



Science et Musique

Enseignement de culture générale
(HLSEG304)

Bernard Hehlen

4^{ème} partie

- IV -

La perception du son

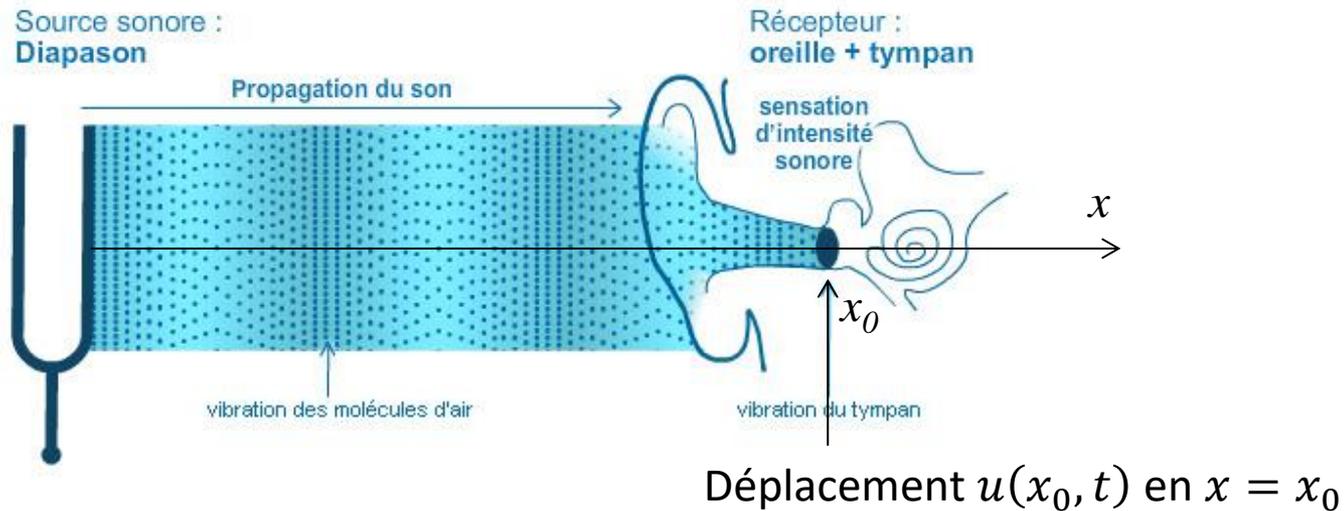
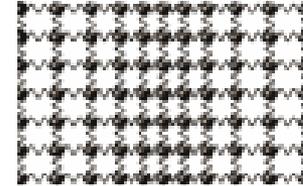
Propagation du son dans l'air:

✓ Vitesse des ondes sonores :

$$V_{\phi} = \sqrt{\frac{1}{\rho\chi}}$$

ρ : densité
 χ : compressibilité

Onde longitudinale



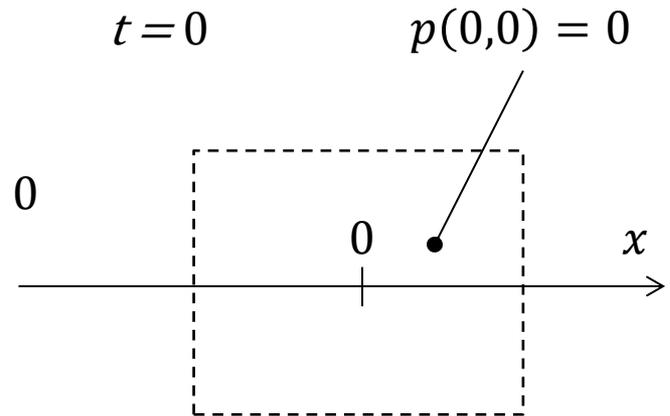
✓ Déplacement $u(x, t) = u_0 \cos(kx - \omega t)$

✓ Vitesse particulaire $V_{part.} = \frac{\partial u(x, t)}{\partial t}$

Surpression et intensité acoustique

✓ Surpression : $p(x, t) = P(x, t) - P_{atm.}$

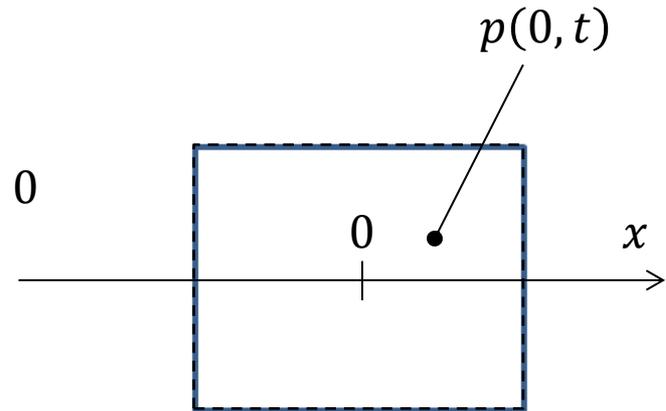
→ Variation d'un volume d'air dV autour de $x = 0$



Surpression et intensité acoustique

✓ Surpression : $p(x, t) = P(x, t) - P_{atm.}$

→ Variation d'un volume d'air d V autour de $x = 0$



→ Relation avec le déplacement :

$$p(x, t) = -\frac{1}{\chi} \frac{\partial u(x, t)}{\partial x}$$

$$p(x, t) = p_0 \sin(kx - \omega t)$$

✓ Intensité acoustique

$$I = \langle \phi \rangle = \langle p \cdot V_{part.} \rangle$$

↙ flux

$$I = \frac{1}{2} \rho \omega^2 V_{\phi} u_0^2 \quad (W/m^2)$$

→ En décibels

$$I_{dB} = 10 \text{ Log}_{10} \frac{I}{I_0}$$

Seuil minimal d'audition

$$I_0 \cong 10^{-12} W/m^2$$

Niveaux acoustiques

Avion au décollage	140 dB
Discothèque	110 dB
Resto U	90 dB
Salle de cours	70 dB
Chuchotement doux à 1m	10-15 dB

La dynamique de l'oreille est très grande :

de 10^{-12} W/m² (seuil d'audition à 1kHz) à 1 W/m² (seuil de lésion)

1. Calculer l'amplitude de déplacement du tympan au minimum d'intensité audible I_0 à 100Hz et 1000 Hz)

2. Un étudiant chuchote dans un amphi (niveau à 20 dB). Quel sera le niveau si 10 étudiants chuchotent avec le même niveau? 100 étudiants?

1. Calculer l'amplitude de déplacement du tympan au minimum d'intensité audible I_0 à 100Hz et 1000 Hz)

Masse volumique de l'air : $\rho_{air} = 1.2 \text{ Kg/m}^3$

Vitesse de propagation du son : $V_\varphi = 343 \text{ m/s}$

$$f=100 \text{ Hz} \quad \longrightarrow \quad u_0 = 1.11 \cdot 10^{-10} \text{ m} = 1.11 \text{ \AA}$$

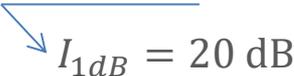
(avec $I=10^{-9}$ ($=I_{\min}$ audible, cf. courbe page suivante) $u_0 = 3.33 \cdot 10^{-9} \text{ m}$)

$$f=1000 \text{ Hz} \quad \longrightarrow \quad u_0 = 1.11 \cdot 10^{-11} \text{ m} = 0.11 \text{ \AA} !!!$$

2. Un étudiant chuchote dans un amphi (niveau à 20 dB). Quel sera le niveau si 10 étudiants chuchotent avec le même niveau? 100 étudiants?

Pour n étudiants : $I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n = nI_1$

$$I_{ndb} = 10 \text{Log} \left(\frac{nI_1}{I_0} \right) = 10 \text{Log} \left(\frac{I_1}{I_0} \right) + 10 \text{Log}(n) = 20 + 10 \text{Log}(n)$$


 $I_{1dB} = 20 \text{ dB}$

$$n = 10 \quad \rightarrow \quad I_{10dB} = 20 + 10 = 30 \text{ dB}$$

$$n = 100 \quad \rightarrow \quad I_{10dB} = 20 + 20 = 40 \text{ dB}$$

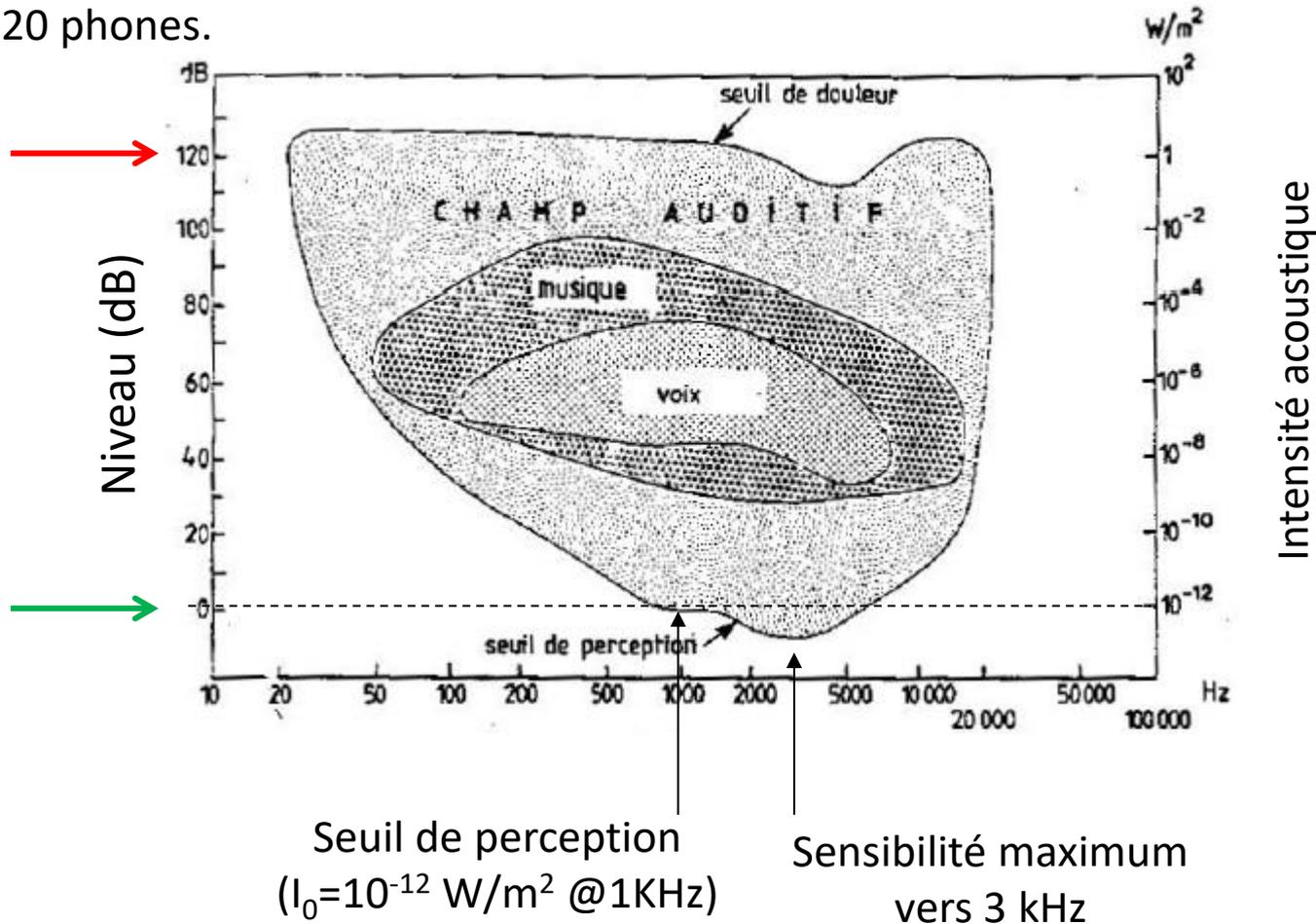


10dB par facteur
x10 d'intensité

Le champ auditif

Phone : Unité de mesure du niveau de sonie. Il correspond exactement au dB pour une fréquence de 1000 Hz ($P=I_L(1000\text{Hz})$).

→ La courbe de **seuil absolu** correspond donc à 0 Phones, et le **seuil de douleur** se situe vers 120 phones.



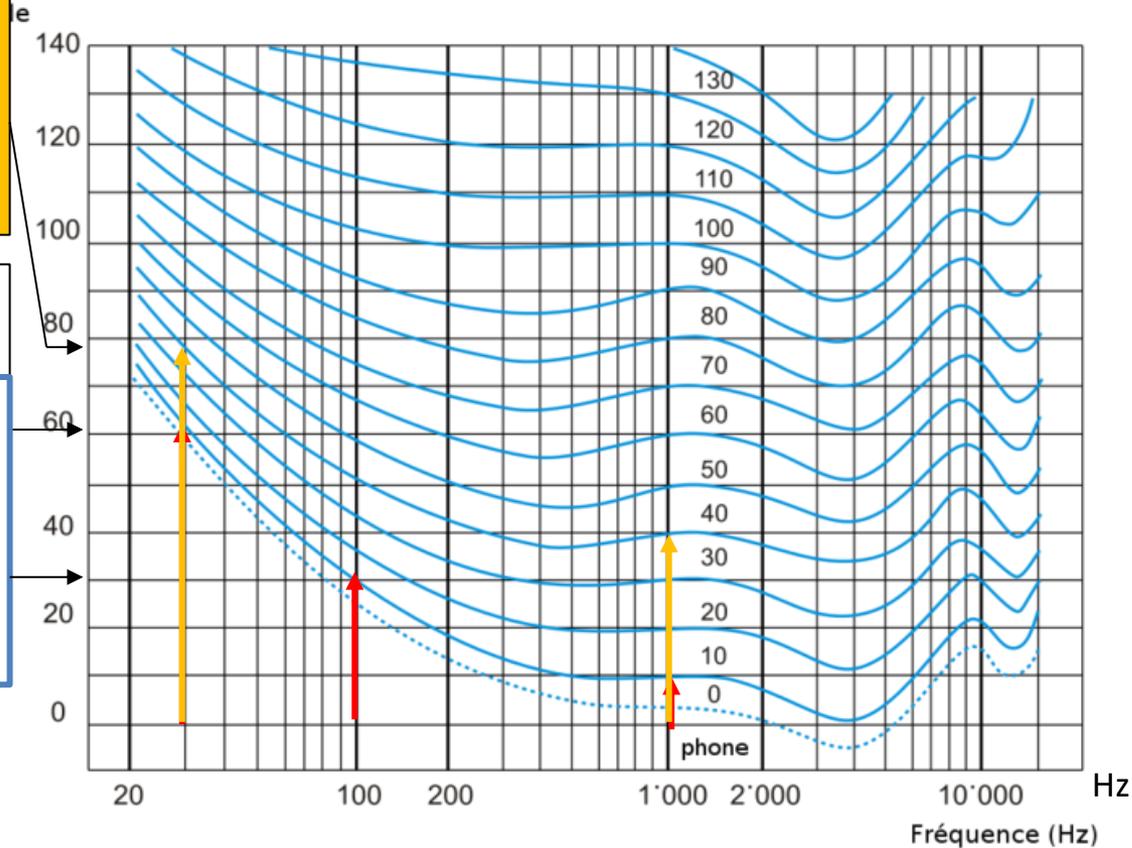
Courbes d'isophonies

(Courbes de Fletcher et Munson)

Niveau du son @30 Hz pour avoir la même perception sonore d'un son de 40db à @1 kHz

Niveau du son @30 Hz pour avoir la même

Niveau du son @100 Hz pour avoir la même perception sonore d'un son de 10db à @1 kHz



On définit les **courbes d'isophonie**, c'est-à-dire le lieu des points de même sonie, c'est-à-dire provoquant la même sensation d'intensité sonore pour l'oreille humaine.

Sonie et Phones

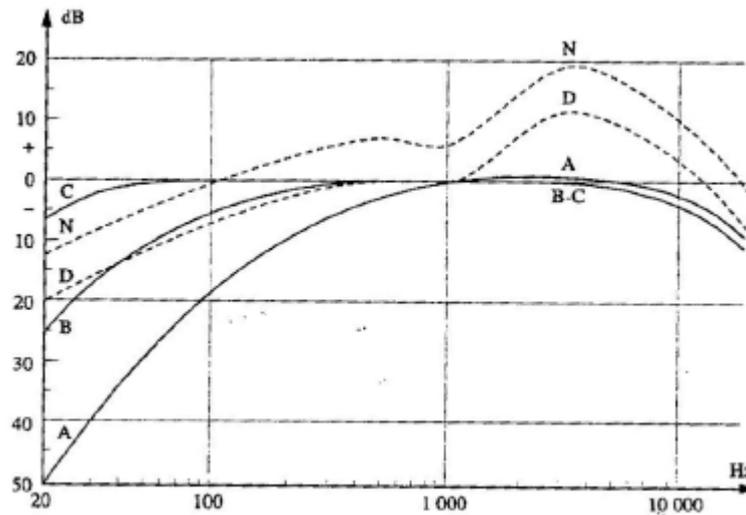
- Les courbes isosoniques rendent compte de la sensibilité du système auditif humain pour des fréquences entre 20 et 20 KHz.
- Le principe de la mesure consiste à faire entendre aux sujets des sons purs (sinusoïdaux) à différentes fréquences et par incréments de 10 dB. On fait également entendre aux sujets un son pur de référence à 1 000 Hz. On ajuste l'intensité de ce dernier jusqu'à ce qu'il soit perçu au même niveau sonore que celui en test. Une moyenne des mesures sur les différents sujets est effectuée.

Sensibilité de l'oreille :

- Perception maximum à 3 kHz en raison des différents filtres de l'oreille externe et moyenne.
- Mauvaise perception des basses à faible niveau.
- La dynamique auditive s'aplatie pour les sons forts
- Conséquence : Pour les musiques amplifiées et fortes, comme par exemple lors de concerts, la perception est très différente de celle que l'on a chez soi où en studio.
 - Le **Loudness** (des chaînes hifi à papa!) est une légère égalisation aux extrémités du spectre pour remettre "à plat" le rendu d'écoute à faibles niveaux.

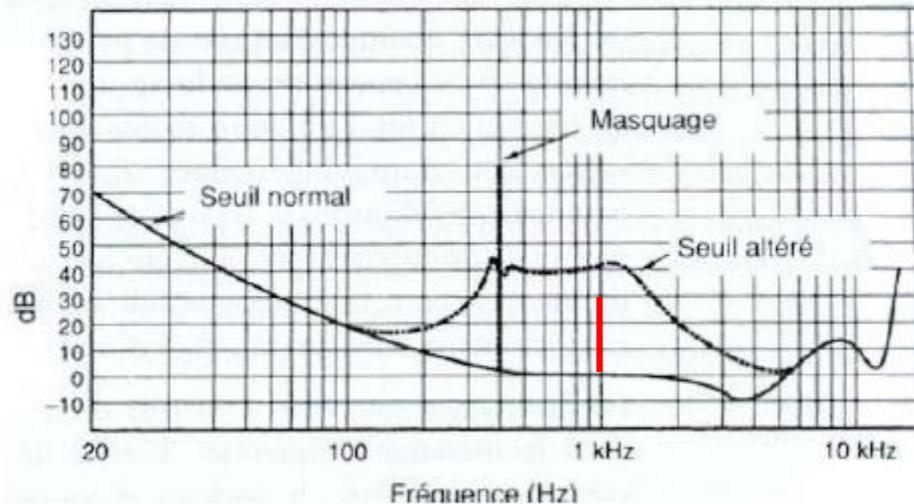
Les dB pondérés

- Les courbes de pondérations dB(A), dB(B), dB(C), sont des courbes isotoniques renversées.
- Les industriels utilisent souvent les dB(A) alors qu'ils devraient être utilisés qu'à faible niveaux (vers 40 dB). Avantageux pour diminuer le bruit réel, dans les basses en particulier!



Effet de masquage

Un son pur de niveau et de fréquence fixés modifie le niveau seuil d'écoute.

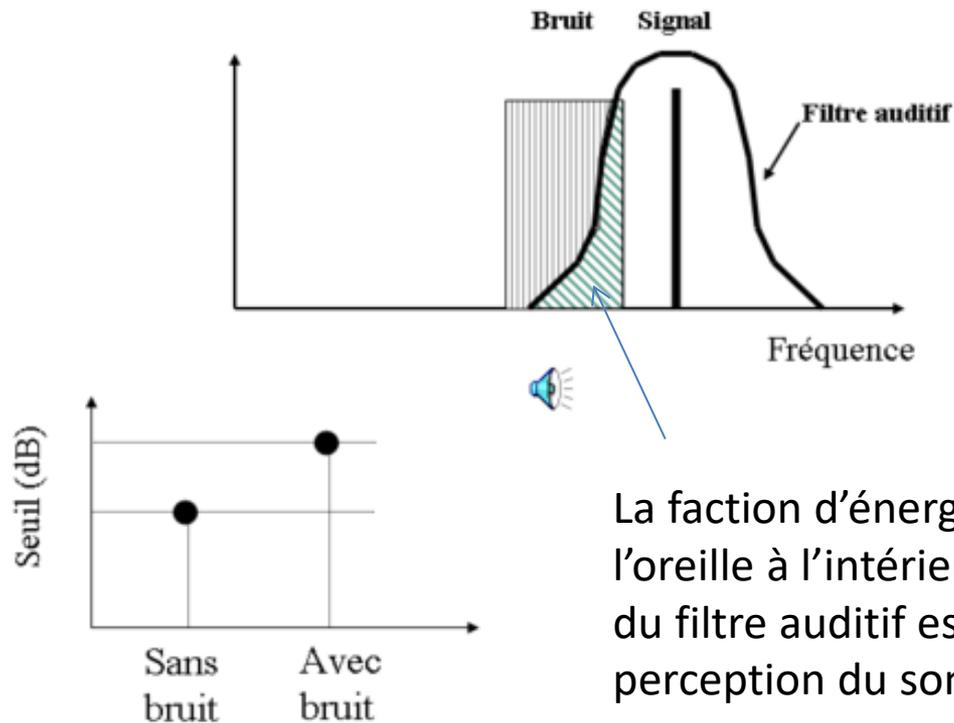


- L'effet s'étend plus vers les hautes fréquences
- Plus le masquant est fort, plus l'effet s'étend
- Dans l'exemple ci-dessus, **un son à 1KHz avec un niveau de 30 db** ne sera plus entendu s'il est additionne **au masquant à 400 Hz de niveau 80 dB**

Cours en ligne psycho-acoustique- masquage :

<http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/video-html5/pp2009/grimault/de-lacoustique-a-la-perception-la-psychoacoustique#diapo09>

Si un bruit est spectralement proche d'un signal, il va gêner sa perception.



La fraction d'énergie du bruit perçu par l'oreille à l'intérieur de la bande spectrale du filtre auditif est perdue pour la perception du son pur.



Formule SIMPLE donnant une estimation de la largeur d'un filtre auditif en fonction de la fréquence en Hz:

$$\text{ERB}(f) = 24.7 * (4.37 * f / 1000 + 1)$$

Exemples pour un normo-entendant:

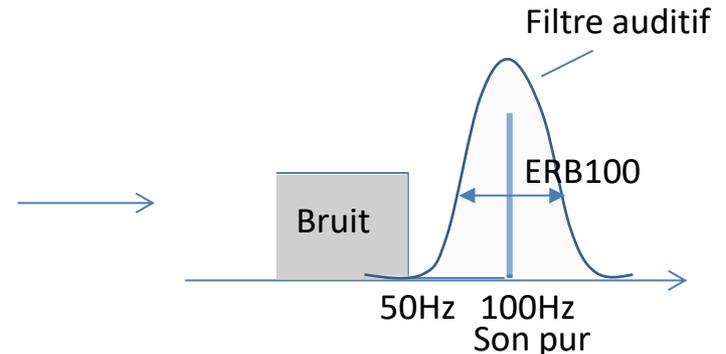
$$\text{ERB}(100) = 35.5 \text{ Hz}$$

$$\text{ERB}(1000) = 132.6 \text{ Hz}$$

$$\text{ERB}(10000) = 1104.1 \text{ Hz}$$

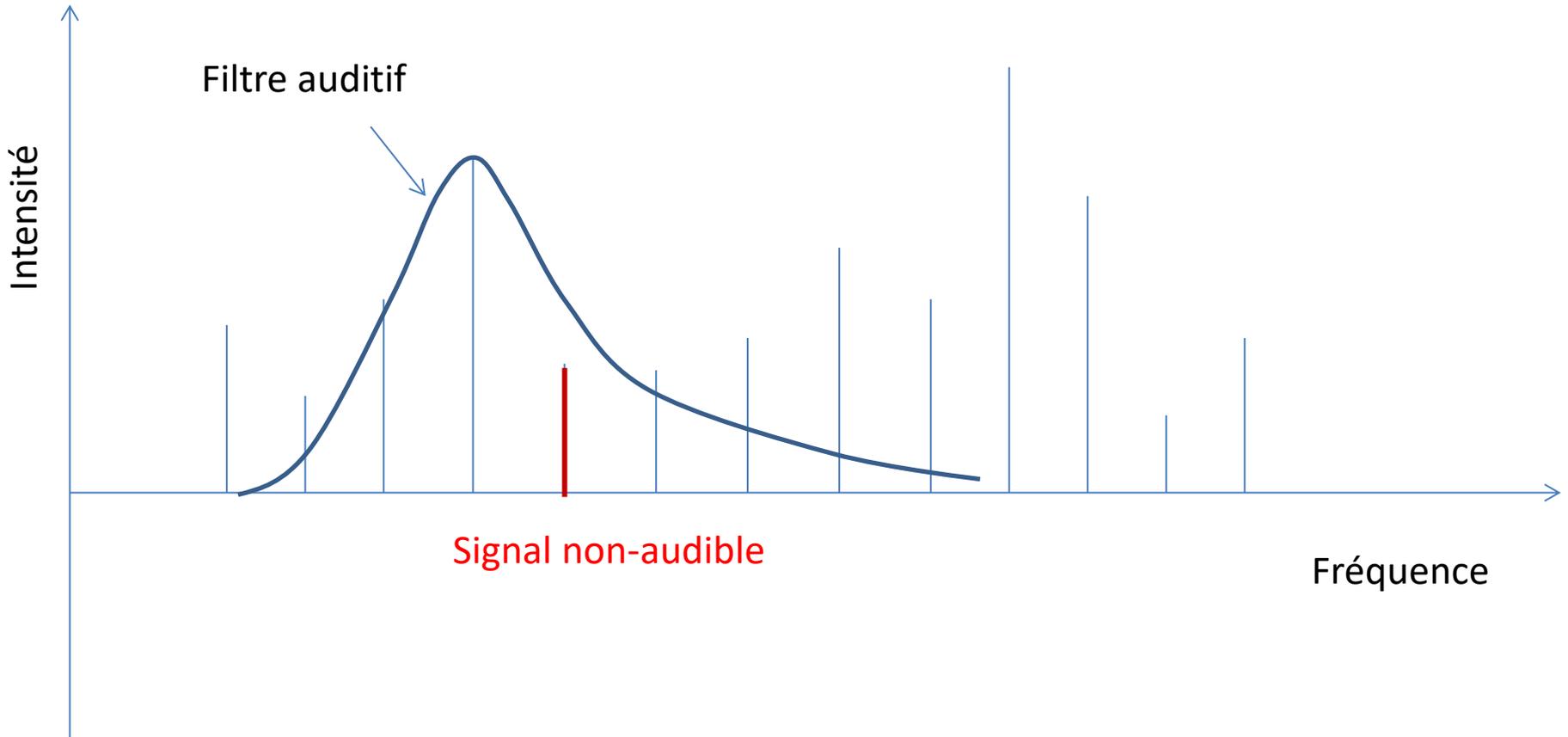
Ex. : Un son pur à 100 Hz ne sera pas masqué par un [bruit + passe-bas 50Hz] car $100 - \text{ERB}(100)/2 > 50 \text{ Hz}$

La largeur de ces filtres auditifs conditionne l'acuité fréquentielle de système auditif

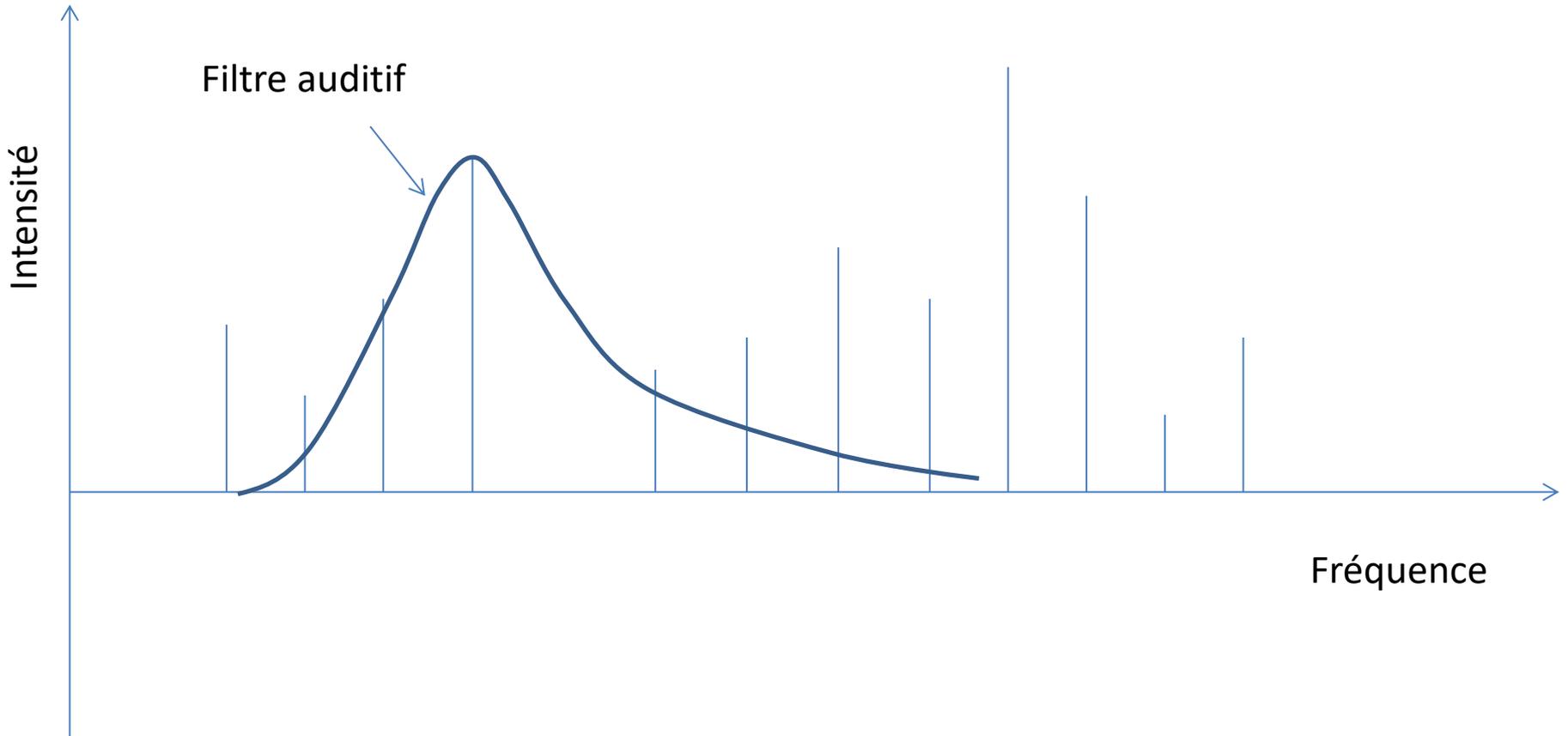


Un exemple: le codage mp3

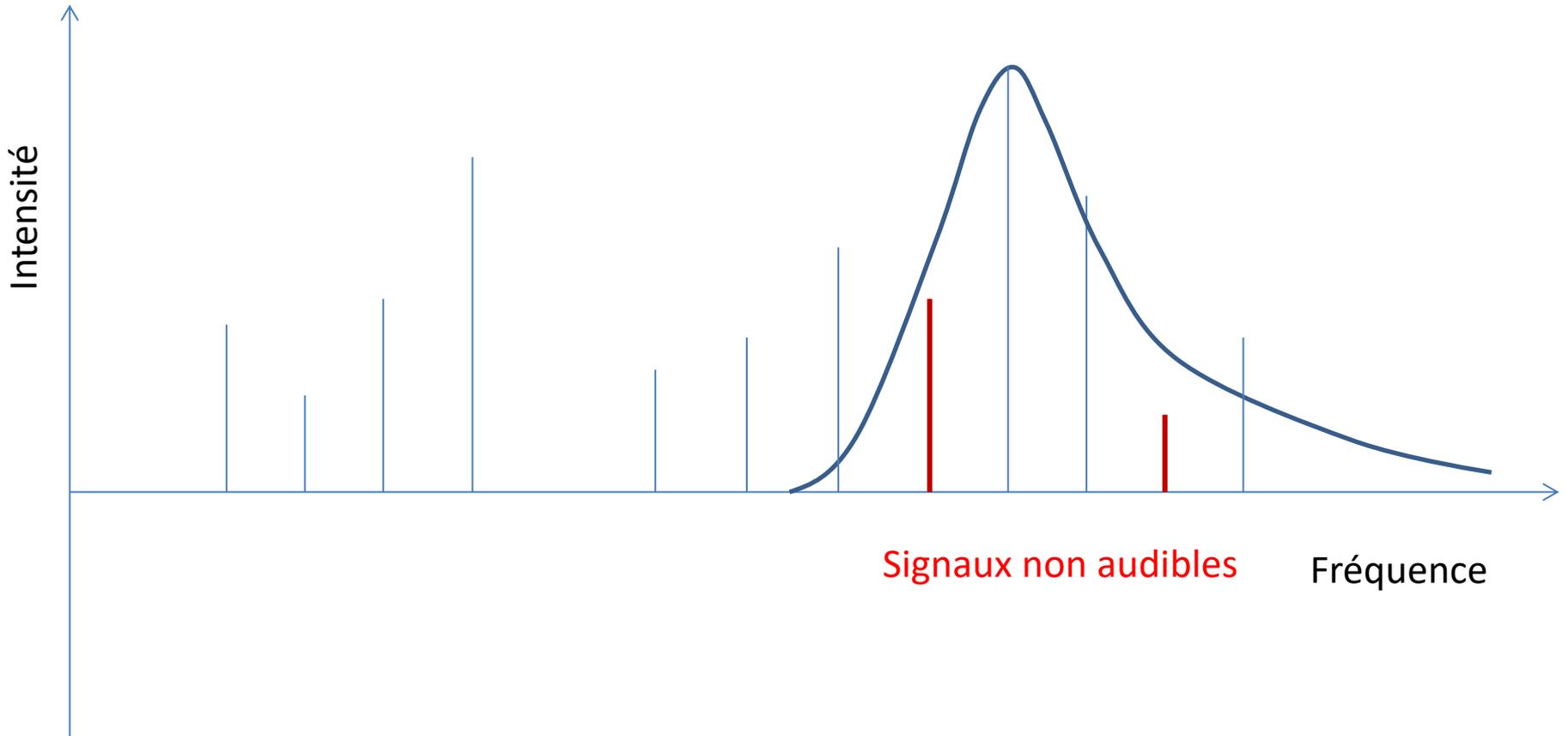
A.G. Bell (début XX^{ème} siècle): bande passante étroite des premières communications téléphoniques. Que laisse t-on passer comme signal pour que cela reste audible!....



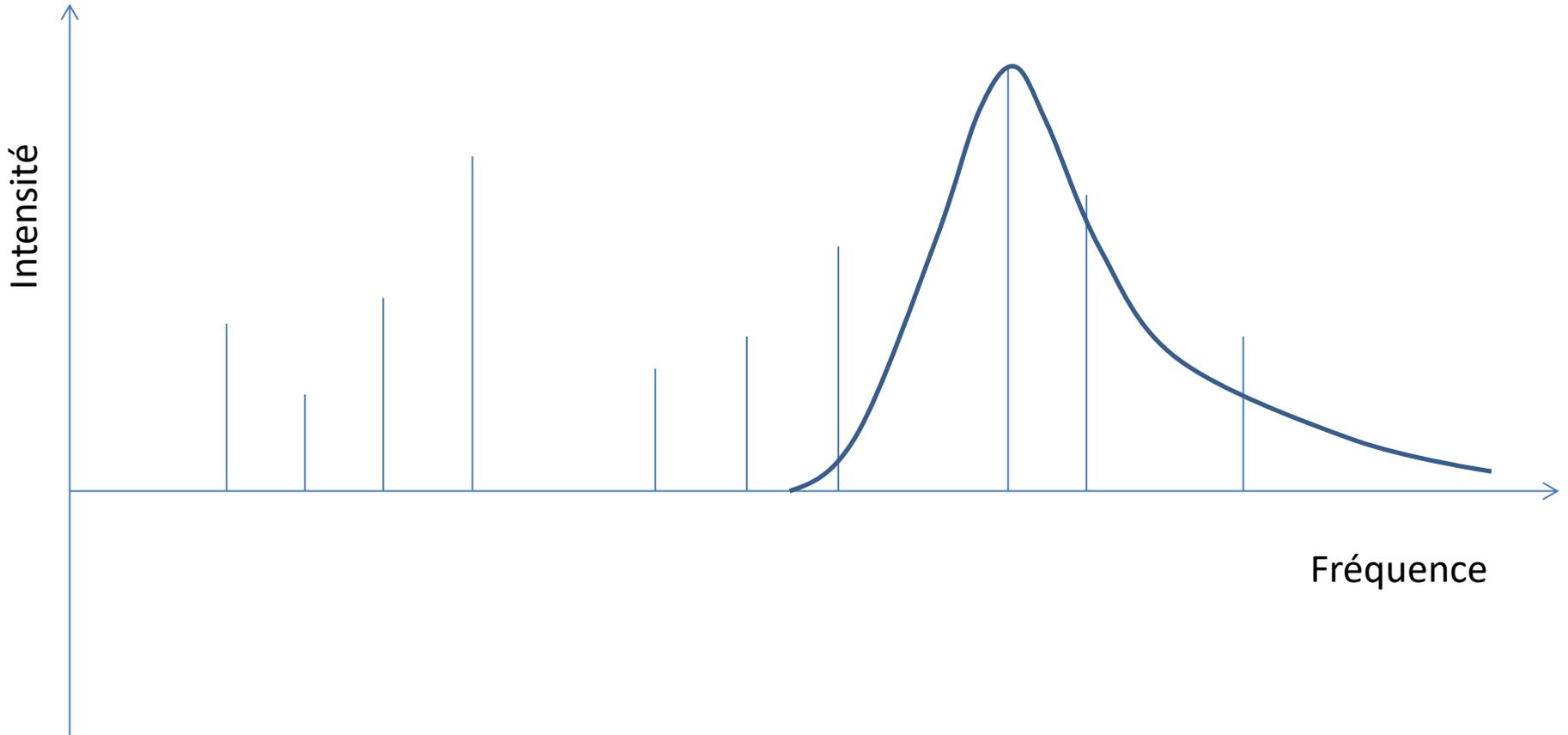
Un exemple: le codage mp3



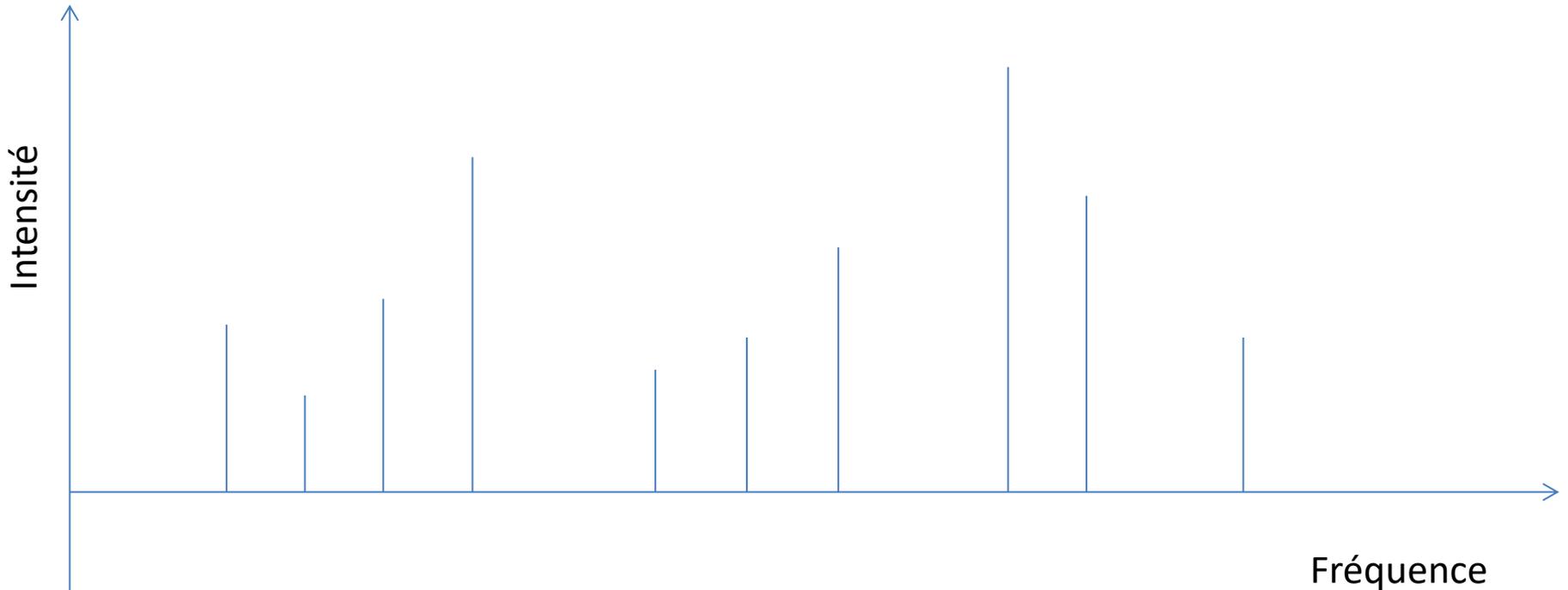
Un exemple: le codage mp3



Un exemple: le codage mp3



Un exemple: le codage mp3



Plus on applique cette méthode sur un nb important de maxima d'intensité et plus on compresse, mais attention la qualité sonore s'en ressent !!

Importance dans le mixage et le mastering audio:

→ Pour limiter les effets de masquage il faut filtrer les instruments dans leur gamme audio principale

Voici un petit tableau référentiel, qui renseigne sur les fréquences importantes des différents instruments!				
INSTRUMENT	COUPE-BAS	FONDAMENTALE	FREQ SENSIBLE	HARMONIQUES
ces fréquences sont bien entendu données à titre indicatif, à affiner selon les cas...				
Voix Homme	100 Hz	200 Hz	2 kHz (+)	4 à 5 kHz
Voix Femme	120 Hz	300 à 400 Hz	2,5 kHz	5 à 6 kHz
Voix parlée	120 Hz	200 Hz	2 à 3 kHz	4 kHz
Guitare el	80 Hz	200 à 300 Hz	2,5 kHz	> 4 kHz
Guitare acc	100 Hz	150 à 250 Hz	2 à 3,5 kHz	6 kHz
Piano	-	80 à 150 Hz	2 à 3 kHz	> 4 kHz
Harmonica	100 Hz	250 Hz	1,5 à 2,5 kHz	4 kHz
Sax	80 Hz	150 à 250 Hz	2 kHz (-)	3 à 4 kHz
Trombonne	80 Hz	150 Hz	1,5 kHz	3 kHz
Trompette	120 Hz	300 Hz	1,5 kHz (-)	> 4 kHz
Flute	200 Hz	300 Hz	1,5 à 2 kHz	4 kHz
Basse	-	80 Hz	250 à 500 Hz	2 à 3 kHz
Grosse Caisse	-	60 à 80 Hz	350 à 600 Hz (-)	2 à 3 kHz
Caisse Claire	80 Hz	150 à 250 Hz	600 à 1,5 kHz	3 à 5 kHz
Tom	100 Hz	150 à 200	600 (-)	2 à 3,5 kHz
Tom-Floor	-	120	300 à 500 (-)	2 à 3,5 kHz
Charley/Cymbale	200 Hz	400 à 600 Hz	2 à 3 kHz (-)	8 kHz

La première colonne donne des fréquences d'un éventuel COUPE-BAS, c'est à dire les fréquences graves, relativement inutile pour le son de l'instrument. Les consoles pro sont munies d'un coupe-bas (- parfois réglable, parfois à fréquence fixe, par ex. 100Hz-), avec lequel on coupe toutes les fréquences grave inutiles. Ceci éclaircie considérablement l'ensemble du mix et enlève beaucoup de bruits parasites. La colonne FONDAMENTALE donne la fréquence sur laquelle le son de l'instrument est assis! En accentuant cette fréquence, on trouve toute suite chaleur et profondeur; en l'atténuant le son s'éclairci et devient fin. FREQUENCE SENSIBLE signifie la fréquence pivot de l'instrument. C'est la fréquence critique qui aura le plus d'influence sur le son. En l'accentuant, l'instrument semble toute de suite plus fort et se mettra tout naturellement devant le mix, mais ceci peut devenir vite agressif! En l'atténuant, l'instrument rentre dans le mix et le son s'adoucit! HARMONIQUES donne les fréquences qui sont responsables de la couleur du son de l'instrument! En l'accentuant on a l'impression de plus de présence et clarté; en l'atténuant le son devient mate!!

Spatialisation du son

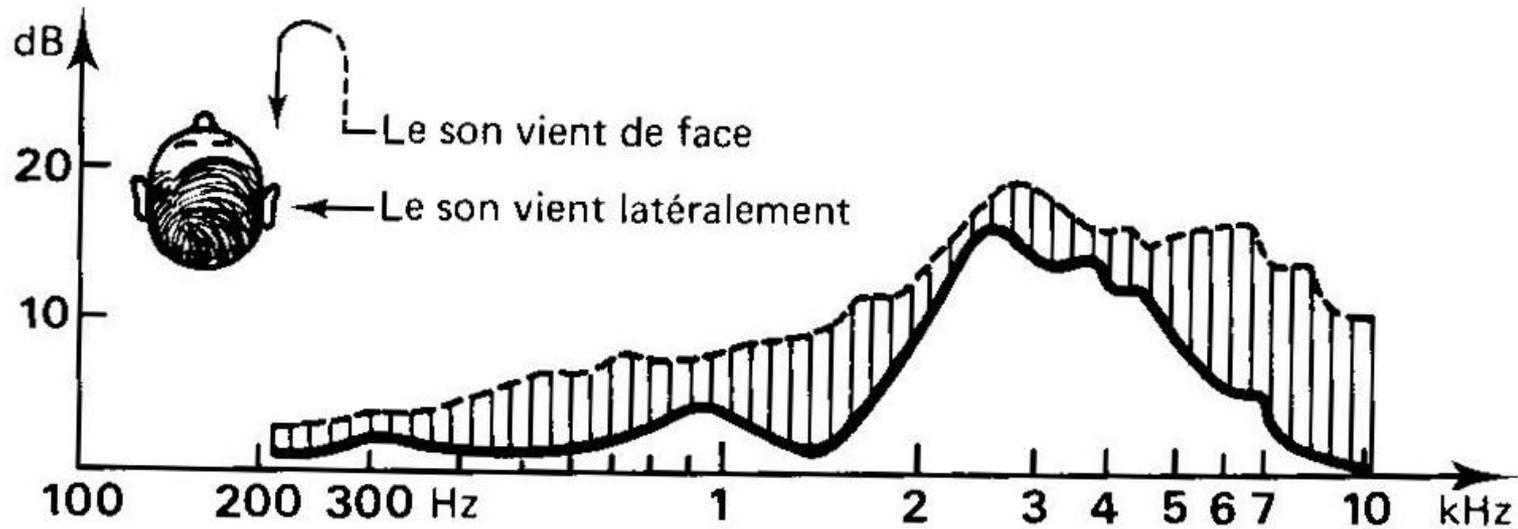


FIG. 19. — *Rôle du conduit auditif*. On entend beaucoup mieux les sons réels lorsque le conduit est dirigé vers la source sonore : c'est l'expérience courante. Les recherches de WIENER et ROSS ont montré ce que l'on gagne (en hachures). Le gain est surtout important dans l'aigu et le suraigu où les ondes acoustiques sont très directionnelles.

✓ **Localisation en azimut (plan horizontal) :**

- Précision d'environ 3°
- Différence de temps d'arrivée aux deux oreilles
- Différence de niveau sonore lié à l'obstacle que constitue la tête

→ A basse fréquence (grande longueurs d'onde), la tête n'est pas un obstacle majeur et la différence de niveau sera faible.

→ Les sons de haute fréquence seront bcp plus affectés par la traversée de la tête.

→ La sensibilité spectrale sera aussi un moyen de spatialiser le son

✓ **Localisation en élévation (plan vertical) :**

- Précision $\sim 10^\circ$ proche de l'horizontal, jusqu'à 30° proche de la verticale

✓ **Distance :**

- Réverbération
- Analyse du cerveau de l'atténuation du spectre sonore par l'air (plus important dans les aigus)