* Elements de psychoacoustique *

1- Introduction

La psycho acoustique a pour objet l'étude des relations entre, les stimuli acoustiques physiquement mesurables, et, les sensations auditives.

Les principaux caractères des sensations auditives sont :

- l'intensité perçue, ou Sonie,
- la hauteur perçue ou Tonie,
- le timbre,
- la durée,
- la localisation spatiale.

2- Détermination du champ auditif

● Seuil absolu d'audibilité

L'amplitude minimale d'une vibration audible correspond au déplacement du tympan de 10^{-12} m soit un pm (picomètre = millionième de micron).

A ce déplacement correspond une pression acoustique $P_{amin}= 2.10^{-5}$ Pa

et, une intensité acoustique $I_{amin}=10^{-12}$ W/m^2

L'oreille est un récepteur extrêmement sensible. Aucun capteur n'égale encore sa sensibilité

● Seuil de la douleur

Le déplacement maximal du tympan, supportable durant une très courte durée, est de 10^{-6} m soit un micron. Il correspond à une pression acoustique P_{amax} = 63 Pa

et, à une intensité acoustique I_{amax} = 10 W/m^2.

Un son soutenu, d'une telle intensité est douloureux et lése l'oreille.

Un son d'une intensité supérieure, même bref, est destructeur.

Les lésions auditives sont irréversibles.

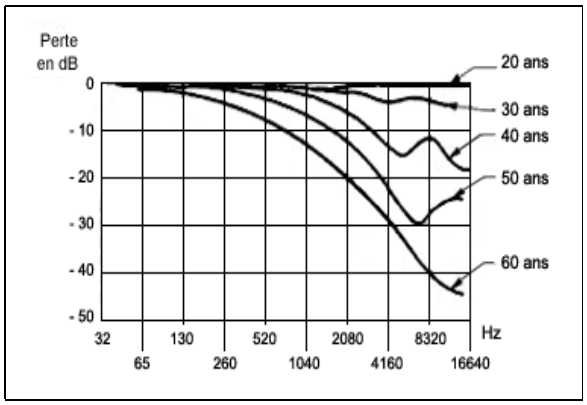
● Bande passante auditive

La gamme des fréquences audibles perçues est comprise entre F_{min}=16 Hz et F_{max}=16 kHz. Qui représente un espace musical de 10 octaves (2^{10}=1024).

Un nouveau né peut percevoir un son dont la fréquence avoisine 22kHz. Cette limite supérieure chute, à 18kHz, dès l'age de trois mois. Elle se stabilise ensuite vers 16kHz, puis se dégrade en vieillissant.

Après 60 ans, il est rare de percevoir un son dont la fréquence est supérieure ou égale à 8 kHz.

La figure qui suit illustre la bande passante d'une oreille moyenne en fonction de l'age.



● **Restriction**

Ces limites, d'intensités acoustique, et de bande de fréquence, ne définissent pas totalement le champ auditif car, le seuil d'audition absolu, varie avec la fréquence.

Sommairement:

- Aux fréquences basses (f < 500Hz), la sensibilité est proportionnelle à la fréquence.
- Aux fréquences Aigues (f > 4kHz) la sensibilité est inversement proportionnelle à la fréquence.
- Aux fréquences comprises entre 400 et 2kHz elle est stationnaire
- Aux fréquences comprises entre 2 et 4kHz, sa sensibilité est accrue.

Le seuil absolu d'audition n'est pas identique pour les deux oreilles. La différence interaurale est variable et peut atteindre 6 dB.

3- Loi de FECHNER-WEBER

En psychophysique elle cherche à décrire la relation de la sensation avec la grandeur physique d'un stimulus.

Elle fut trouvée par Gustav Fechner (1801-1887) et s'exprime par la formule suivante

$$S=k.\log(I).$$

dans laquelle

- S est la sensation éprouvée,
- k une constante, et,
- I l'intensité du stimulus

En hommage à son précurseur Ernst Weber (1795-1878) qui fut l'un des premiers à aborder ces travaux, Fechner lui donna le nom de **loi de Weber**. Les scientifiques qui suivirent l'identifieront sous les deux noms.

Ainsi donc applicable à chacun de nos sens la loi de Fechner-Weber s'exprime

" la sensation varie comme le logarithme de l'excitation ".

Appliquée à notre audition, c'est la loi établissant la relation, entre le niveau d'une stimulation sonore, et sa sensation.

Elle est à l'origine de l'emploi des décibels.

4- Perception différentielle

L'oreille est plus apte à détecter la différence entre deux grandeurs, que pour évaluer leurs niveaux respectifs.

Cela est sans doute dû au fait que l'oreille est un organe d'alerte. Elle favorise la perception des variations du champ sonore.

● **Perception différentielle des intensités acoustiques**

Notre système auditif est plus sensible aux écarts d'intensité acoustiques qu'à leur valeur respective.

En considérant l'intensité initiale d'un son, il est nécessaire, d'en augmenter suffisamment le niveau, pour percevoir une différence de sensation.

Le seuil correspondant s'appelle "***seuil de perception différentielle d'intensité***".

Le seuil de perception différentiel d'intensité moyen est de l'ordre de 10%. Il correspond à un seuil différentiel de pression de 5%.

Ainsi si l'intensité acoustique s'élève de n échelons successifs correspondant pour chaque échelon au seuil de perception différentiel d'intensité $\Delta I_{a(n)}/I_{a(n)}$

on peut écrire: $\Delta S_{(n)}=k_n.\ \Delta I_{a(n)}/I_{a(n)}$

que l'on peut assimiler à l'équation différentielle $dS=k_n.\ dI_a/I_a$

qui après intégration donne $S=k_n.\ \mathrm{Ln}\ (I_a/I_{a0})$

Avec Ln la notation du logarithme népérien.

Or Fechner a constaté que la variation de sensation est identique lorsque l'on passe de l'écoute d'une source sonore à 10 sources de caractéristiques identiques, puis de 10 à 100, de 100 à 1000, etc..

Observation que l'on peut traduire par $I_a/I_{a0} = 10/1 = 100/10 = 1000/100 = 10.$

et qui permet d'écrire la sensation $S=k_d.\log I_a/I_{a0}$

avec log le logarithme décimal.

Remarque 1:

Si, $k_d = 1$, S est exprimé en Bel(s). Ainsi $S_{(B)}= \log I_a/I_{a0}$

Si $k_d = 10$, S est exprimé en déciBels (dB), et $S_{(dB)}=10.\log I_a/I_{a0}$

- Le Bel (B) est une unité trop importante pour exprimer finement nos sensations, c'est la raison qui nous fait préférer son sous multiple le dB.
- Au seuil de perception différentiel d'intensité de 10% précédemment donné correspond une sensation $S_{(dB)}$ = 10.log (1,1/1)= 0,4dB.
- A une dynamique (dite orchestrale) de 130dB correspond 130/0,4= 325 pas de sensibilités.

Remarque 2*:* Dans l'expression de la sensation, le passage des logarithmes népériens aux logarithmes décimaux est explicité plus clairement dans le chapitre " Les décibels".

Remarque 3*:* La sensibilité différentielle du système auditif est quasi constante, et, pratiquement indépendante de l'intensité acoustique, sur une grande étendue du spectre audible.

Toutefois il augmente quand on se rapproche des limites fréquentielles de l'audition.

Remarque 4*:* C'est ce constat que fit Stanley Smith Stevens (1906-1973) qui édita la loi qui porte son nom « La loi de stevens » et que l'on écrit: $S=k.I^{\alpha}$

dans laquelle S est la sensation, k une constante, I l'intensité du stimulus et a , l'exposant de Stevens, et qui dépend du domaine de perception.

Malgré cela, nous restons, dans le domaine de l'audition, très attachés aux travaux de Fechner.

La sonie

La sonie est le nom donné à la sensation qui nous fait juger si un son est fort ou faible.

La sensation de sonie dépend non seulement de l'intensité du son mais aussi de sa durée.

Lorsque la durée d'un stimulus est inférieure à 200ms, pour avoir une même sensation d'intensité il faut, si on divise la durée du stimulus par deux, doubler son intensité.

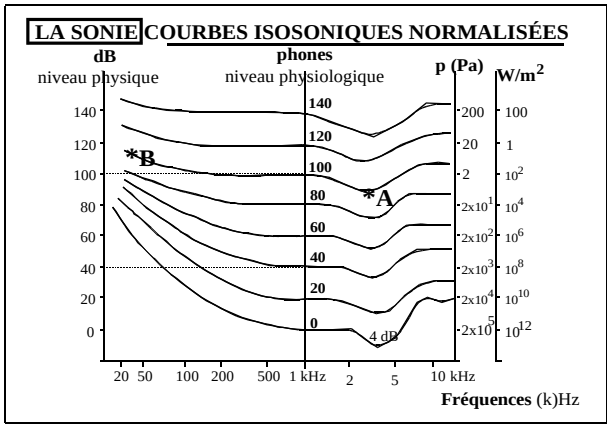
Vous noterez que:

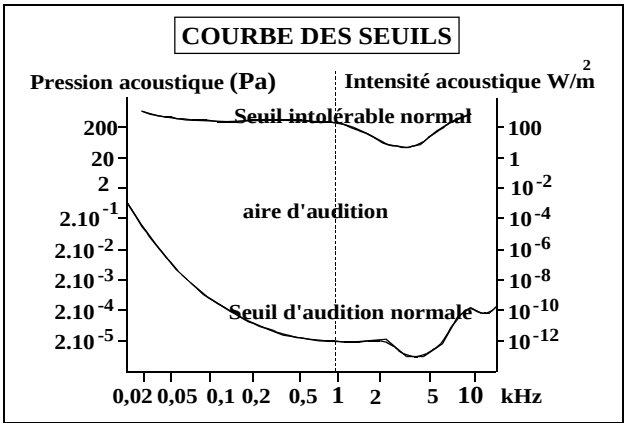
- le produit de l'intensité par la durée reste constant.
- L'intensité acoustique, étant la puissance acoustique par unité de surface est donc synonyme de puissance. Le produit d'une puissance par un temps correspondant à une énergie.
- Dans le cas qui nous intéresse, l'énergie par unité de surface doit rester constante.

Pour une même Intensité acoustique, deux sons purs de fréquences différentes ont en général une sonie différente. Cela conduit à prendre une ***unité de niveau subjectif: Le phone.***

Par convention, le phone est étalonné sur l'échelle des décibels. Quelle que soit l'intensité acoustique, décibels et phones sont identiques à 1kHz. Ainsi, un son de n dB à 1kHz a un niveau de n phones.

Le niveau sonore, exprimé en phones, d'un son pur perçu, est le même que celui d'un son pur de 1kHz, exprimé en dB, et donnant la même sensation sonore.





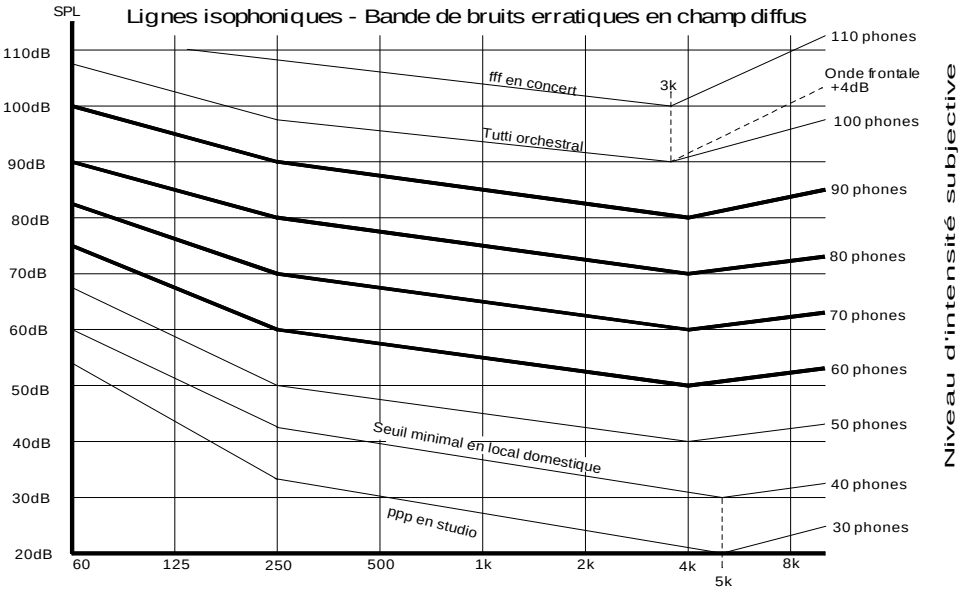
Les définitions qui précèdent nous indiquent que ces réseaux de courbes,

ne sont valables que pour des sons purs et entretenus.

Dans la réalité les sons sont continûment variés.

Afin d'en mesurer leur effet, des études ont été commanditées par la BBC et réalisées par le « National Physical Labotary » britannique dans les années 1960, soit un siècle après les travaux de Fechner.

Le réseau de courbes asymptotiques suivant illustre le résultats de ces travaux.



Elles font apparaître des écarts , moindre que les courbes de Fechner.

C'est ce réseau de courbe qu'il nous faut prendre en compte pour l'évaluation des bruits de la vie courante.

C'est aussi lui qui peut guider pour la réalisation d'un étage de compensation de niveau du type Loudness, trop souvent basé sur les courbes isophoniques de Fechner-Weber.

● La Tonie

✓ Perception différentielle en fréquence

Comme pour l'intensité sonore il a été possible de déterminer la plus petite des différences de fréquence Δf qui distingue une variation de hauteur ΔH de deux sons consécutifs.

Δf dépend de la fréquence,

Le rapport de l'écart de fréquence Δf, sur la fréquence f, précédemment considérés, soit $\Delta f/f$, est appelé "seuil de perception relatif en fréquence". Il est quasi constant et égal à 3.10^{-3} soit 0,3%, pour une oreille moyenne, dans la gamme de fréquence comprise entre 400Hz et 4kHz.

✓ Hauteur sonore

C'est une perception liée principalement à la fréquence.

La sensation de hauteur varie:

❖ Avec la fréquence

La hauteur perçue, appelée aussi hauteur subjective , est différente de la fréquence physique émise.

Au delà de 1kHz, la fréquence doit être plus que doublée pour produire une sensation de hauteur double.

❖ Avec l'intensité

Lorque l'intensité d'un son pur croit, la sensation de hauteur varie.

- Elle croit pour les fréquences élevées.
- Elle décroît pour les fréquences basses.

Les écarts peuvent atteindre + ou – 8% de la fréquence émise, et justifier une sensation de fausseté d'un instrument.

Pour attribuer une hauteur précise à un son il faut que celui ci ait non seulement un certain niveau d'intensité acoustique (appelé seuil de perception tonale), et une durée suffisante.

❖ Avec la durée

Un son pur dont la durée est inférieure à 10ms est perçu comme un "clic".

Un son pur bref n'est pas perçu comme un son permanent. Ainsi un son pur de 1kHz, dont la durée est de 20ms, sera perçu comme un son de fréquence inférieure.

La sensation de croissance de la hauteur ou ΔH pour chaque variation de fréquence suit la ***loi indicative de Weber***

$$\Delta H = K_n . \Delta f/f$$

Qui après intégration donne $$H = K_n . \text{Ln } f/f_0$$

Remarque: Le début des travaux, tentant à définir notre perception subjective de l'écoulement du temps, datent du milieu du 19° siècle , sous l'impulsion du physiologue, psychologue Johann Czermak (1828-1873),

Malgré quelques avancées, sachant que c'est le cervelet qui en est le gestionnaire, le mécanisme de la perception des temps brefs (concernant: le langage, la musique et notre contrôlre moteur) reste inconnu.

❖ **Intervalles musicaux**

La précédente formule permet de définir la différence de hauteur H_1 - H_2 qui existe entre deux sons de fréquences respectives f_1 et f_2.

A partir d'une fréquence de référence f_0 la hauteur liée à la fréquence f_1 est: $H_1= K_n.Ln(f_1/f_0)$.

Dans les mêmes conditions, la hauteur liée à la fréquence f_2 est: $H_2= K_n.Ln(f_2/f_0)$.

et l'écart de hauteur, $H_2 - H_1= K_n.[Ln(f_2/f_0)- Ln(f_1/f_0)]$

$= K_n.[Ln(f_2)- Ln(f_0)- Ln(f_1)+ Ln(f_0)]$, soit

$H_2 - H_1= K_n. Ln(f_2/f_1)$.

✓ **L'octave** :

Par définition $f_2=2.f_1 \Leftrightarrow : f_2 / f_1 = 2$

Ainsi, f_2 est situé à l'octave supérieur de f_1 ou f_1 est situé à l'octave inférieur de f_2.

L'octave est l'unité d'intervalles de hauteurs sonores, ce qui permet de poser $H_2 - H_1 = 1$,

soit: $1=K_n. Ln(2)$

relation qui ne peut être satisfaite que pour $K_n= 1/Ln(2) = 1,443$

$H_2 - H_1 = 1,443 Ln (f_2 / f_1)$

Pour employer les logarithmes décimaux, plus faciles d'emploi, il suffit de poser:

$1=K_d. log_{10}(2)= K_d. log(2)$

relation satisfaite pour $K_d=1/log(2) = 3,32192$

$H_2 - H_1 = 3,32192 log(f_2 / f_1)$

remarque: L'emploi des logarithmes à base 2 auraient permis d'écrire

$H_2 - H_1 = log_2(f_2 / f_1)$

Les sous multiples de l'octave sont par ordre décroissant: le ton, le demi ton, le coma , et le savart.

✓ **Le savart**

Le nombre de savarts N_s inclus dans un octave d' une gamme naturelle se déduit de la formule suivante

$N_{sgn}= 10^3 log(2)= 301$

dans laquelle on a considéré $log(2)=0,301$

Le nombre de savarts N_s inclus dans un octave de la gamme tempérée, se déduit de la même formule

$N_{sgt}= 10^3 log(2)= 300$

mais dans laquelle on a considéré $log(2)=0,3$. C'est la, la grande astuce de J.S Bach, auquel on doit cette gamme

Remarque : Un savart correspond au rapport d'écart de fréquences ($\Delta f=f_2-f_1$)

Relativisé par rapport à la fréquence de référence f1

$\Delta f/f_1=2,3\ 10^{-3}$

Dans la gamme tempérée:

✓ **Un coma:** égale 5 savarts

✓ **Un demi ton:** comprend 5 comas soient 25 savarts

✓ **Un ton** : correspond à 2 demi tons soient 10 comas ou 50 savarts.

Et ainsi l'octave comprend 12 demi tons, soient 60 comas ou encore les 300 savarts précédemment définis.

5- Les sons complexes

● Hauteur des sons complexes

Ils sont généralement classés sur une échelle comprise entre les sons graves et les sons aigus.

S'ils sont périodiques, cet attribut perceptif, de hauteur correspond souvent à la fréquence fondamentale.

La hauteur d'un son complexe est perçue même si la fréquence fondamentale est absente du signal émis. C'est le phénomène dit du fondamental absent. La théorie des résidus éclaire ce phénomène. Très complexe, elle ne sera pas développée.

Les musiciens partagent le spectre en deux zones distinctes, la zone des sons graves et celle des sons aigus. Leur fréquence de recouvrement se trouve située à 632Hz. C'est une loi empirique, la loi des 400 000 , toujours vérifiée, qui permet de l'affirmer. Vous la trouverez en annexe.

● Sonie des sons complexes

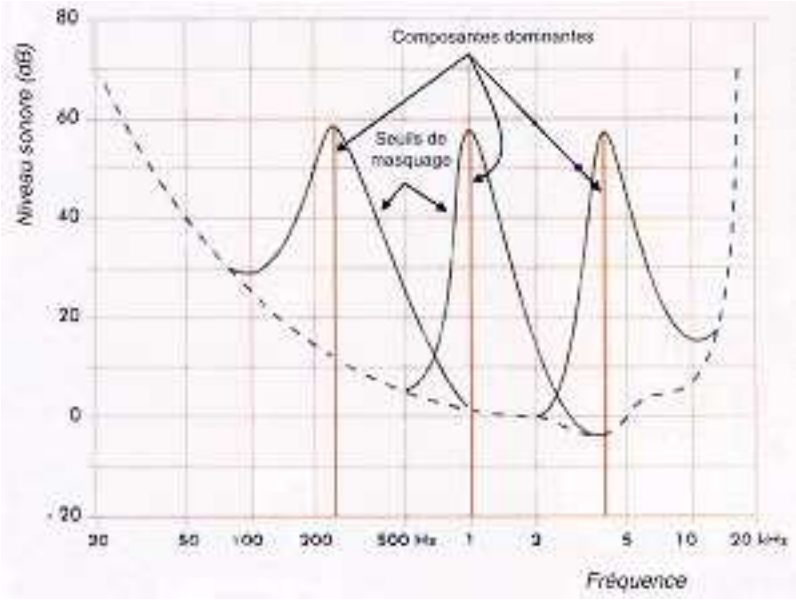
Elle n'est pas réellement formulée. Elle nécessite la connaissance de la largeur de bande du son émis,

son analyse spectrale et la quantification des effets de masque.

- **Effet de masque**

C'est le phénomène traduisant la disparition des sons faibles (sons masqués) en présence de sons forts (sons masquant).

- **Masquage d'un son pur par un autre son pur**



La courbe d'audition est déformée en présence d'un son masquant. Il y a déplacement du seuil d'audition provoqué par le son le plus fort. L'effet dépend de l'écart de fréquences et de niveaux entre les deux sons.

L'étendue en fréquence des effets de masque prouve qu'un son pur excite le système auditif sur une bande de fréquence, la bande critique, bien plus large que son spectre physique.

Si le masque est constitué par un son pur de fréquence fixe F_M.

On constate que le masquage:

- n'a pas lieu lorsque le son masquant à le même niveau que celui que l'on tente de masquer.
- est d'autant plus marqué que le niveau du son masquant est important. Empiriquement on considère qu'un son est totalement masquant si son niveau excède de 20 dB celui du son masqué.
- est maximum aux fréquences ou le masquant F_M est proche du masqué f_m.

S'il est simultané un masquage provoque un effet de précédence, encore appelé « effet de Hass » ou tout simplement « effet Hass ».

Il exprime la difficulté d'adaptation de l'oreille pour passer d'un niveau d'écoute à un autre.

La montée du niveau sonore nécessite à l'oreille un temps d'adaptation de 2ms. Ce temps est appelé temps de masquage antérieur.

De la même manière à la fin du masquage simultané, la chute de l'amplitude n'est pas immédiatement perçue. Un temps de masquage postérieur de 15ms est nécessaire à l'oreille avant que notre perception soit en parfaite concordance avec le message sonore.

Dans un codage audio (MP3 par exemple) les zones de masquage sont supprimées parce que non perçues.

6- Adaptation et fatigue auditive

L'écoute prolongée d'une stimulation donne lieu à deux types de réaction du système auditif : L'adaptation et la fatigue.

- **L'adaptation**, permet l'écoute prolongée d'un son de niveau stable.

Elle ne se produit que pour les sons dont le niveau est inférieur à 20 dB.

En revanche, un son continu de niveau plus élevé voit sa sonie diminuer progressivement en présence d'un autre son présenté de façon intermittente

- **La fatigue** auditive se traduit par une élévation du seuil d'audition et une diminution de la sonie. Elle est consécutive à l'exposition de l'oreille à un son de plus de 70 dB.

Le temps de récupération des pleines facultés auditives, peut atteindre 20 jours.

Une stimulation plus intense ou trop prolongée, peut provoquer un déficit auditif permanent. La surdité peut être partielle ou transitoire. L'une des modifications importantes observées est le recrutement de la sonie. Ce dernier correspond à une croissance de la sonie anormalement rapide.

7 - Le timbre

Nous sommes capables de distinguer une note jouée au piano ou au violon.
L'attribut perceptif qui nous permet de distinguer des sons de même hauteur et même sonie est le timbre.
Pour les sons stationnaires, le timbre dépend de la distribution de l'énergie en fonction de la fréquence.
Les sons complexes possédant des harmoniques graves intenses sonneront mous, alors que des sons dont les harmoniques sont aigues sonnent pointus et pénétrants.
Pour les sons évolutifs, la structure temporelle et les caractéristiques transitoires d'attaque se conjuguent aux paramètres des sons stationnaires.

8- Localisation et perception d'un objet sonore

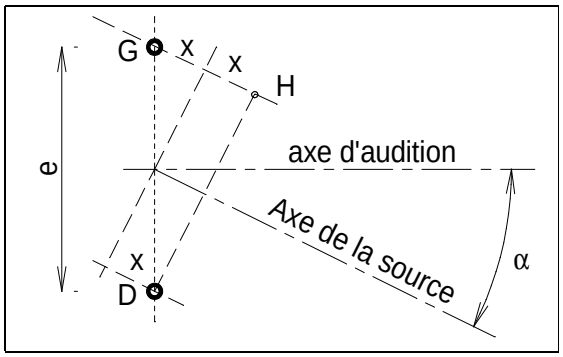
Le système auditif est capable de classer et hiérarchiser, les stimuli acoustiques en regroupant les composantes provenant de chaque source.

♦ **L' effet Cocktail** est la faculté de détecter un signal au milieu d'un bruit.

Le traitement binaural joue ici un grand rôle, en utilisant les différences entre les informations fournies par les deux oreilles, différence de hauteur, de sonie, de forme, décalage temporel. Il nous aide à améliorer le rapport signal/bruit, à supprimer les échos dans les pièces réverbérantes et à localiser les sons dans l'espace.

♦ **Orientation auditive**

Notre capacité de localisation est bonne dans le plan horizontal, et plus réduite dans le plan vertical.
L'attention intervient dans l'efficacité de cette perception.
Elle perd de sa précision lors de l'évaluation d'un éloignement.
Elle dépend de 2 facteurs : la différence de phase et la différence d'intensité.



Soumises à une onde sonore plane, dont l'axe est décalé d'un angle α vis à vis de l' axe d'audition, les oreilles, droite (D) et gauche (G) ne perçoivent pas le son simultanément.
Il parvient à l'oreille droite, avant d'arriver à l'oreille gauche.
e est la distance qui sépare nos deux oreilles (~17,5cm)
La source est située à une distance **r>>e** de l'auditeur.
Dans ces conditions la distance $x = e/2 . \sin(\alpha)$.

Le signal perçu par l'oreille droite est distant de la source de r-x,
alors que le signal perçu par l'oreille gauche est distant de la source de : r + x
De ces faits, La différence de parcours du son est de 2.x.
Si la pression du signal pur émis par la source à pour expression $P=P_0 e^{j\omega t}$
c étant la célérité du son dans le milieu.

La pression perçue par l'oreille droite est: $P_D=(P_0/(r-x)) e^{j\omega(t-(r-x/c))} = (P_0/(r-x)) e^{j\omega t}.e^{-j\omega r/c}.e^{j\omega x/c}$

Celle qui est perçue par l'oreille gauche est: $P_G=(P_0/(r+x)) e^{j\omega(t-(r+x/c)).} = (P_0/(r+x)) e^{j\omega t}.e^{-j\omega r/c}.e^{-j\omega x/c}$

Le rapport entre les deux pressions perçues $P_D/P_G = [(r+x)/(r-x)]. e^{j\omega 2x/c}$

permet d'écrire $P_G = P_D . [(r+x)/(r-x)]. e^{-j\omega 2x/c}$

Dans laquelle apparaît 2.x , la distance entre le point H et G correspondant au décalage entre l'oreille gauche et l'oreille droite. Appelons **X** cette distance.

✓ **la différence de phase**

Elle apparaît dans le second membre de l'équation si dessus à condition d'écrire $e^{-j\omega 2x/c} = e^{-j\phi}$

qui montre le retard de phase $-\phi = -\omega.2.x/c = -\omega.X/c$,

existant entre le signal perçu par l'oreille gauche par rapport à l'oreille droite.

La pulsation ou fréquence angulaire $\omega = 2.\pi.f = 2.\pi/T$

ou, f et T , sont respectivement la fréquence et la période du son émis.

Le module de la phase $\phi = 2.\pi.X/c.T$

montre l'influence de la distance **X** vis à vis de la longueur d'onde $\lambda = \mathbf{c}.T$, sur l'écart de phase ϕ perçu

$$\phi = 2.\pi.X/\lambda$$

La détection de phase est effective pour des fréquences inférieures à 1,5kHz, autrement dit pour des sons dont la longueur d'onde est supérieure à la distance **e.** Au delà elle devient ambiguë pour totalement disparaître vers 3kHz.

Indépendante de la distance, aux fréquences inférieure à 1500Hz, elle permet de déterminer assurément la direction de la source.

- **<u>la différence d'intensité</u>**

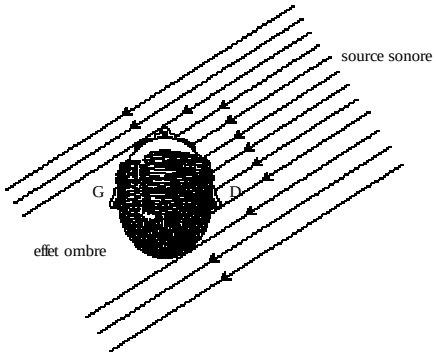
Dans l'équation $P_G = P_D.\ (r-x/r+x).\ e^{-j\omega 2x/c}$,

$$k=(r-x)/(r+x)$$

est un facteur d'affaiblissement de la pression perçue par l'oreille gauche par rapport à l'oreille droite.

si $r >> \mathbf{e} \Leftrightarrow r >> x \Rightarrow k$ est voisin de 1.

Il ne tient, toutefois pas compte du profil de la tête provoquant un effet d'ombre.



Dans cette figure, l'intensité sonore perçue par l'oreille gauche est affaiblie par l'effet d'ombre de la tête.

La différence d'intensité acoustique intervient, dans la localisation, pour les sons dont la fréquence est supérieure à 1,5 kHz et, est le seul mode d'orientation pour les sons proches de fréquence supérieure à 3kHz.

C'est l'effet d'ombre qui aide dans la localisation d'une source lointaine,(k est peu différent de 1), surtout aux fréquences qui interdisent la détection de phase. Dans de telles circonstances, il est fréquent qu'instinctivement nous orientions la tête afin de bénéficier de cet effet naturel.

Il est clair que différences de phase et d'intensité acoustiques sont complémentaires.