

Chapitre 4

La sonie des sons purs

4.1 Introduction

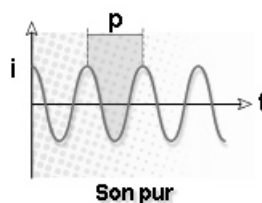
La sonie est la grandeur de sensation reliée à la perception des intensités. Autrement dit, la sonie est le corrélat sensoriel de l'intensité. Elle réfère donc à l'évaluation et à la description subjective de l'intensité telle que perçue par un auditeur. « Subjective » est ici entendu dans le sens que :

- l'auditeur est un *sujet humain*,
- il n'y a pas de réponse *exacte* ou *vraie* ou *universelle* (on ne peut pas dire à une personne que sa réponse est « erronée »)
- la sonie ne varie pas exclusivement en fonction du niveau d'intensité mais dépend aussi de la fréquence.

L'aspect « subjectif » ne veut donc pas dire que les jugements varient de façon extrême, comme une opinion politique par exemple. En fait, les variations inter-individuelles pour la sonie sont habituellement assez faibles, et c'est encore plus vrai pour les expériences faisant appel aux sensations de base (comme par exemple le contraste visuel et les seuils de détection en général) qui impliquent peu ou pas de jugement. Autrement dit, plus on est proche de la *sensation* plutôt que de la *perception*, moins il y a de variations inter-individuelles. Ces expériences sont donc tout à fait reproductibles et valides.

L'étude de la sonie requiert des méthodes et des concepts que nous avons vus précédemment. Mais avant de passer à la sonie en tant que telle, nous devons connaître quelques notions reliées à la sensibilité auditive, c'est-à-dire aux seuils d'audition. En effet, il faut pouvoir détecter un son avant d'être en mesure d'en estimer l'intensité, ou avant de pouvoir faire des comparaisons d'intensité avec d'autres sons.

Dans ce chapitre, nous traiterons des sons purs, c'est-à-dire, les sons sinusoïdaux ou sons simples, par opposition aux sons complexes qui feront l'objet du chapitre suivant.



4.2 Quelques définitions relatives à l'intensité acoustique

La puissance acoustique est la quantité (ou le flux) d'énergie acoustique qu'émet une source par unité de temps. Elle s'exprime en Watts.

La pression acoustique ou pression sonore est l'amplitude des variations de la pression en un point, de part et d'autre de la pression atmosphérique, provoquées par le passage d'une onde sonore en ce point. Elle est exprimée en Newtons/m² ou Pascal. C'est à ces variations de pression que l'oreille est sensible ; il en va de même pour la plupart des microphones.

L'intensité acoustique est le flux d'énergie acoustique qui est transmis dans une direction donnée, pendant une unité de temps, à travers une unité de surface. Elle s'exprime en Watts/m² et elle est donc spécifique à un point d'un milieu où se propagent des ondes acoustiques. L'intensité acoustique en un point dépend :

- a) de la puissance de la source
- b) du milieu de propagation
- c) de la distance qui sépare ce point de la source.

L'intensité acoustique est proportionnelle au carré de l'amplitude de pression, et inversement proportionnelle à l'impédance acoustique ;

$$I = \frac{p^2}{Z}$$

où I est l'intensité acoustique (en W/m²), p est la pression acoustique (en N/m²), Z est l'impédance acoustique (en N s/m³). Pour mieux comprendre la relation entre les grandeurs et les unités impliquées, consultez l'Annexe E.

Le bel (de Graham Bell¹) est une unité sans dimension utilisée pour exprimer le rapport des valeurs de deux intensités, le nombre de bels étant égal au logarithme décimal (en base 10) de ce rapport.

$$N_{Bels} = \log_{10} \frac{I_1}{I_2}$$

Le décibel est la dixième partie du bel. Le bel est une unité trop grande pour l'intensité acoustique et est assez rarement utilisé. Symbole : dB.

$$N_{dB} = 10 \log_{10} \frac{I_1}{I_2}$$

Pour éviter la confusion dans la terminologie, on parlera d'*intensité acoustique* quand on l'exprime en Watt/m² et de *niveau d'intensité acoustique* quand on l'exprime en décibels. En

¹Alexander Graham Bell (1847-1922) était un inventeur canadien d'origine écossaise. Après avoir mis au point, à l'usage des sourds, un appareil traduisant les vibrations acoustiques en oscillations électriques, il conçut le téléphone en 1876.

anglais, le symbole pour le niveau d'intensité est généralement L (« Level ») ou SPL (« Sound Pressure Level »).

4.3 Seuils et limites

4.3.1 Les limites de l'oreille humaine

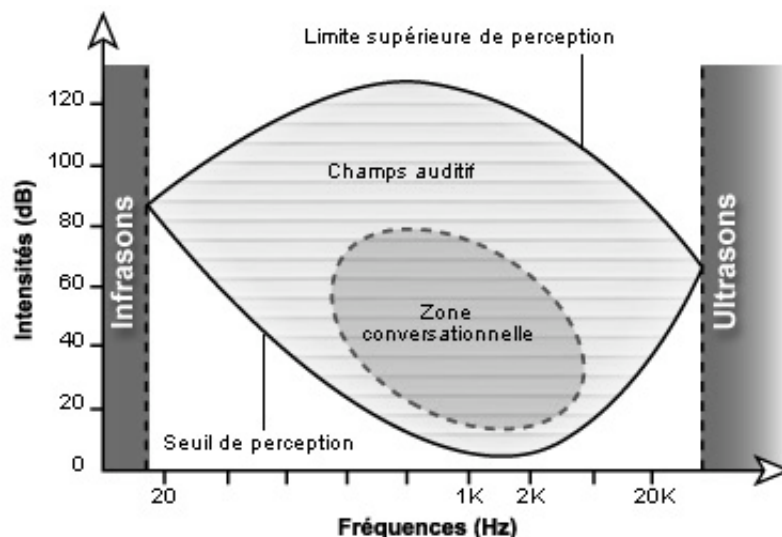
On considère généralement que l'oreille humaine n'est sensible qu'à des sons dont la fréquence est comprise dans l'intervalle 20 Hz à 20 000 Hz.

Une **région de sensibilité maximum**, associée à la résonance du canal auditif, se situe autour de 3 500 Hz. La perte de sensibilité décline à un taux d'environ 6 dB par octave (c'est-à-dire pour chaque doublement de fréquence) en-dessous de 1 000 Hz et elle décline à un taux d'environ 24 dB par octave au-dessus de 4 000 Hz.

Les **seuils d'inconfort et de douleur** varient peu en fonction de la fréquence et valent autour de 120 ou 130 dB. La différence de niveaux entre le seuil absolu et le seuil d'inconfort ou de douleur est appelée l'étendue dynamique (variant avec la fréquence). L'étendue dynamique est la plus grande entre 1 000 et 4 000 Hz.

Les **ultrasons** (au-dessus de 20 000 Hz) sont inaudibles pour nous mais audibles pour certains animaux (chiens, chats, dauphins, chauve-souris, etc.). Les ultrasons sont utilisés dans les télécommunications, et dans certaines technologies médicales (par exemple, pour les échographies).

Les **infrasons** (en dessous de 20 Hz) sont omniprésents. De très basses fréquences peuvent être produites dans les bâtiments par les longs conduits de conditionnement d'air (vibrations de ventilateurs), par les secousses sismiques et aussi par l'action du vent. En général, il est utile d'avoir une sensibilité réduite aux basses fréquences, ce qui diminue la gêne qui leur est associée. Mais les sons subsoniques agissent sur l'oreille interne et l'organe d'équilibre en particulier, pouvant causer des vertiges, ainsi que des troubles digestifs et de la vue, similaires aux symptômes du mal de mer. Les infrasons sont encore bien mal connus, de même que leurs effets à long terme.



Seuil absolu de sonie

Le seuil absolu de sonie est la grandeur d'excitation (niveau d'intensité en dB) pour laquelle la sonie d'un son est juste perçue. On obtient cette valeur limite en cherchant avec quelle probabilité un stimulus est perçu lorsqu'il a une grandeur donnée. Par exemple, on stimule l'oreille 100 fois et l'on compte combien de fois le stimulus donne lieu à une sensation. Si le stimulus croît, la probabilité que celui-ci soit perçu, augmente. On prend pour valeur limite d'excitation, la valeur correspondant à une probabilité de 0,5. Autrement dit, la valeur limite est celle pour laquelle le sujet détecte le signal dans 50% des cas. Elle est généralement obtenue en établissant une fonction psychométrique avec l'une des méthodes psychophysiques vues précédemment.

Un seuil absolu qui est bas signifie que la personne est très sensible, car le stimulus au seuil a une faible valeur.

Exemple : Madame Gagnon a un seuil de 6 dB alors que Monsieur Tremblay a un seuil de 18 dB. Madame Gagnon est donc plus sensible que Monsieur Tremblay.

Cette valeur n'est cependant pas la même pour l'ensemble des fréquences. En effet, la sensation de sonie varie considérablement selon la région spectrale étudiée. L'oreille est en effet beaucoup plus sensible aux fréquences qui se situent autour de 3400 Hz alors qu'elle l'est beaucoup moins aux fréquences graves et très aiguës. Le seuil absolu varie non seulement d'un individu à l'autre mais également d'une oreille à l'autre chez la même personne. De plus, le seuil change en fonction de l'âge des individus qui voient leur sensibilité diminuer avec l'accroissement de celui-ci, particulièrement aux fréquences aiguës. Enfin, une longue exposition à des niveaux sonores élevés peut provoquer des phénomènes de surdité, partielle ou totale, temporaire ou permanente.

Seuil différentiel de sonie

Le seuil différentiel de sonie correspond à la différence de sonie « tout juste audible ».

Seuil masqué de sonie

Le seuil masqué est la valeur pour laquelle le sujet détecte un son pur² en présence d'un autre stimulus qui peut être soit un autre son pur, soit un bruit ou une bande de bruit dont les caractéristiques physiques (fréquence, intensité, largeur de bande) sont connues avec une grande précision. Nous verrons plus en détail la notion de masque dans le chapitre sur la sonie des sons complexes.

4.3.2 Méthodes pour la mesure des seuils de sonie

Les seuils peuvent être obtenus en *champ libre* (MAF) ou *sous écouteurs* (MAP)³.

Minimum Audible Field (MAF)

Le son est présenté par haut-parleurs, dans une salle anéchoïque (une salle qui absorbe le son au maximum, pour avoir le moins de réflexion et réverbération possible). Lorsque le sujet a terminé le test d'audition, on place un microphone à l'endroit où était le centre de

²Dans le cas de la sonie des sons purs.

³En champ libre : où une seule onde provenant de la source se dirige vers chaque point de celui-ci. En champ diffus : où plusieurs ondes acoustiques, directes et réfléchies, se propagent de la source vers chaque point de celui-ci.

sa tête afin d'avoir la mesure exacte de la pression présentée. Normalement, l'auditeur est placé face à la source (haut-parleurs) et à une distance de 1 mètre.

Minimum Audible Pressure (MAP)

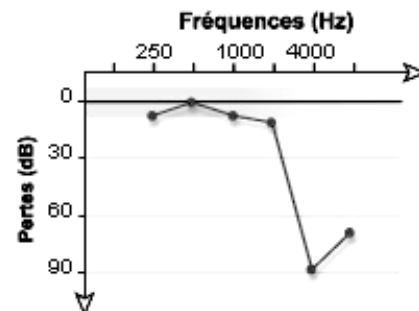
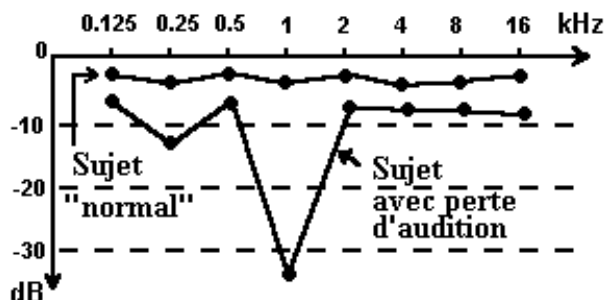
Suivant cette méthode, la mesure de la pression est prise à l'entrée du canal auditif ou à l'intérieur (tout près du tympan). Même si cette procédure peut paraître excessivement précise, les écouteurs de différentes marques et de différents types peuvent mener à des différences sensibles entre les seuils. Puisqu'une différence de 3 dB signifie une intensité doublée, il faut donc être le plus précis possible. Les écouteurs peuvent être supra-auraux (reposant sur le pavillon, comme la plupart des écouteurs commerciaux), circumauraux (reposant autour du pavillon sans l'aplatir) ou encore à insertion (insérés dans le canal auditif).

Il y a bien sûr des différences entre les méthodes MAF et le MAP, liées à la façon de prendre la mesure. Lorsque les données sont corrigées pour tenir compte de diverses erreurs ou difficultés expérimentales (diffraction de la tête, résonance de l'oreille externe, type de calibration utilisée, etc.), les différences sont au maximum de 2,5 dB. Plus important, les courbes obtenues par ces deux méthodes ont la même forme, et il n'y a donc pas de différences qualitatives entre les deux types de mesures. Notons également que les mesures de seuils pour les fréquences très élevées (supérieures à 8000 Hz) ou très basses (inférieures à 250 Hz) ne sont pas souvent prises en compte en clinique d'audiologie car elles ne sont pas très fiables. Les limitations sont dues, par exemple, aux dimensions des haut-parleurs des écouteurs qui ne peuvent pas reproduire les très basses fréquences.

4.3.3 L'audiométrie

L'audiométrie permet de *quantifier* la perte auditive, et de la *catégoriser* en termes de sévérité (perte auditive légère, moyenne, sévère), par rapport à des normes (données provenant d'une population représentative). Les seuils tels qu'examinés dans les cliniques d'audiologie sont directement dérivés de procédures expérimentales élaborées en laboratoire (rigoureuses et précises). Elles sont adaptées pour la clinique, de façon à atteindre un compromis entre les contraintes de temps et la précision requises par la clinique. Pour trouver un seuil en clinique par exemple, on procédera normalement par pas de 5 dB, alors qu'on sera beaucoup plus précis dans une expérience psychophysique.

Un **audiogramme** est une courbe qui indique, en fonction de la fréquence, la perte d'audition, en décibels par rapport à un niveau zéro considéré comme normal (exprimé en dB HL).



Les différents types de décibels

Une valeur exprimée en décibels donne une mesure du niveau d'intensité qui est relative puisqu'elle est fonction du rapport de l'intensité observée (I) à une intensité de référence (I_{ref}).

$$N_{dB} = 10 \log \frac{I}{I_{ref}}$$

Rappelons que l'on peut aussi exprimer les décibels en fonction d'un rapport de pressions acoustiques :

$$N_{dB} = 20 \log \frac{p}{p_{ref}}$$

Des variantes du décibels absolus ont été définies en fonction du niveau de référence.

- **dB SPL** (*Sound Pressure Level*) : référence $p_{ref} = 20 \mu\text{Pa}$, ce qui correspond à un seuil absolu moyen d'audition pour un son pur à 1000 Hz.
- **dB SL** (*Sensation Level*) : référence = seuil de détection pour une personne donnée ou pour un groupe donné de personnes (utilisé moins fréquemment que le dB SPL).
- **dB HL** (*Hearing Level*) : référence = norme pour une population donnée établie par un organisme (International Standard Organization ISO, ANSI, etc.)

4.4 L'échelle de sonie

L'échelle de sonie a été obtenue par mesurage par Stanley Smith Stevens. La question que se posait Stevens est la suivante : « Comment la sonie (sensation d'intensité) évolue-t-elle en fonction du niveau de pression sonore ? »

Afin de construire une échelle de sonie, Stevens a demandé à un ensemble de participants de choisir des nombres proportionnels à la sonie des sons qui leur sont présentés à la suite d'un son de référence. Par exemple : si le sujet juge que le son est 4 fois plus fort que le son de référence de valeur « 100 », il attribue le nombre « 400 » au son de comparaison.

Déduite de ces expérimentations, la **loi de puissance** de Stevens pour la sonie d'un son (à des niveaux supérieurs à 30 dB SPL) stipule que l'intensité perçue augmente comme l'intensité physique I élevée à la puissance 0,3 (ou à la pression p élevée à une puissance de 0,6) :

$$\Delta_{sonie} = (I_2/I_1)^{0,3} = (p_2/p_1)^{0,6}$$

Ainsi, chaque fois que l'intensité est multipliée par 10 (soit une augmentation de 10 dB), on obtient une sonie doublée :

$$\Delta_{sonie} = (I_2/I_1)^{0,3} = (10)^{0,3} = 2$$

En pratique, cela signifie que pour augmenter la sonie par un facteur 2 dans un orchestre, il faut augmenter le nombre de sources par un facteur 10. Autrement dit, 10 violonistes jouant au même niveau sonnent seulement 2 fois plus fort qu'un violoniste jouant seul.

Rappel (cf. cours d'introduction à l'acoustique musicale) : Si k sources identiques d'intensité I et donc de niveau d'intensité N ($= 10 \log I/I_o$) dB sont additionnées, le niveau d'intensité totale N_T est donnée par la formule :

$$N_T = N + 10 \log k$$

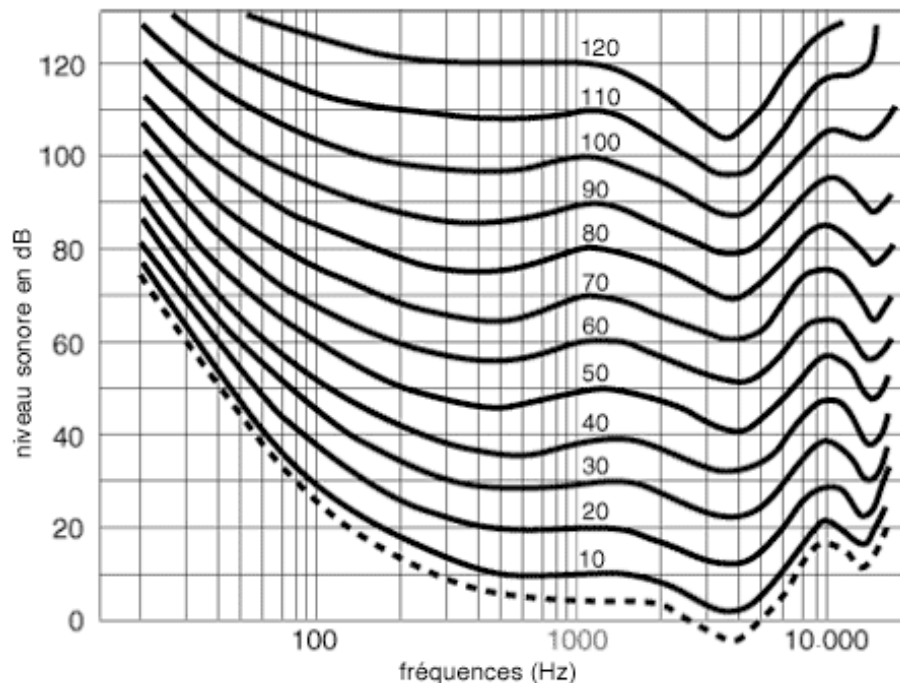
L'unité de la sonie : le sone

Le sone (d'après le mot «son» en latin) est une unité psychoacoustique utilisée pour la mesure de la perception de l'intensité. Par convention, on a accordé à la valeur de 1 sone l'intensité perçue d'un son de 1000 Hz d'une intensité physique de 40 dB SPL en champ libre. Si un son est perçu comme étant 2 fois plus fort que ce son de référence, c'est qu'il a une sonie de 2 sones ; s'il est perçu comme étant 4 fois plus fort, c'est qu'il a une sonie de 4 sones, et ainsi de suite.

L'aspect le plus utile de l'échelle de sonie est la valeur relative qu'elle nous permet de mesurer. Il peut en effet être utile de connaître le nombre d'unités (ici le nombre de sones) qu'il faut ajouter ou soustraire à un son donné pour que le sujet ait une sensation de sonie augmentée ou diminuée dans un certain rapport, par exemple un rapport du double ou de la moitié. Il est remarquable qu'à cet égard le résultat ne soit pas nécessairement le même selon que l'on fait varier le stimulus dans un sens ou dans l'autre (effet d'hystérésis).

4.5 Les courbes d'isophonie

De *iso* (même) et *sonie* (intensité perçue), les courbes d'isophonie sont les courbes qui établissent une *sensation de sonie égale* des sons purs en rapport avec la fréquence (soit en champ libre, ce qui est généralement le cas, soit en champ diffus).



Les courbes d'isotonie répondent à la question : « Considérant des sons purs à différentes fréquences, quelles intensités sonores doivent-ils avoir pour être perçus avec la même sonie ? »

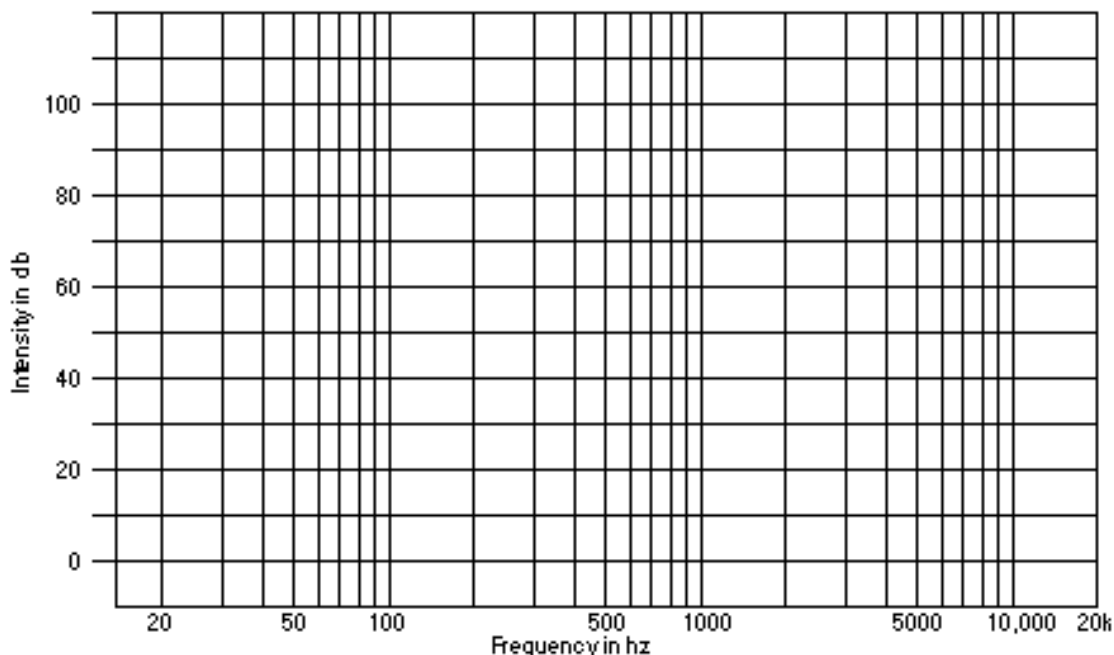
Ces courbes ont été obtenues à la suite de nombreuses expériences visant entre autres à déterminer le seuil d'audition (plus petite intensité perçue) ainsi que le seuil de la douleur (intensité qui provoque une douleur à l'intérieur du système auditif) à toutes les fréquences. Comme la sonie varie d'un individu à l'autre, les courbes d'isotonie représentent des moyennes.

En anglais, on les nomme les *Fletcher-Munson Equal Loudness Curves*.

Globalement, les courbes d'isotonie nous indiquent que la sensibilité maximale de l'oreille se situe entre 2 et 5 kHz alors qu'elle diminue lentement vers les fréquences graves et rapidement vers les fréquences aiguës.

On peut noter également que les différences d'intensité acoustique nécessaires à une sonie égale diminue, sur l'ensemble des fréquences, selon le niveau acoustique considéré. Ainsi on trouve au niveau du seuil d'audition une différence qui va jusqu'à 65 dB entre les différentes fréquences alors qu'au seuil de la douleur, qui se situe aux environs de 130 dB pour l'ensemble des fréquences, cette différence est beaucoup plus petite autour de 20 dB. En fait, plus l'intensité acoustique est grande, plus les courbes sont parallèles entre elles et plus elles s'aplatissent.

Les courbes isotoniques sont souvent représentées sur un **graphe semi-logarithmique**, linéaire pour l'intensité (en ordonnée) et logarithmique pour la fréquence (en abscisse), comme illustré sur la figure ci-dessous. Sur une échelle logarithmique, les valeurs qui présentent un rapport constant entre elles (par exemple : 10, 100, 1000, 10000, etc.) sont représentés sur des degrés de l'échelle équidistants.

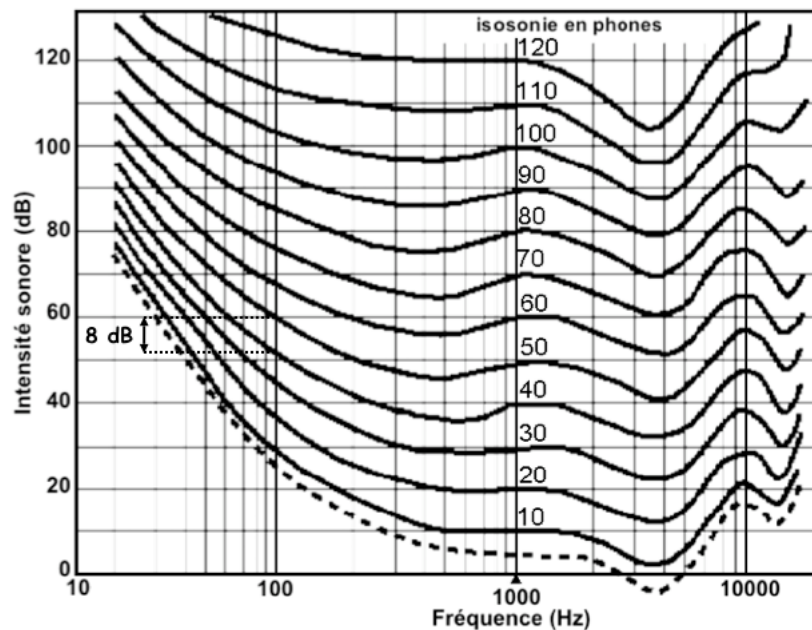


Comment obtient-on des courbes d'isotonie ?

Pour obtenir une courbe d'isotonie, on prend un son pur de référence à 1 000 Hz, à un niveau donné en dB SPL, par exemple 40 dB. Ensuite, le sujet doit ajuster le niveau d'un son de comparaison, par exemple un son pur de 1 300 Hz, de façon à ce que ce son procure la même sensation d'intensité que le son de référence. Autrement dit, le son de comparaison est ajusté de façon à ce qu'il sonne aussi fort (ou aussi doux) que le son de référence. Notons que ce n'est pas une tâche évidente étant donné que dans ce cas-ci les fréquences diffèrent. On refait la même procédure pour un grand nombre de fréquences et on obtient une courbe pour un niveau donné (40 dB SPL). Ainsi, tous les points reliés par une même courbe représentent des sons qui ont une même intensité subjective (une même sonie), équivalente à celle du son de référence.

4.6 Les niveaux d'isotonie exprimés en phones

Le phone est une échelle semi-objective, semi-subjective de mesure du niveau d'isotonie. À partir des courbes d'isotonie décrites plus haut (mesures subjectives), Barkhausen a attribué à un son pur de 1 kHz un nombre de phones correspondant à son niveau en dB (mesures objectives). Autrement dit, à 1000 Hz, le phone est équivalent au dB et tous les points sur une même courbe d'isotonie ont donc un niveau en phones équivalent au niveau en dB du son de référence à 1 000 Hz. En quelque sorte, le phone donne une étiquette à chacune des courbes isotoniques. Suivant ce principe, un son pur de 1 kHz, d'un niveau d'intensité acoustique de 60 dB, aura une sonie de 60 phones. Pour être ressenti avec la même sonie, un son de fréquence 100 Hz devra se situer sur la même courbe isotonique de 60 phones, ce qui correspond à une intensité acoustique d'environ 68 dB (en champ libre). On peut noter aussi que le seuil de l'audition se situe à un niveau isotonique de 4 phones (et non pas de 0 phones).



Selon Stevens, l'intensité perçue double à chaque fois qu'on augmente de 10 dB (qu'on multiplie par 10), pour des valeurs au-delà de 30 dB, ce qui donne pour des sons purs à 1 kHz :

$$\begin{aligned} 1 \text{ sone} &= 40 \text{ dB} = 40 \text{ phones} \\ 2 \text{ sones} &= 50 \text{ dB} = 50 \text{ phones} \\ 4 \text{ sones} &= 60 \text{ dB} = 60 \text{ phones} \\ 8 \text{ sones} &= 70 \text{ dB} = 70 \text{ phones} \\ 16 \text{ sones} &= 80 \text{ dB} = 80 \text{ phones, etc.} \end{aligned}$$

La relation mathématique entre le sone et le phone est :

$$S = 2^{\frac{P-40}{10}} \quad \text{ou} \quad P = 40 + 10 \frac{\log S}{\log 2}$$

où P est la sonie en phones et S est la sonie en sones.

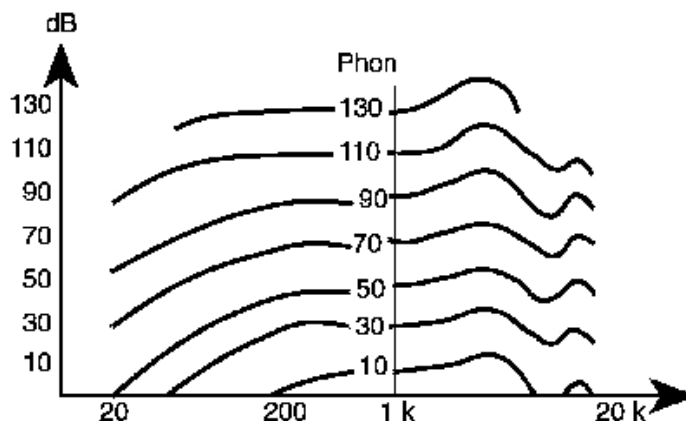
De la relation entre le phone et le sone, on peut déduire que la sonie double à chaque fois que l'on passe d'une courbe d'isotonie à la suivante (au-delà de 30 dB). Ainsi, à 1000 Hz, la sonie double par sauts de 10 dB, mais à 100 Hz et à bas niveaux, la sonie double par sauts plus petits. Sur le graphique de la page 63, on peut voir qu'à 100 Hz, en partant de 40 phones, la sonie est doublée par une amplification de 8 dB seulement.

En-deçà de 30 dB, le nombre de dB nécessaires pour obtenir une intensité perçue doublée diminue, jusqu'à 2 dB à 10 phones.

4.7 Les dB pondérés (dBA, dBB, dBC, etc.)

Les valeurs en décibels pondérés sont obtenues à l'aide de filtres de pondération qui permettent de calculer la sonie totale d'un son complexe en relativisant la contribution de certaines fréquences qui entrent dans la composition de ce son. Globalement, ces filtres sont le *reflet inversé* des courbes isotoniques (*cf.* figure ci-dessous) : Ils atténuent l'intensité physique des fréquences auxquelles l'oreille est moins sensible (basses et hautes fréquences).

Comme nous l'indiquent les courbes d'isotonie, à intensité physique égale, un son n'aura pas la même sonie selon sa fréquence. Si l'on ne tient pas compte de cette réalité et qu'on effectue uniquement des mesures d'intensité acoustique, cela ne nous renseignera pas sur les intensités réellement perçues.



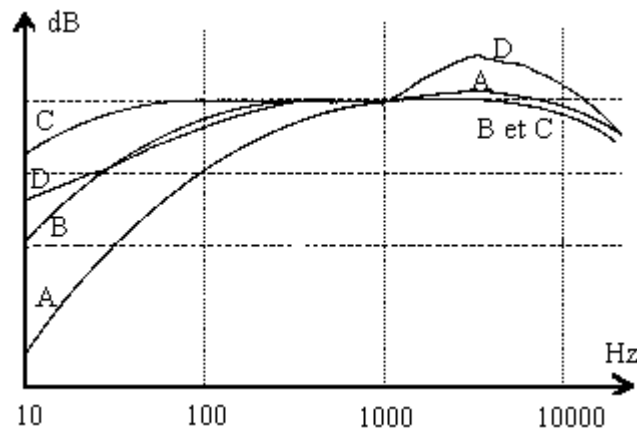
Or, en plusieurs occasions (par exemple pour les mesures de bruit faites en usine afin de déterminer les seuils tolérables), on a besoin d'obtenir une mesure de l'intensité acoustique qui se rapproche le plus de celle qui est perçue. En appliquant un filtre de pondération, on diminuera l'intensité acoustique des fréquences auxquelles l'oreille est moins sensible de manière à ce que le résultat (la somme des intensités de l'ensemble des composantes d'un son complexe ou même de différents sons purs) soit le plus conforme à ce qu'une oreille normale entendrait.

Historiquement, le premier filtre de pondération qui est apparu est le filtre A. Puis, les progrès sur les plans technologique et psychoacoustique aidant, sont apparus trois autres filtres nommés respectivement filtres B, C et D. Les valeurs d'intensité acoustique obtenues grâce à ces filtres sont généralement désignées par un nombre n de dB assortis du nom du filtre. Ainsi un son mesuré à l'aide du filtre A aura une intensité de n dBA.

Les différents filtres de pondération correspondent aux différents niveaux sonores :

Sonie < 55 phones : dBA
 Sonie entre 55 et 85 phones : dBB
 Sonie > 85 phones : dBC

La pondération D est appliquée pour tenir compte de la gêne causée par les sifflements (à hautes fréquences) perçus à l'intérieur des avions modernes. On retrouve ces pondérations sur les appareils de mesure de bruit (sonomètres).



Sur la figure ci-dessus, on peut remarquer, par exemple, que le filtre C est plus plat que le filtre A. En effet, à faible intensité, la différence de sonie aux basses fréquences et aux fréquences moyennes est plus importante (autour 60 dB) qu'à forte intensité (autour 20 dB).

NB : Il ne faut pas confondre les dB(A,B,C,D) avec dBu, dBm, etc.

4.8 Rôle du bouton « Loudness »

Sur certains systèmes de son, on retrouve un bouton *Loudness* qui applique un filtre de pondération sur le son de façon à amplifier les basses fréquences. Ce bouton ne devrait être enfoncé que lors d'une écoute à bas niveau, puisque son rôle est de compenser la perte de sensibilité du système auditif pour les basses fréquences à bas niveau.

