à diverses hauteurs dans le puit, captait la réverbération. Il suffisait de mixer ce son réverbéré avec la source.

Guide technique : Sonorisation > Physique

La perception du son

L'ouïe

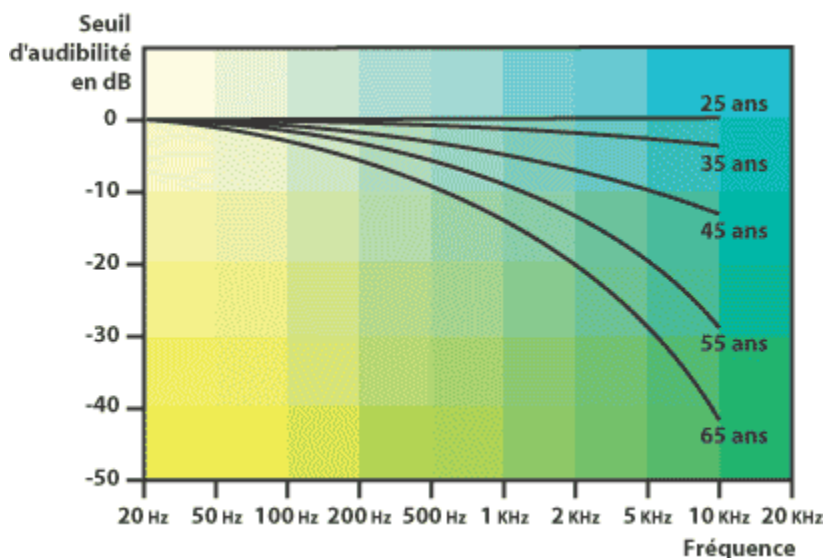
L'ouïe est le sens qui nous permet d'entendre (mais aussi de communiquer et de maintenir notre équilibre). L'oreille est l'organe qui perçoit les vibrations de l'air.

Notre récepteur auditif est délicat et compliqué. Il n'est pas linéaire en fréquence, ni en sensibilité. Les courbes de Fletcher et Munson nous montrent la sensibilité de l'oreille en fonction de la fréquence.



La sensibilité maximale de l'oreille se situe aux environs de 1000 hertz et demande une pression acoustique de $2 \cdot 10^{-5}$ Pa soit 0 dBspl. En revanche à 16 Hz et à 20 000 Hz cette pression doit être 100 000 fois plus grande pour entendre ces fréquences. Lorsque nous écoutons à faible volume sur notre chaîne Hi-fi par exemple, nous utilisons un filtre de correction physiologique appelé Loudness, qui augmente les fréquences basses et aiguës que notre oreille entend moins. Le son devient plus chaud, plus précis et plus séduisant.

Des expériences sur un grand nombre de sujets ont permis de tracer les courbes qui suivent. On voit que dès 25 ans l'acuité sonore diminue.



L'oreille



Nos deux oreilles sont placées des deux côtés de la tête. Elles sont écartées d'à peu près 17 cm (15 à 20 cm).

Du fait de la vitesse du son qui se déplace à 340 mètres/seconde, on remarque qu'il y a un décalage de temps d'arrivée du son entre l'oreille droite et l'oreille gauche. Ce décalage temporel est interprété par le cerveau pour localiser l'origine d'un son sur le plan horizontal. Il est la base de la stéréophonie.



Ainsi, le placement des sons dans l'espace stéréophonique que l'on a l'habitude de pratiquer avec le panoramique en jouant sur la différence de volume entre les deux enceintes permet un positionnement imparfait puisque l'on a toujours deux sources sonores au lieu d'une seule.

Le système auditif se divise en trois parties :

L'oreille extérieure

Elle est composée d'un pavillon et du conduit auditif. Sa forme a la fonction de modifier légèrement le son suivant son angle d'arrivée, avant de parvenir au

tympan, c'est ce qui permet au cerveau de distinguer l'origine de la source sonore.

NB : Les épaules, en réfléchissant le son, aident également à distinguer son origine verticale

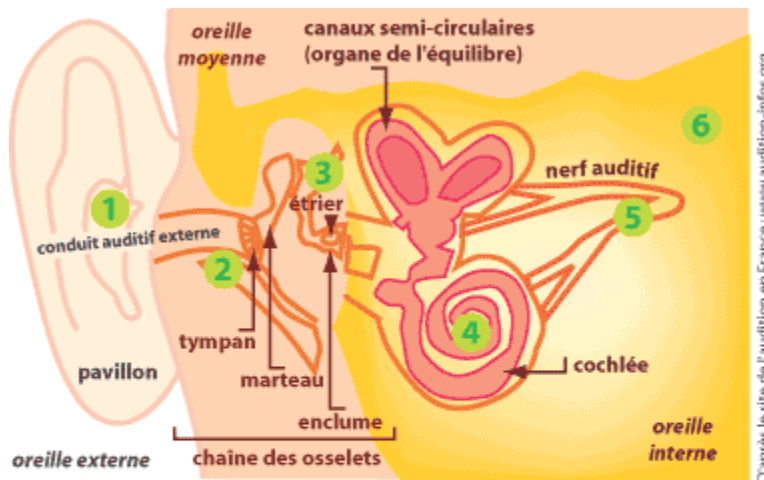
L'oreille moyenne

Elle comprend le marteau, l'enclume et l'étrier qui transmettent les vibrations du tympan à l'oreille interne.

L'oreille interne

Elle transforme les vibrations en signal électrique transmis au cerveau par le nerf auditif.

Des cellules ciliées vibrent sous l'action du marteau et de l'enclume. Ces cellules sont fragiles et ne se régénèrent pas. Une fois détruites ou abîmées, elles ne peuvent plus transformer les vibrations sonores en influx nerveux.



- ① Le son arrive dans le conduit auditif.
- ② Le son fait vibrer le tympan.
- ③ Le marteau et l'enclume transmettent les vibrations.
- ④ L'oreille interne transforme le son et transmet ces signaux au nerf auditif.
- ⑤ Le nerf auditif véhicule l'influx nerveux vers le cerveau.
- ⑥ Le cerveau interprète les sons.



Sécurité

Afin d'éviter des lésions irréversibles de l'audition, il est nécessaire de porter des protections auditives (bouchons jetables, par exemple) et de limiter le temps d'exposition aux niveaux sonores importants.

L'interprétation du son par le cerveau est appelée psychoacoustique.

Le cerveau n'interprète pas le son de manière objective. Il existe deux phénomènes importants à considérer : l'effet de masque et l'isotonie :

L'effet de masque se produit lorsqu'un son a un volume plus important qu'un autre. Plutôt que d'entendre parfaitement les deux sons à des volumes différents, on entend bien le plus fort, mais le plus faible devient difficile à distinguer car il est masqué par l'autre. Par exemple, si quelqu'un vous parle en discothèque, vous n'arrivez pas à l'entendre à cause du bruit ambiant.

Pourtant le son existe bien et vous devriez l'entendre, mais la différence de volume fait que vous n'arrivez pas à concentrer votre écoute sur le son le plus faible. Par ailleurs, les sons graves ont également tendance à masquer les sons aigus.

L'isotonie concerne la courbe de réponse de l'oreille. En effet, nous ne percevons pas de la même manière les graves, les médiums et les aigus à volumes identiques. Ce phénomène trouve ses origines à notre petite enfance. Il s'agit d'une certaine culture de l'oreille: le maximum de sensibilité se situe autour de 1000 Hz, ce qui correspond à la voix de la mère perçue alors que le bébé est dans son ventre, puis de sa propre voix.

Guide technique : Sonorisation > Physique > Décibels et mesures acoustiques

Décibels et mesures acoustiques

Pour pouvoir qualifier le son et notamment dans son aspect législatif, il faut le mesurer : relation de puissance, tension électrique, distance avec la source...



Guide technique : Sonorisation > Physique > Décibels et mesures acoustiques

Les mesures acoustiques

Dans le système international en vigueur, l'unité de pression est le **newton par mètre carré** (N/m²) nommé en France le **Pascal** (Pa)

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$



Le **décibel** (dB) ne mesure pas des grandeurs, mais des rapports entre des grandeurs de même nature : pressions ou puissances acoustiques, puissances électriques. Le décibel est une unité d'amplification, d'affaiblissement ou de niveau par rapport à une valeur de référence.

Pour la mesure des niveaux de pression acoustique, on adopte comme niveau de référence (0 dB) la pression acoustique

nécessaire pour atteindre le seuil d'audibilité à 1000 Hz qui a été fixé à 2.10⁻⁵ Pa. Les niveaux de pression acoustique sont exprimés en décibels dB suivis des lettres SL ou SPL (sound level ou sound pressure level).

Exemple :

- seuil d'audibilité 0 dB SL
- niveau d'une conversation normale 50 dB SL
- audition musicale en appartement 70 dB SL
- discothèque, concert 105 dB SL
- seuil de douleur 120 dB SL
- avion à réaction 140 dB SL

Les décibels servent aussi à évaluer les intervalles sonores ou les différences d'intensité entre deux sons. L'intervalle sonore entre le pianissimo (moment le plus faible) et le fortissimo (moment le plus fort) d'un orchestre peut être de 60 à 70 dB : c'est la dynamique de la musique.

Les décibels SL permettent également de calculer le niveau de pression acoustique à une certaine

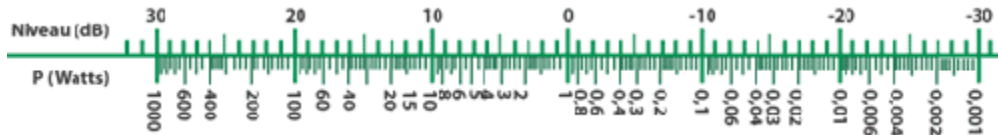
distance de la source. Le niveau de pression acoustique décroît de 6 dB à chaque fois que la distance double par rapport à la source sonore.

Guide technique : Sonorisation > Physique > Décibels et mesures acoustiques

Les relations de puissance

Tableaux de correspondance entre puissance et dB

(Cliquer sur l'image pour un meilleur aperçu)



Niveau (dB)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	30	40	43
P (Watts)	1	1,25	1,6	2	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	100	1000	10000	20000

La perception de niveau sonore variant dans des proportions exponentielles, pour avoir une sensation de volume sonore double (2 fois plus fort), il faut multiplier la puissance par 10 !

La sensation sonore produite par deux pianos n'est pas le double de celle que nous éprouvons avec un seul piano mais, pour avoir l'impression d'une puissance double, il faudra dix pianos !

Et avec cent pianos, on obtiendra une sensation sonore double de celle obtenue avec dix pianos...

De la même manière, un amplificateur de 1000 watts, avec la même installation, ne donnera qu'une sensation de puissance double de celle donnée avec un amplificateur de 100 W.

L'intérêt d'utiliser les décibels est évident puisque chaque multiplication de puissance par dix se traduit par l'addition de 10 dB SPL supplémentaires.

Connaissant la puissance et le rendement (voir chapitre Les haut-parleurs) de nos enceintes nous pouvons calculer la puissance acoustique (dB SPL) disponible à l'aide du tableau de correspondance entre un gain de puissance (en watts) et le gain de pression (en dB SPL).

Exemple : nous lisons sur la fiche de caractéristiques de notre enceinte, que son rendement est de 97 dB SPL pour 1 watt à 1 mètre. Sachant que sa puissance maximale est de 600 watts, quelle sera la puissance acoustique disponible à 1 mètre ?

Guide technique : Sonorisation > Physique > Décibels et mesures acoustiques

Relations entre une augmentation ou diminution de tension, courant et pression et la valeur en dB

Tableau des relations entre tensions et dB

Tensions, Courants ou Pression	1	1,25	1,6	2	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10
Niveau (dB)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20

Sur un égaliseur de console par exemple, lorsque l'on pousse une fréquence de +12 dB, c'est 4 fois

la puissance nominale que les circuits électroniques devront supporter.

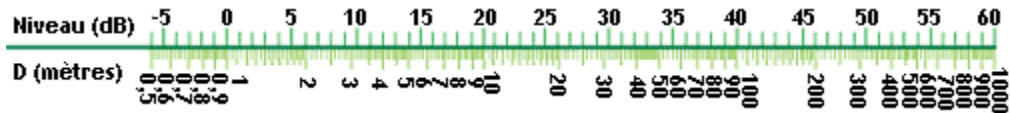
Si on travaille à un niveau largement inférieur à 0 dB, pas de problème. Mais si on se situe à des valeurs proches de la valeur nominale, on entendra la saturation des circuits : craquements et distorsion, voire la destruction de certains composants.

Guide technique : Sonorisation > Physique > Décibels et mesures acoustiques

Relations où intervient la distance

Tableau des pertes en dB par rapport à la distance

(Cliquer sur l'image pour un meilleur aperçu)



Lorsque l'on s'éloigne d'une source sonore en extérieur (c'est ce qu'on appelle « en champ libre ») on constate que le niveau SPL chute d'exactly 6 dB chaque fois que notre distance à cette source double.

Exemple d'utilisation

Nous sommes en extérieur, notre système de diffusion peut développer 135 dB à 1 mètre, quelle puissance aurons-nous à 40 m ?

Sur le tableau de la page addition des niveaux en DB, au regard de 40 m, nous lisons – 32 dB. La puissance acoustique à 40 m sera 135 - 32 soit 103 dB, alors qu'à 1 mètre des haut-parleurs, elle sera de 135 dB !

Cela explique, en partie du moins, pourquoi certaines personnes ont trouvé le concert très fort, alors que d'autres ont trouvé cela agréable...

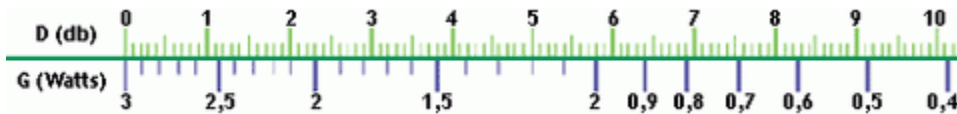
Il est indispensable de réduire la différence de distance entre les premiers spectateurs et les derniers en élevant la diffusion par exemple ou encore, d'installer des enceintes de rappel à mi-parcours.

En intérieur, l'affaiblissement dû à la distance est moindre à cause des réflexions des murs, plafond et sol, mais devant, près des HP, cela sera toujours plus fort qu'à l'arrière.

Guide technique : Sonorisation > Physique > Décibels et mesures acoustiques

Addition de niveaux en dB

Tableau pour l'addition de niveaux en dB



Un technicien aura très souvent à additionner des puissances exprimées en dB.

Exemple d'utilisation

Supposons que deux sons de 99 dB SPL (1 HP + 1 HP) s'ajoutent. Quel est le niveau résultant ?

Si nous additionnons simplement les niveaux, nous aboutissons à 198 dB SPL qui est une réponse absurde.

Quand 2 niveaux seulement sont concernés, nous pouvons utiliser le tableau pour l'addition de niveaux en dB.

Nos deux enceintes ont la même puissance, donc 0dB de différence. En face de 0 je lis 3 ; et nous avons 99 dB + 3 dB = 102 dB SPL.

Si nous rajoutons encore une enceinte, nous aurons HP1 + HP2 : 102 dB et HP3 : 99dB, soit 3 dB de différence.

Le tableau nous montre 1.75 en face de 3 ; soit 103.75 dB SPL avec 3 HP.

On comprend mieux pourquoi on installe des grappes de 30 ou 40 enceintes par côté lors de concerts dans de très grandes salles ou en plein air.