

Acoustique

Cours 2

D. Duhamel

Plan

1. Mesure et génération du son

1. Les microphones
2. Les haut-parleurs
3. Le sonomètre

2. Traitement des signaux

1. Domaine temporel
2. Domaine fréquentiel

3. Perception du son

1. Perception du son
2. Indicateurs et gêne
3. Dangers et réglementation

1. Mesure et génération du son

Les microphones et haut-parleurs : généralités

transducteur

énergie
reçue sous une forme

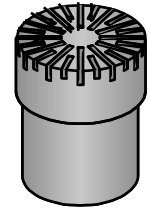
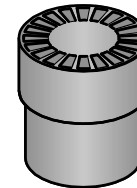
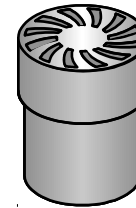
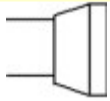


énergie utilisable
sous une forme différente.

mécanique, thermique, lumineuse

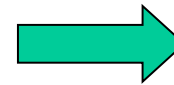
acoustique, électrique

les microphones



transducteur acousto-électrique d'entrée

énergie acoustique



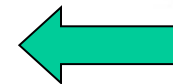
énergie électrique

les haut-parleurs

transducteur électro-acoustique de sortie



énergie acoustique



énergie électrique

transducteur acousto-électrique réversible

Les microphones - Classification

relative au principe de transduction

Effets piézo-électriques

Microphones piézoélectriques

à cristaux (quartz)
à céramiques (titanate de baryum, PZT, etc.)
à polymères

Effets magnétiques

Microphones électrodynamiques

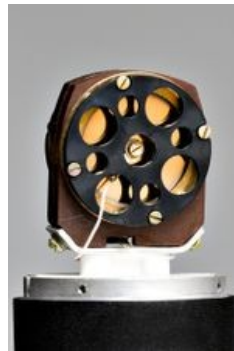
à bobine mobile
à ruban



Effets électrostatiques

Microphones électrostatiques

à membrane polarisée
à membrane pré-polarisée (électrets)



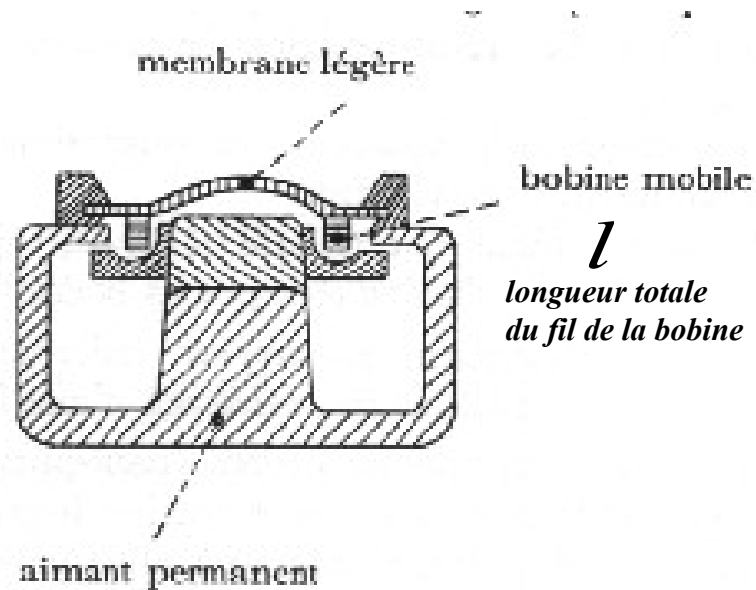
Le microphone électrodynamique à bobine mobile

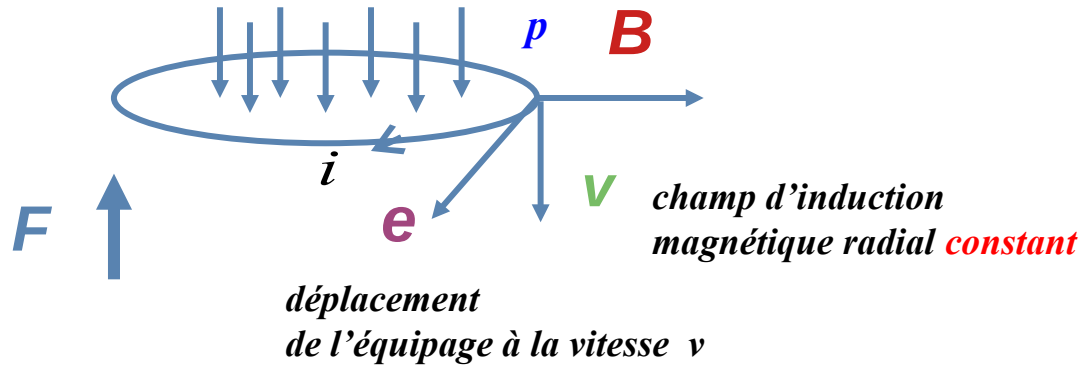
principe

Couplage électrodynamique

bobine solidaire de la membrane

bobine + membrane = équipement mobile





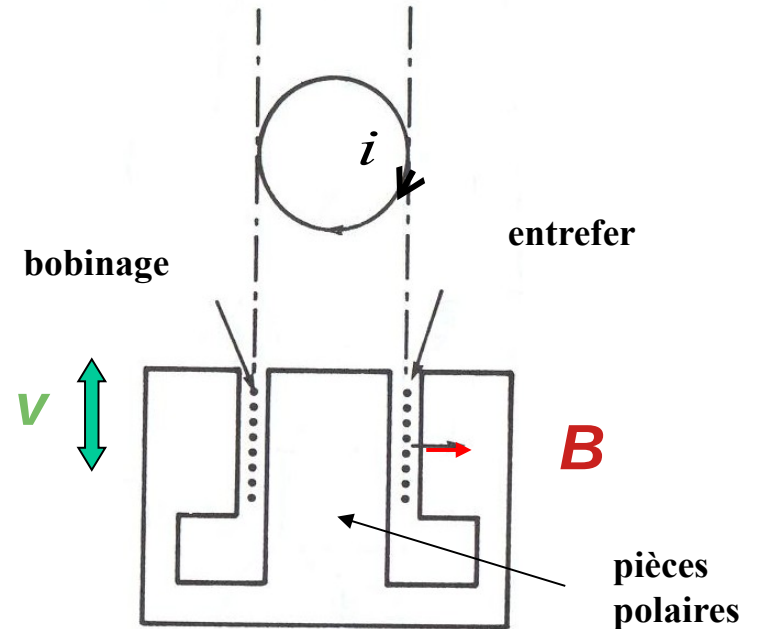
→ $e = l v \wedge B$

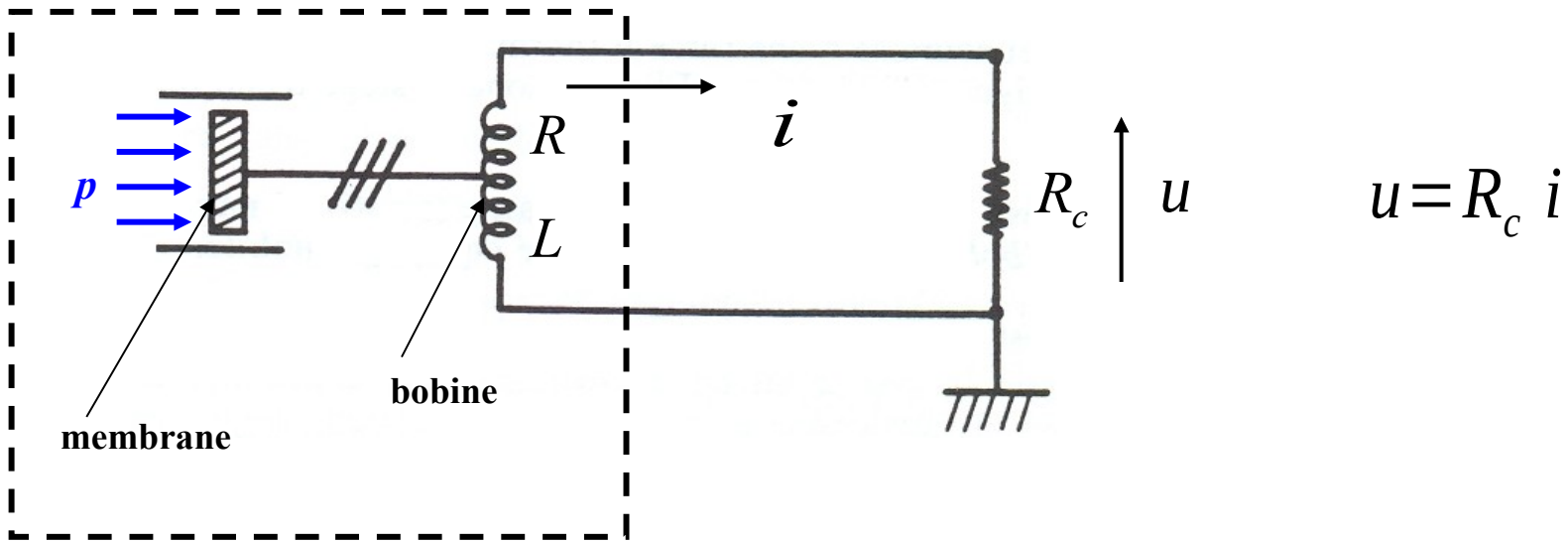
force électromotrice

→ i courant dans les spires

→ $F = l i \wedge B$

force de Laplace





équation électrique du transducteur $Blv = (R + R_c) i + L \frac{di}{dt}$

équation mécanique de la membrane

$$m \ddot{x}(t) + c \dot{x}(t) + k x(t) = F_1 + F_2 = -Bli + pS$$

Force de Laplace $\longrightarrow F_1 = -Bl i$

+
Force de pression acoustique

$\longrightarrow F_2 = pS$

$$\left\{ \begin{array}{l} Bl \dot{x} = (R + R_c) i + L \frac{di}{dt} \\ m \ddot{x}(t) + c \dot{x}(t) + k x(t) = p S - Bl i \end{array} \right. \begin{array}{l} \text{équation électrique du transducteur} \\ \text{équation mécanique de la membrane} \end{array}$$

Régime harmonique

$$\left\{ \begin{array}{l} Bl V = Z_e I \\ Z_m V + Bl I = P S \end{array} \right. \begin{array}{l} \text{avec } Z_e = [(R + R_c) + jL \omega] \\ \text{avec } Z_m = c + m j \omega - j \frac{k}{\omega} \end{array} \begin{array}{l} \text{impédance électrique} \\ \text{impédance mécanique} \end{array}$$

Fonction de transfert (sensibilité) $\frac{U}{P} = \frac{R_c I}{P} = \frac{R_c Bl S}{B^2 l^2 + Z_e Z_m}$

Le microphone électrostatique

plus sensible et précis que le microphone dynamique

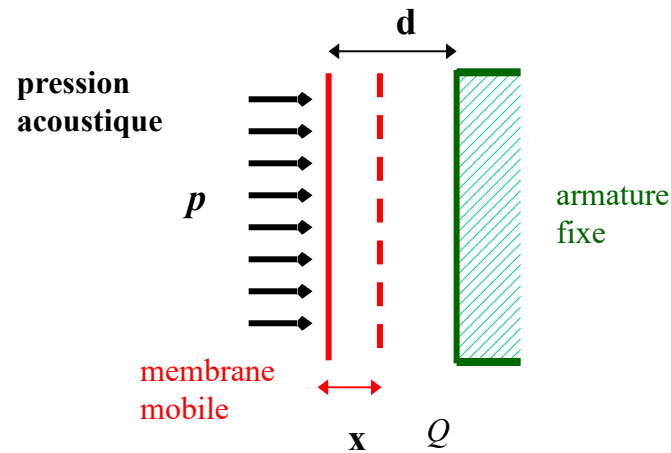
avantages : sensibilité, définition

inconvénients : fragilité, nécessité d'une alimentation externe, contraintes d'emploi, inapte à reprendre des pressions acoustiques trop élevées



Microphone électrostatique de studio

principe

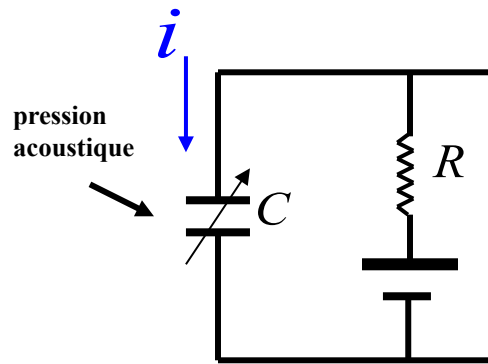
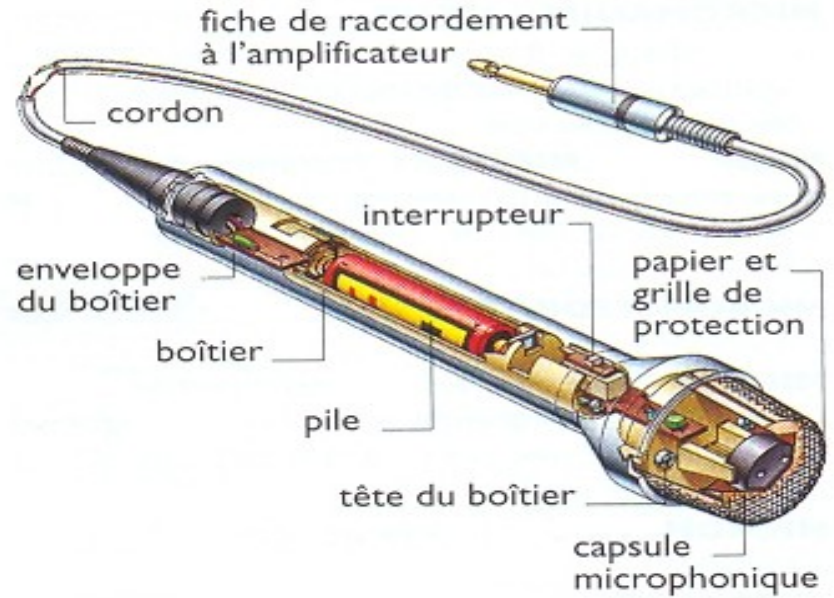
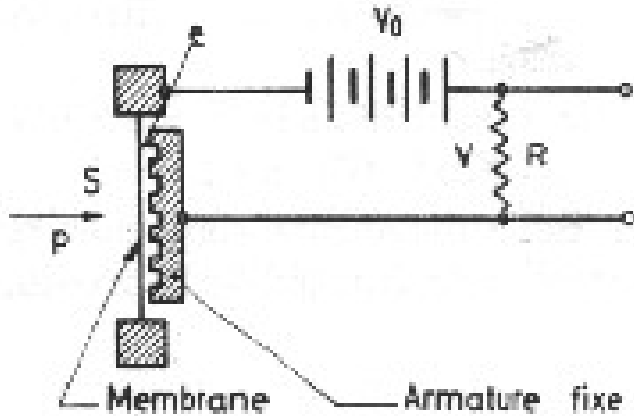


condensateur plan

Membrane située à d $C_0 = \epsilon_0 \frac{S}{d}$ $\epsilon_0 = \frac{1}{36 \pi 10^9} = 8.85 \text{ pF/m}$

Membrane située à $d-x$ $C = \epsilon_0 \frac{S}{d-x} = \frac{C_0}{1 - \frac{x}{d}}$

Le microphone électrostatique



$$V_0 = \frac{Q_0}{C_0}$$

champ électrique $E_0 = \frac{V_0}{d}$

$$E = \frac{V_0}{d-x} \approx E_0 \left(1 + \frac{x}{d}\right)$$

charge totale des armatures $Q = Q_0 + q$

$$q = \int i dt$$

équation électrique du transducteur

$$E_0 x = Ri + \frac{1}{C_0} \int i dt$$

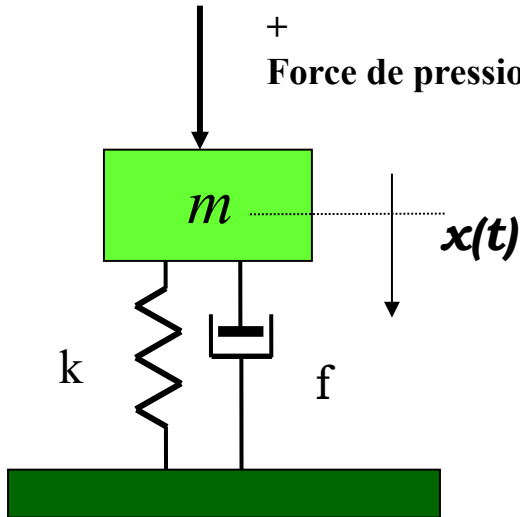
Equation mécanique de la membrane

comportement de la membrane modélisé
par un oscillateur linéaire visqueux

Force électrostatique d'attraction
+
Force de pression acoustique

$$F_1 = E_0 q$$

$$F_2 = pS$$

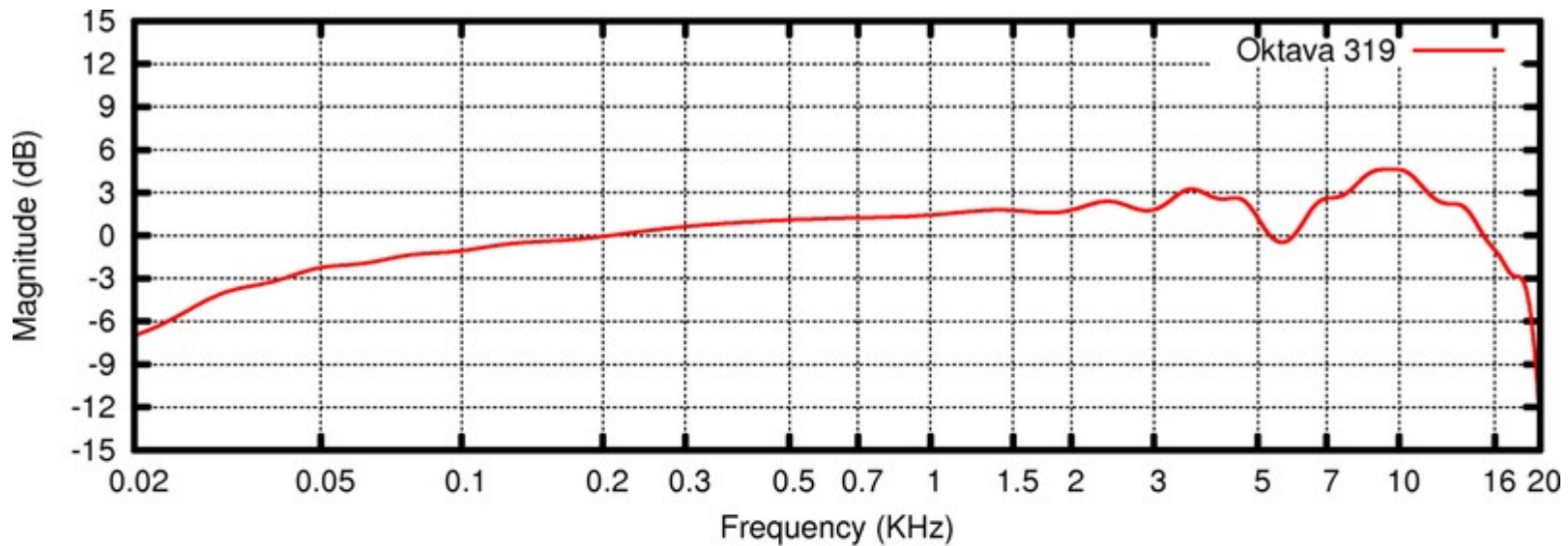


$x(t)$ défini par rapport à la position d'équilibre statique
(poids de la membrane
+ terme de force électrostatique exercée entre les armatures)

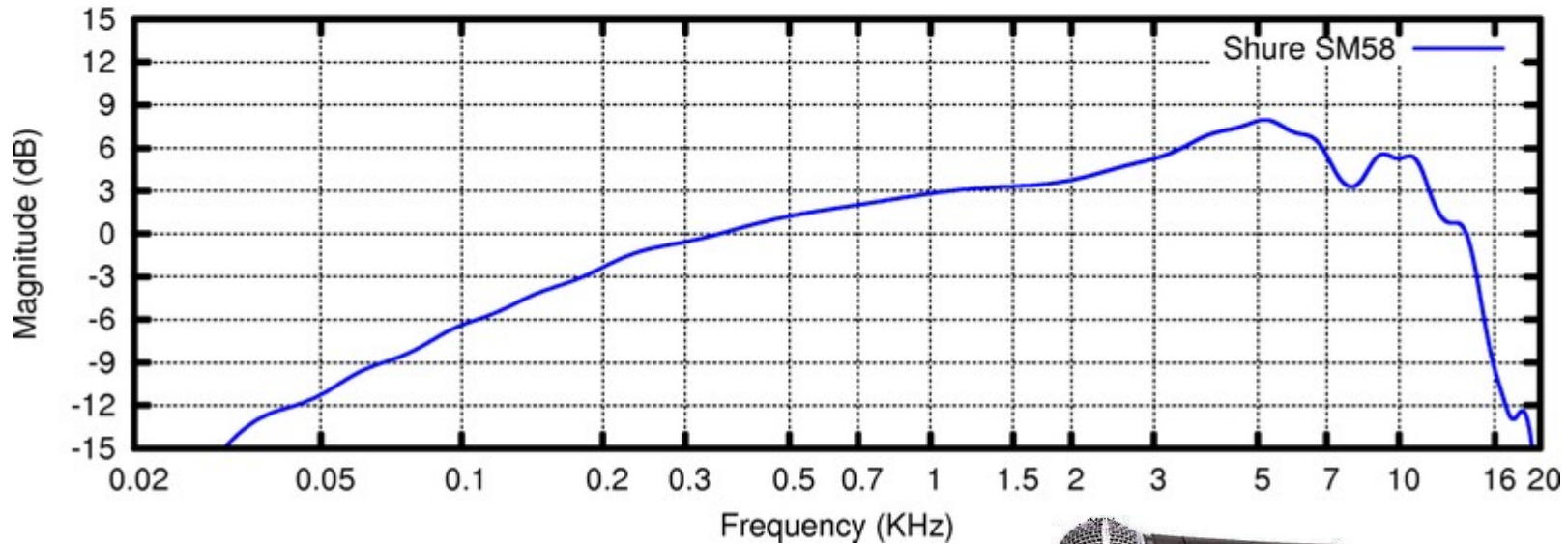
$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F_1 + F_2 = E_0 q + pS$$

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = E_0 \int i dt + pS$$

On continue comme dans le cas électrodynamique
pour trouver la sensibilité du microphone ...



Oktava 319
(microphone
à condensateur)

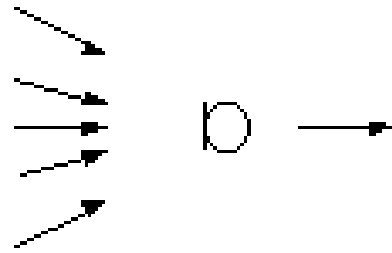


Shure SM58
(microphone dynamique)



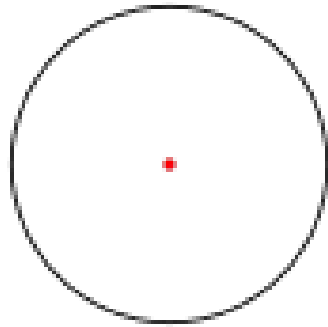
Directivité d'un microphone

Provenances
diverses des sons

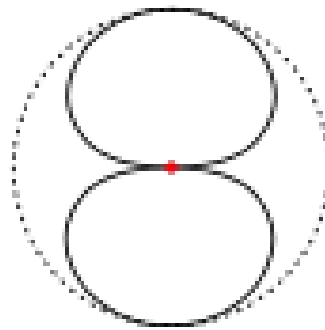


Tension de sortie

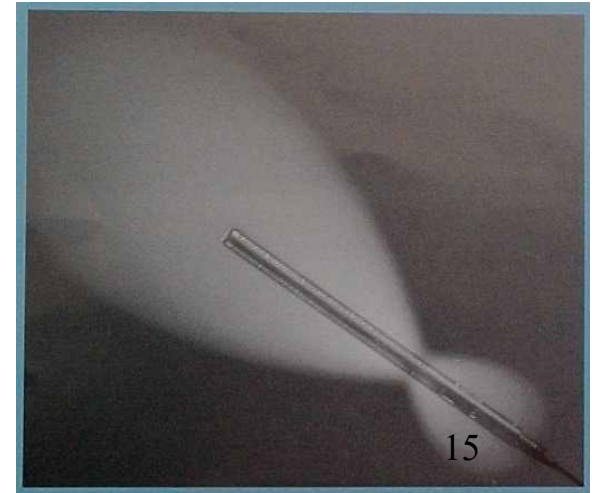
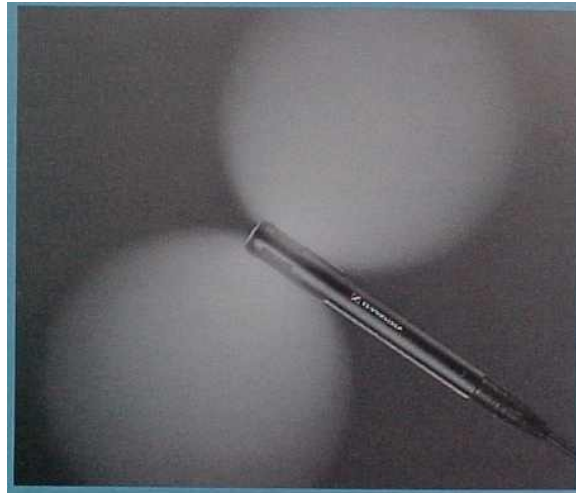
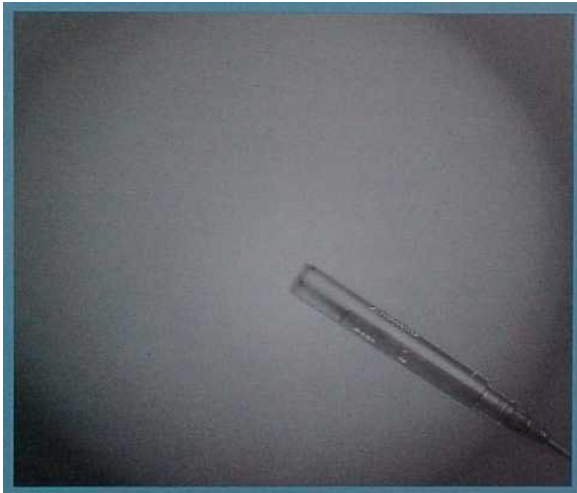
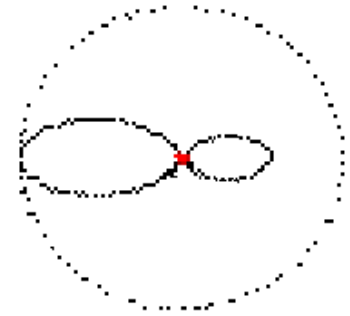
Omnidirectionnel



Bi-directionnel

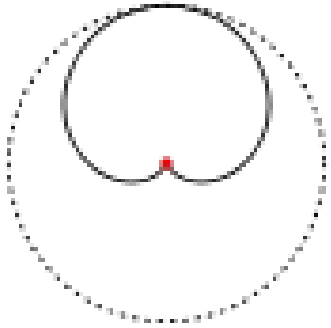


Uni-directionnel

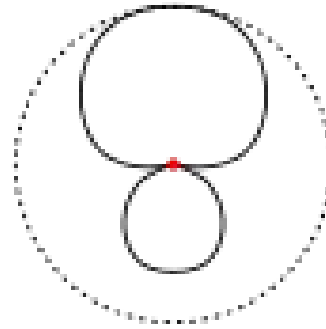


Autres diagrammes de directivités

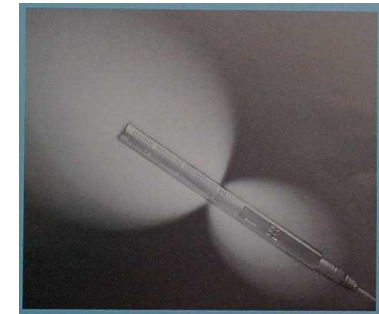
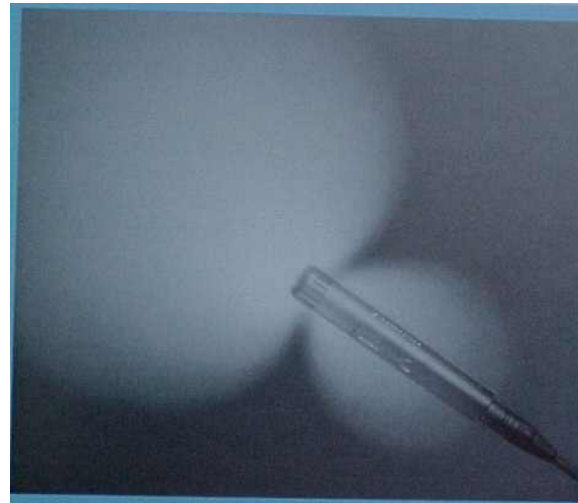
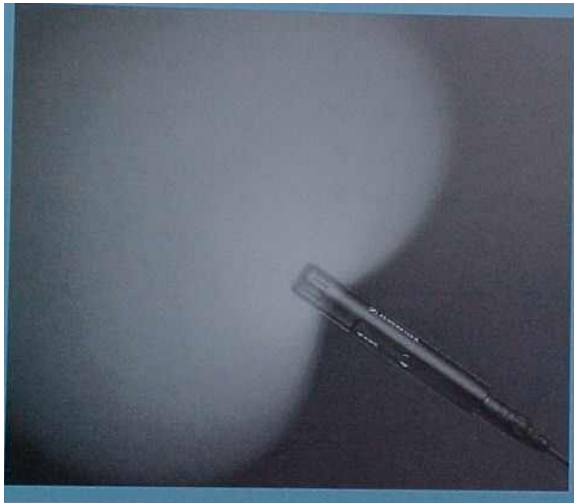
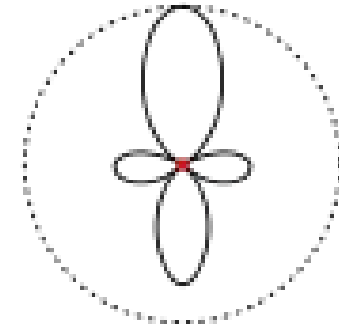
Cardioïde



Hypercardioïde



Canon



Cardioïde – lobe court

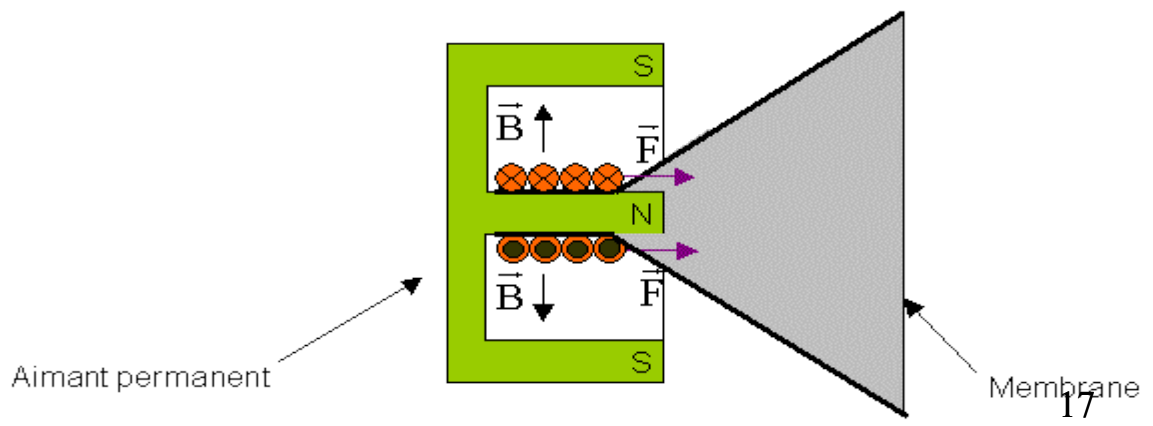
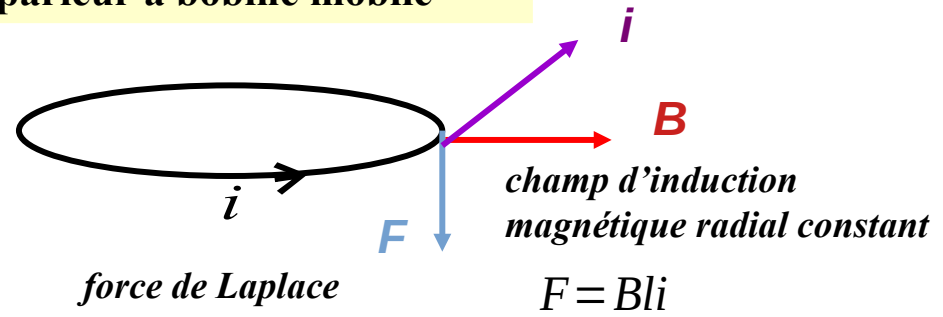
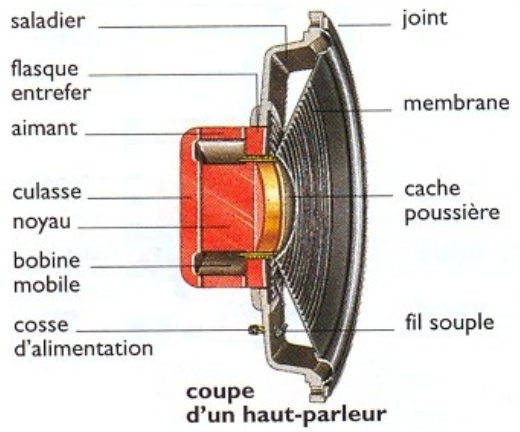
Le haut-parleur

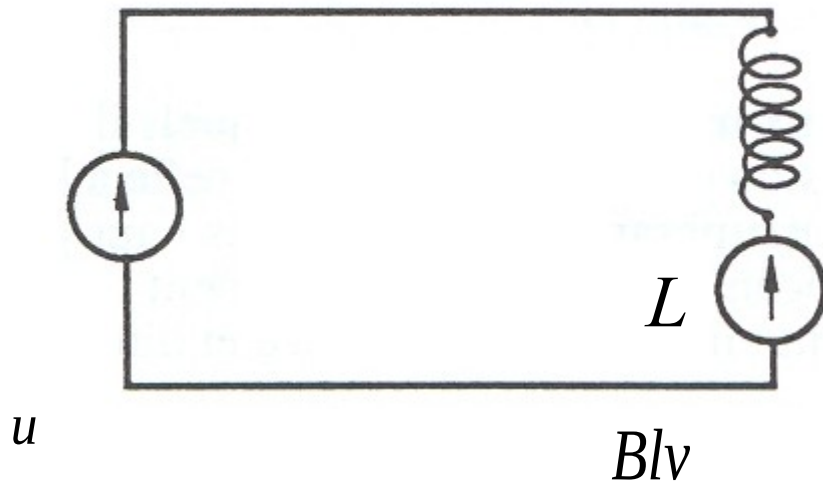
transducteur électro-acoustique
(de sortie)

énergie électrique  énergie acoustique

Haut-parleur

Le haut-parleur à bobine mobile





équation électrique du haut-parleur

$$u = Ri + L \frac{di}{dt} - Bl \dot{x}$$

$$Z_e = R + jL \omega$$

équation mécanique du haut-parleur

$$m \ddot{x}(t) + c \dot{x}(t) + kx(t) = -Bli$$

$$Z_m = c + mj\omega - j \frac{k}{\omega}$$

$$Z_m(j\omega x) = -Bli$$

$$Z_e^* i = U$$

avec

$$Z_e^* = Z_e + B^2 l^2 \frac{1}{Z_m}$$

Le sonomètre

microphone + un système électronique

Le signal global du microphone est converti en intensité acoustique exprimée en décibel (dB).



$$L_p = 20 \log \left(\frac{p}{p_0} \right)$$

$$\begin{aligned} p_0 &= 0.00002 \text{ Pa} \\ &= 2 \cdot 10^{-10} \text{ bar} \\ &= 2 \cdot 10^{-4} \text{ } \mu\text{bar} \end{aligned}$$

2. Analyse des signaux

Domaines de représentation des signaux

Buts : *caractériser les signaux,
visualiser et extraire les propriétés des systèmes,
interpréter les résultats d'essais et de simulations numériques.*

domaine
temporel

représentation de base

*fonction de corrélation
transformation de Hilbert*

domaine
fréquentiel

*évaluation directe de la périodicité ou non
des phénomènes
évaluation de la distribution de l'énergie
en fonction de la fréquence*

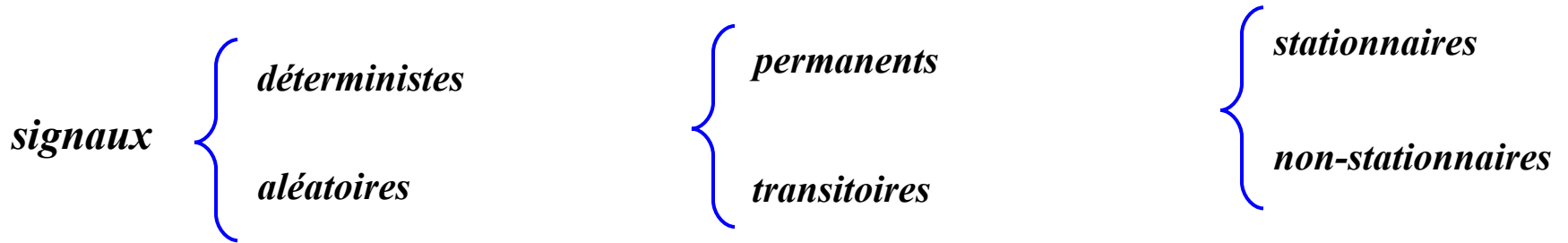
*développement
en séries de Fourier
transformation de Fourier*

domaine
temps-fréquence

*évaluation de la stationnarité ou non
des phénomènes
évaluation de la distribution de l'énergie
en fonction du temps et de la fréquence*

transformation en ondelettes

Classification des signaux



{

signaux déterministes à énergie finie
signaux de puissance finie (théorie)

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt < +\infty$$

$$\lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} |x(t)|^2 dt < +\infty$$

 $x(t) = a \cos(\omega t)$

{

Signaux périodiques
Signaux non-périodiques

 $x(t+T) = x(t)$

{

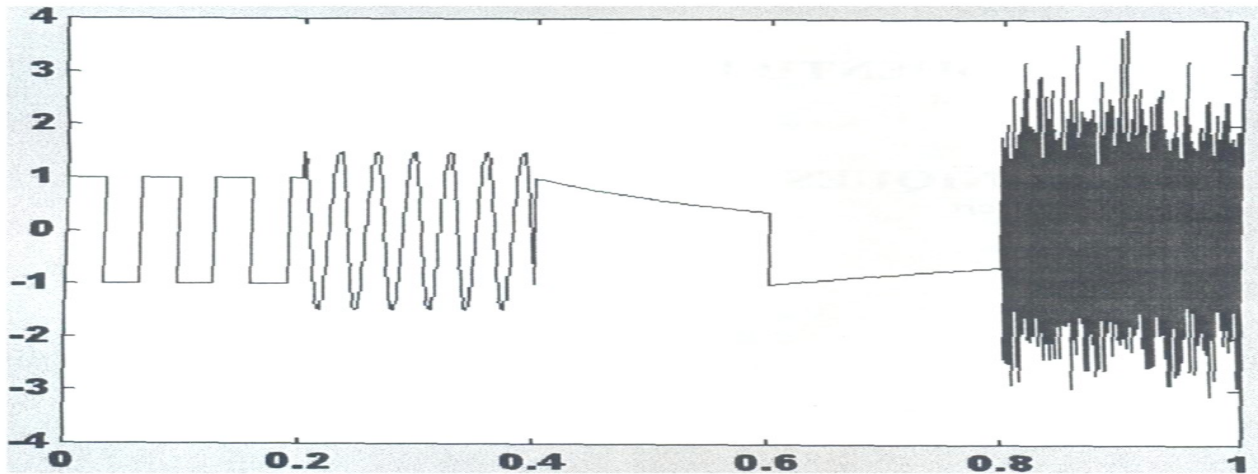
signaux continus
signaux discrets

$$x(n\Delta) = \int_{n\Delta-\epsilon}^{n\Delta+\epsilon} x(t) \delta_{\Delta}(t) dt$$

Domaine temporel

$x(t)$

amplitude



temps

$x(t)$ signal déterministe à énergie finie

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt < +\infty$$

$$R_{xx}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \overline{x(t-\tau)} dt = \int_{-\infty}^{+\infty} \overline{x(t)} x(t+\tau) dt$$

mesure des dépendances internes du signal
prédictibilité des signaux,

Cas des signaux de puissance finie (théorie)

puissance moyenne transportée par le signal

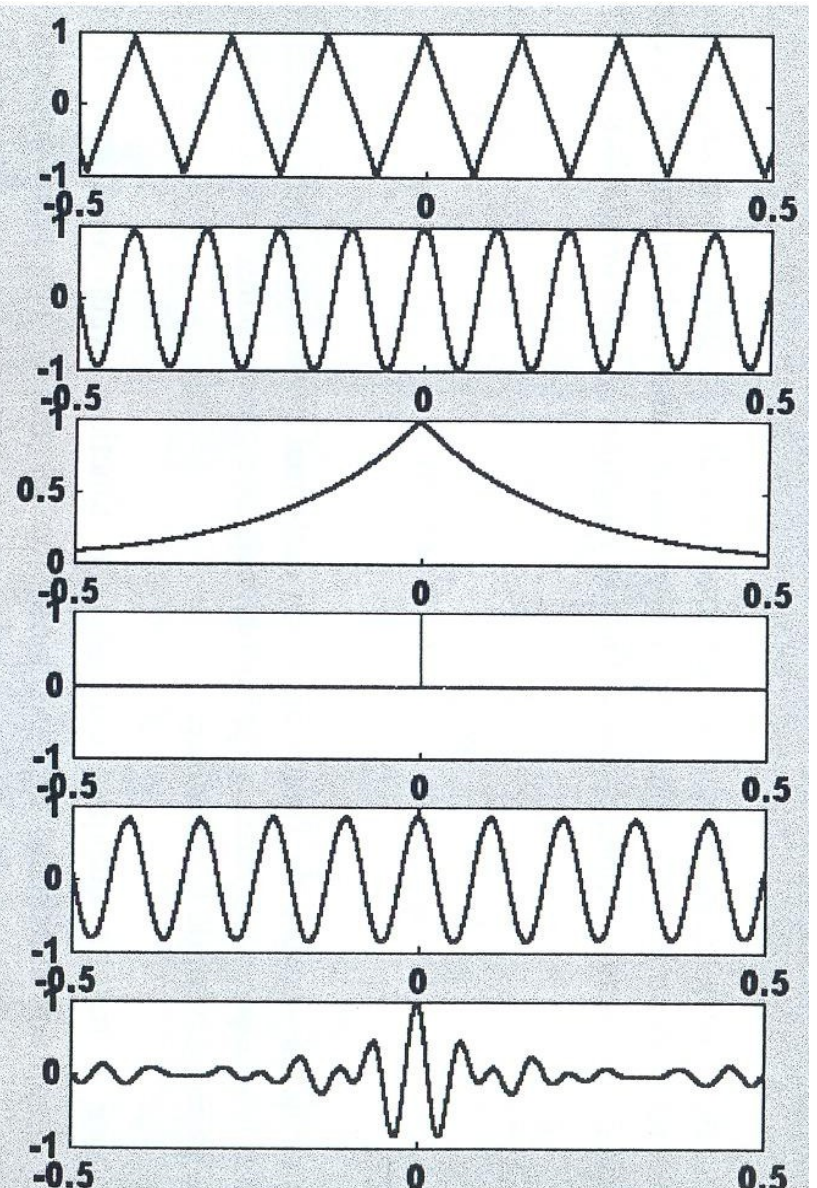
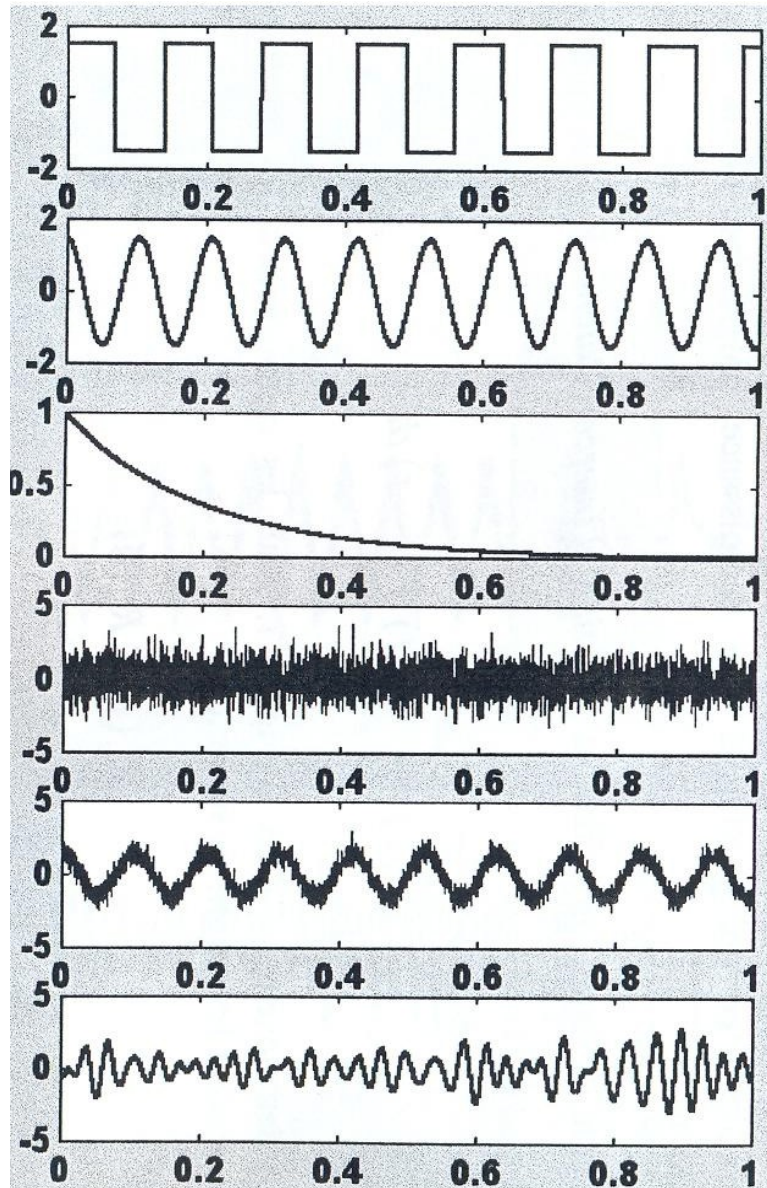
$$\lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} |x(t)|^2 dt < +\infty$$

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} x(t) \overline{x(t-\tau)} dt$$

Signaux usuels et leurs fonctions d'autocorrélation respectives normalisées

DOMAINE TEMPOREL $x(t)$

AUTOCORRELATION $R_{xx}(\tau)$



temps

retard

fonction d'intercorrélation

Domaine temporel

$x(t)$ et $y(t)$ signaux déterministes à énergie finie

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt < +\infty$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |y(t)|^2 dt < +\infty$$

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \overline{y(t-\tau)} dt$$

$x(t)$ et $y(t)$ signaux de puissance finie

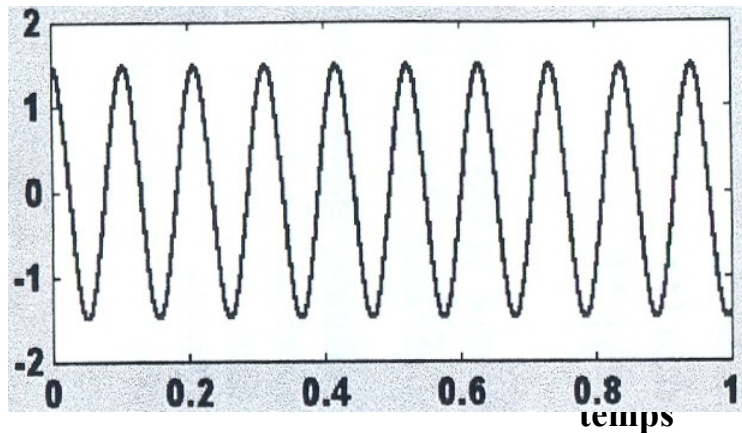
$$\lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} |x(t)|^2 dt < +\infty$$

$$\lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} |y(t)|^2 dt < +\infty$$

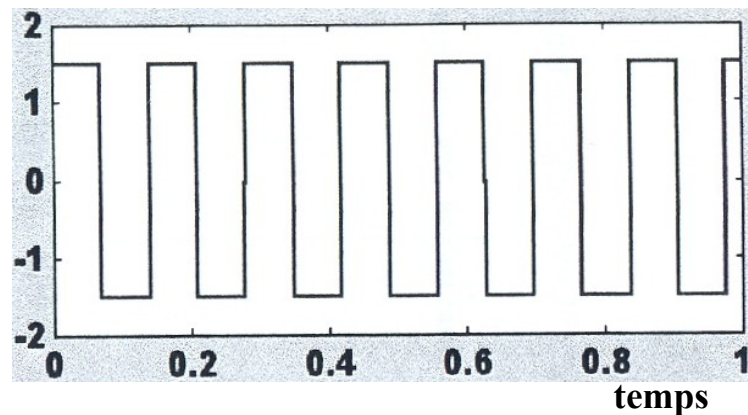
$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} x(t) \overline{y(t-\tau)} dt$$

Signaux et fonctions d'intercorrélation respectives (normalisées)

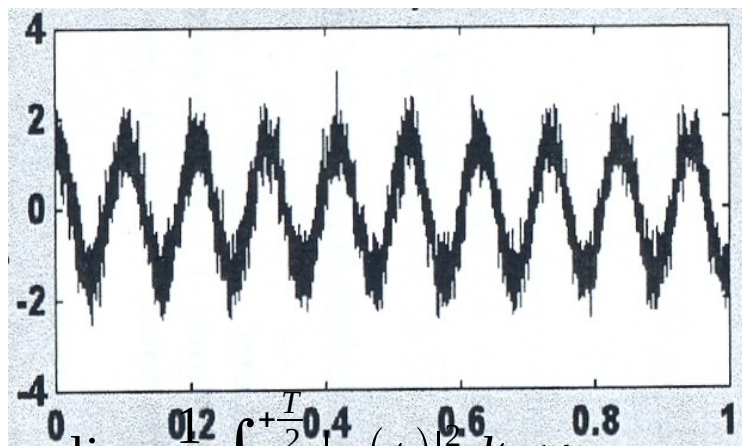
$x(t)$



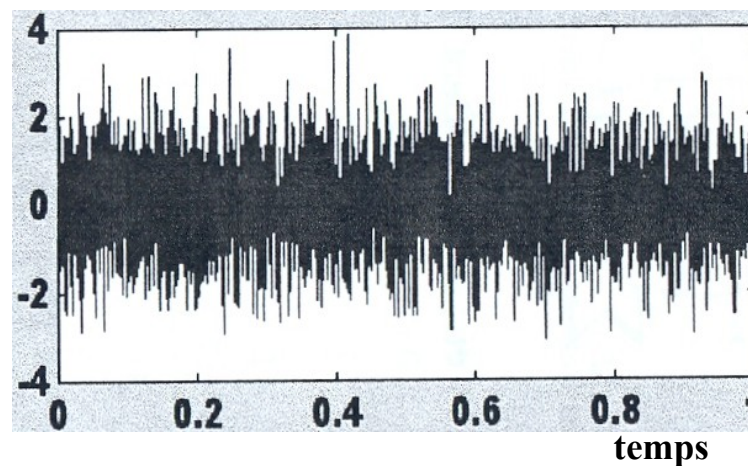
$x(t)$



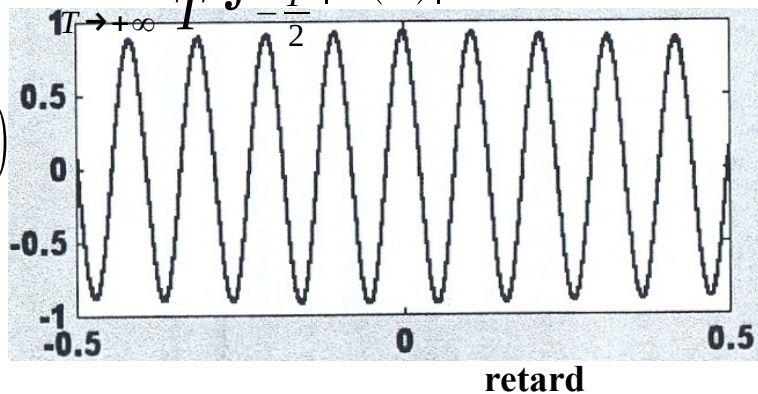
$y(t)$



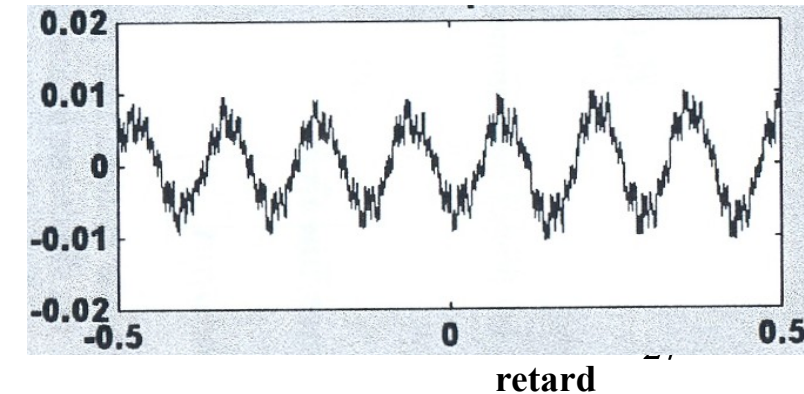
$y(t)$



$R_{xy}(\tau)$



$R_{xy}(\tau)$

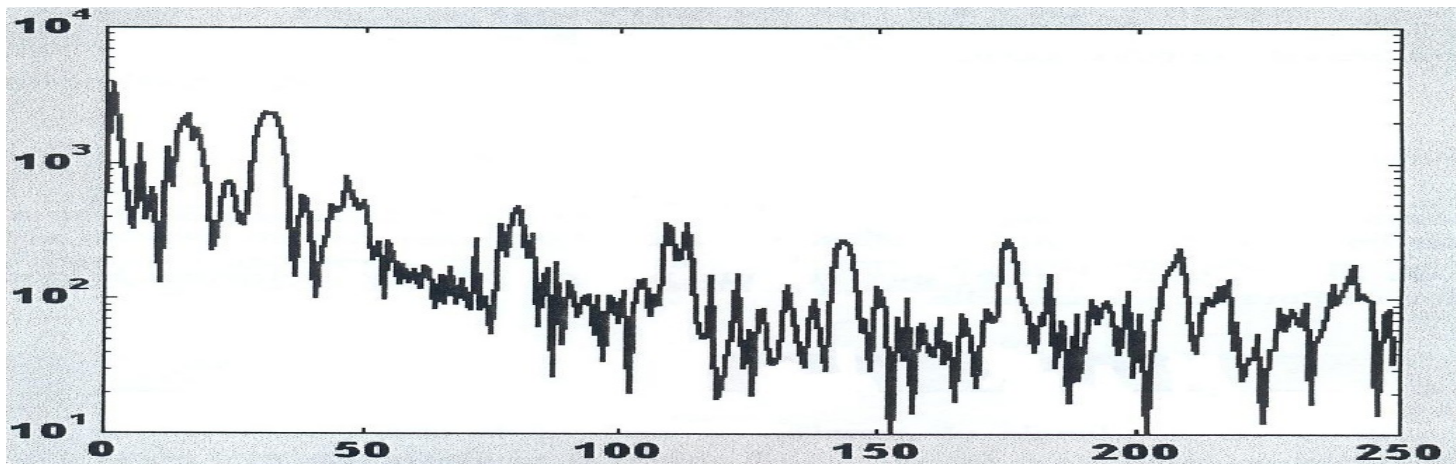


$$\lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} |x(t)|^2 dt < +\infty$$

Domaine fréquentiel

$$|\hat{X}(v)|$$

module de la T.F.



fréquence

densité spectrale d'énergie - autocorrélation

$x(t)$ *signal d'énergie totale finie*

$$\hat{x}(v) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-2\pi vt} dt$$

théorème de Parseval
$$\int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{+\infty} |\hat{x}(v)|^2 dv$$

$|\hat{x}(v)|^2$ *énergie par intervalle de fréquence dv*

densité spectrale d'énergie

transformation de Fourier inverse

$$T.F.^{-1} \{ |\hat{x}(v)|^2 \} (t) = x(t) * \overline{x(-t)} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) \overline{x(-t+\tau)} d\tau = R_{xx}(t)$$

fonction d'autocorrélation de $x(t)$

Densité spectrale croisée. Corrélation croisée

$x(t)$ *signal d'énergie totale finie*

$$\hat{x}(v) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-2i\pi vt} dt$$

$y(t)$ *signal d'énergie totale finie*

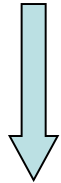
$$\hat{y}(v) = \int_{-\infty}^{+\infty} y(t) e^{-2i\pi vt} dt$$

théorème de Parseval

$$\int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \overline{y(t)} dt = \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{x}(v) \overline{\hat{y}(v)} dv$$

$\hat{x}(v) \overline{\hat{y}(v)}$ *énergie par intervalle de fréquence dv*

densité spectrale croisée d'énergie



transformation de Fourier inverse

$$T.F.^{-1} \left\{ \hat{x}(v) \overline{\hat{y}(v)} \right\} (t) = x(t) * \overline{y(-t)}$$

$$x(t) * \overline{y(-t)} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) \overline{y(-t+\tau)} d\tau = R_{xy}(\tau)$$

fonction d'inter-corrélation de $x(t)$ et de $y(t)$

Puissance spectrale

Energie moyenne en fonction de la fréquence

$$x(t), 0 \leq t \leq T, T.F. \rightarrow x_1(\omega)$$

$$x(t), T \leq t \leq 2T, T.F. \rightarrow x_2(\omega)$$

$$x(t), (n-1)T \leq t \leq nT, T.F. \rightarrow x_n(\omega)$$

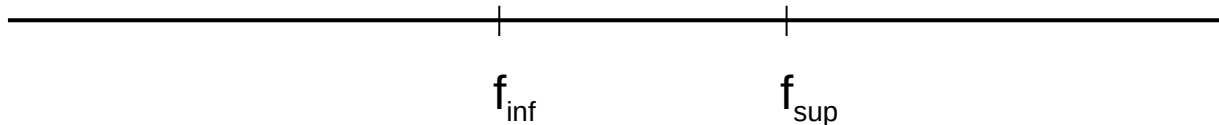
$$\text{Puissance spectrale } S \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} |x_i(\omega)|^2$$

Analyse spectrale

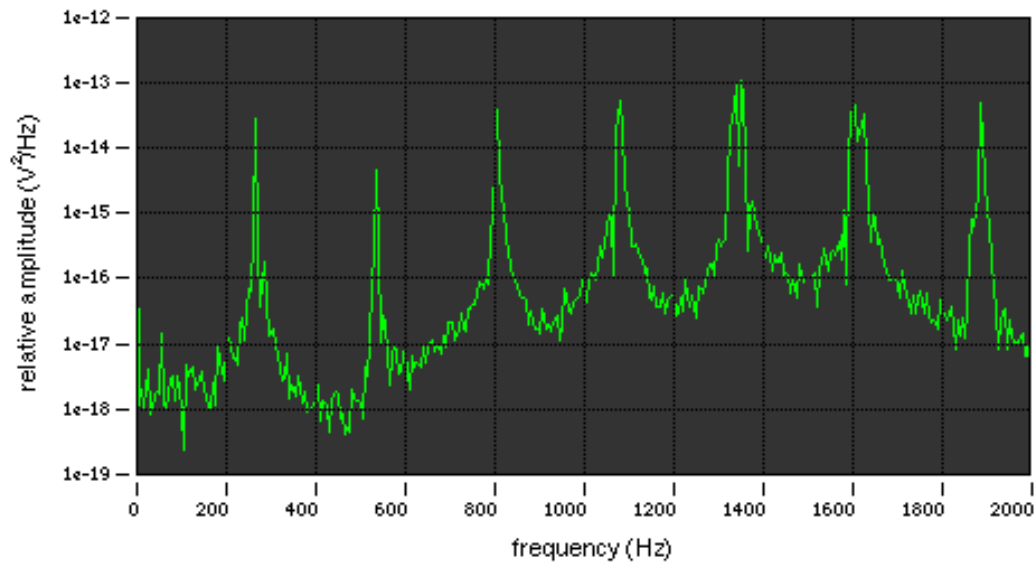
- Définir la répartition de l'énergie en fonction de la fréquence

- Analyse par octave $f_{sup} = 2 f_{inf}$

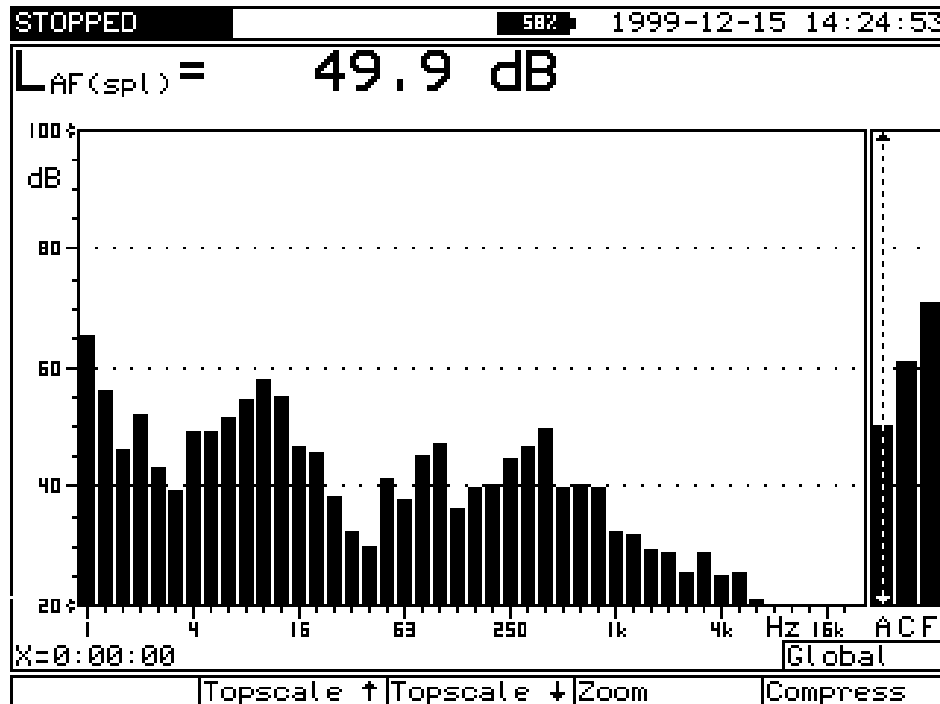
- Analyse par 1/3 octave $f_{sup} = 2^{1/3} f_{inf}$



bande	Octave			1/3 Octave		
	Limite inf	Centre	Limite sup	Limite inf	Centre	Limite sup
12	11	16	22	14,1	16	17,8
13				17,8	20	22,4
14				22,4	25	28,2
15	22	31,5	44	28,2	31,5	35,5
16				35,5	40	44,7
17				44,7	50	56,2
18	44	63	88	56,2	63	70,8
19				70,8	80	89,1
20				89,1	100	112
21	88	125	177	112	125	141
22				141	160	178
23				178	200	224
24	177	250	355	224	250	282
25				282	315	355
26				355	400	447
27	355	500	710	447	500	562
28				562	630	708
29				708	800	891
30	710	1000	1420	891	1000	1122
31				1122	1250	1413
32				1413	1600	1778
33	1420	2000	2840	1778	2000	2239
34				2239	2500	2818
35				2818	3150	3548
36	2840	4000	5680	3548	4000	4467
37				4467	5000	5623



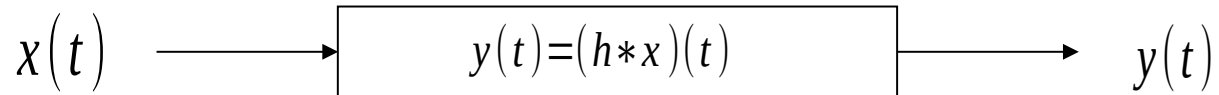
Bande fine



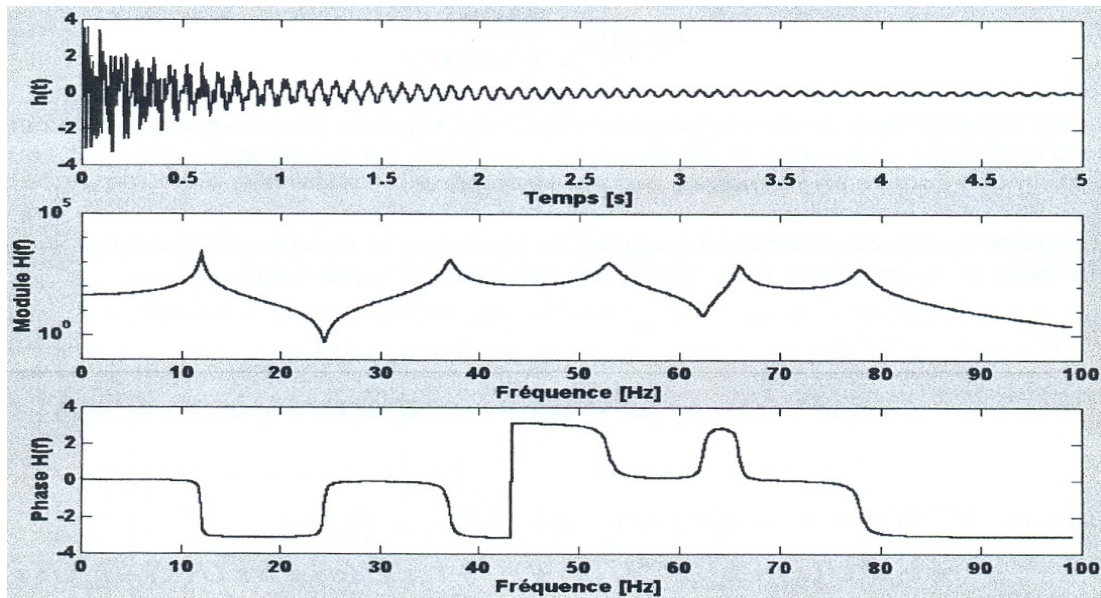
Tiers d'octave

Description d'un système par fonctions de transfert

Système à une entrée et une sortie



$h(t)$ réponse impulsionnelle, $h(\omega)$ fonction de réponse en fréquence



Description très générale des systèmes

Système linéaire

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} H(t, \tau) x(\tau) d\tau$$

Système invariant dans le temps

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) x(t - \tau) d\tau$$

Système causal

$$y(t) = \int_0^{+\infty} h(\tau) x(t - \tau) d\tau$$

Pour déterminer h on peut prendre $x(t) = \delta(t)$

Il suffit de mesurer la sortie du système pour connaître la fonction $h(t)$

Le comportement en fréquence est

$$y(\omega) = h(\omega) x(\omega)$$

Autre détermination de la fonction de réponse en fréquence

$$R_{xx}(\tau) \text{ T.F. } \Rightarrow S_{xx}(\omega)$$

Densité spectrale d'énergie

$$R_{xy}(\tau) \text{ T.F. } \Rightarrow S_{xy}(\omega)$$

Interspectre

si

$$y = h * x$$

$$h = \frac{S_{yx}}{S_{xx}}$$

Echantillonnage

$$x_n = x(nT_e)$$

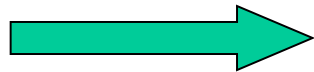
$$y_n = y(nT_e)$$

T_e est la période d'échantillonnage

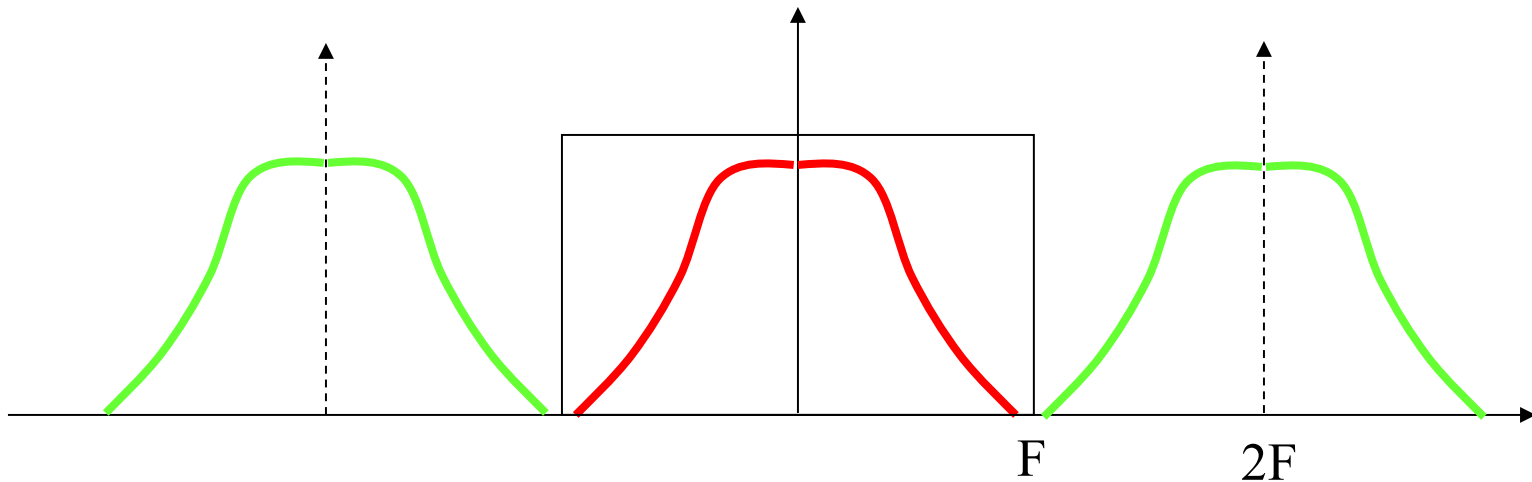
$$y(t) = \int_0^{+\infty} h(\tau) x(t - \tau) d\tau$$

$$y_n = \sum_{i=0}^{i=n} h_i x_{n-i}$$

Théorème de Shannon : un signal continu à spectre borné par la fréquence F doit être échantillonné au moins à $2F$.



Filtrer avant d'échantillonner



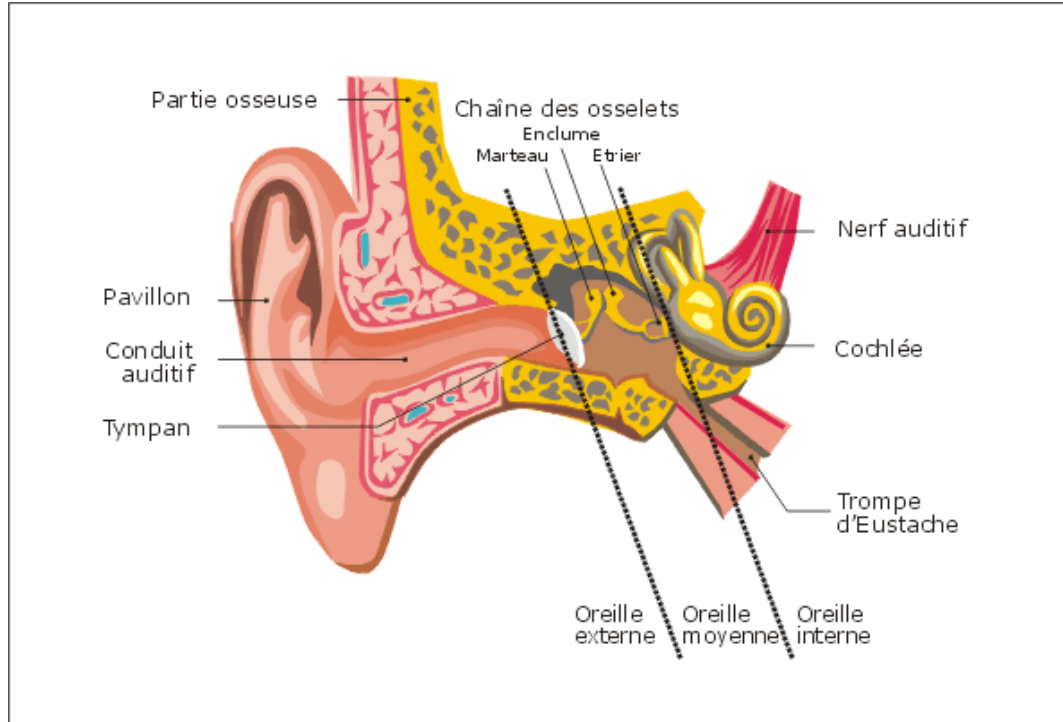
Dans ce cas on peut reconstruire $x(t)$ à partir des signaux discrets x_i

3. Perception du son

Effets du son

- Niveaux de pression 0.00002Pa à 100Pa
- Pas d'effet mécanique réel
- Effet principal du à la perception du son par les individus
- Nécessité de savoir comment le son est perçu

Oreille humaine

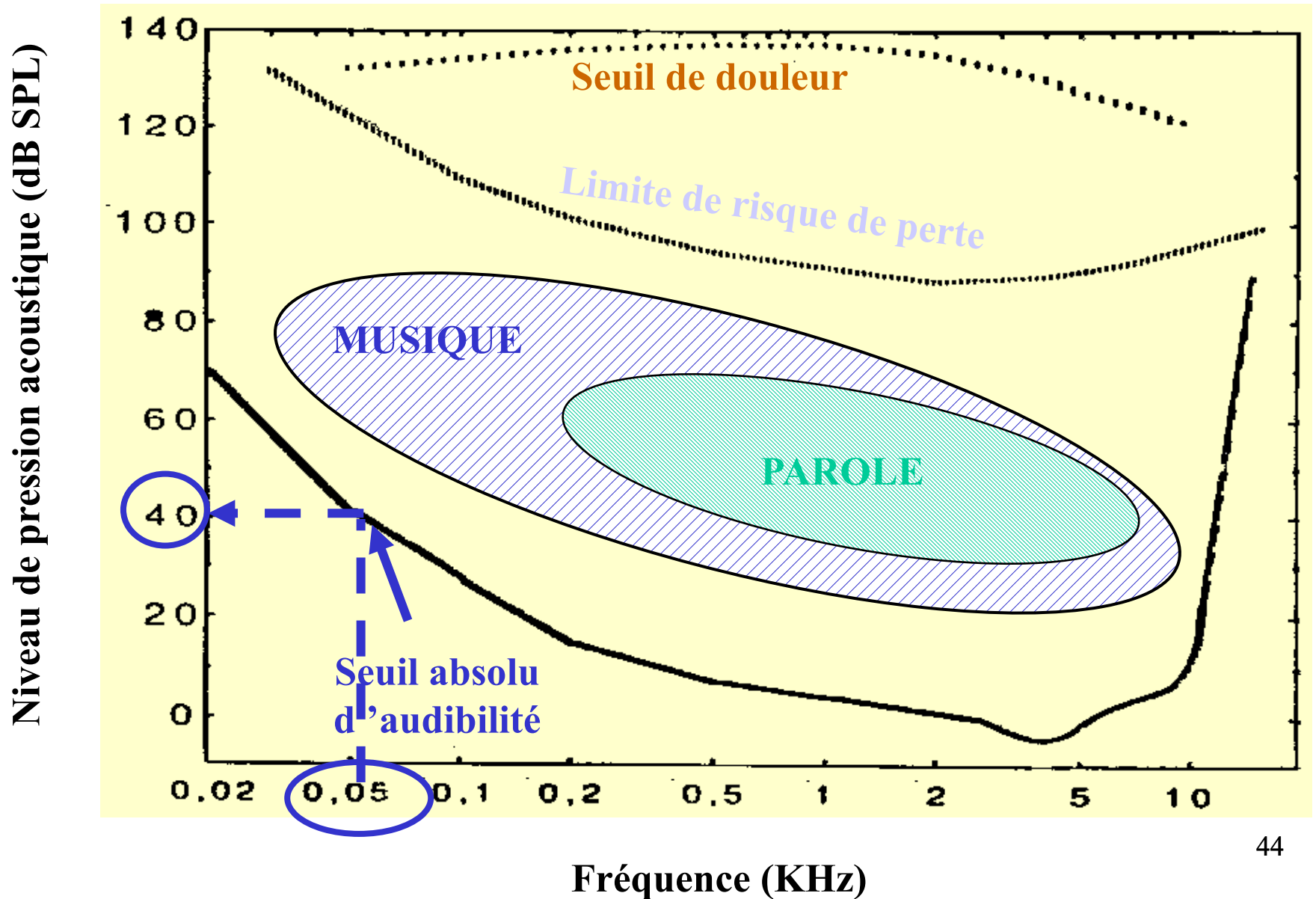


- Oreille externe : collecte du son
- Oreille moyenne: Transfert mécanique
- Oreille interne (Cochlée):
 - Transformation des vibrations mécaniques en impulsions nerveuses
- Système nerveux, cerveau
 - Sensation : fréquence, amplitude
 - Synthèse droite-gauche
 - Identification du son (danger, musique, parole)

Sons audibles

- L'intervalle de fréquences perceptibles par l'homme est [20Hz,20kHz].
- On distingue
 - Les infrasons $< 20\text{Hz}$.
 - Les sons audibles [20Hz,20kHz].
 - Les ultrasons $> 20\text{kHz}$.
- Le seuil d'audition est vers 0dB.
- Le seuil de la douleur se situe vers 120dB.

Le champ audible humain

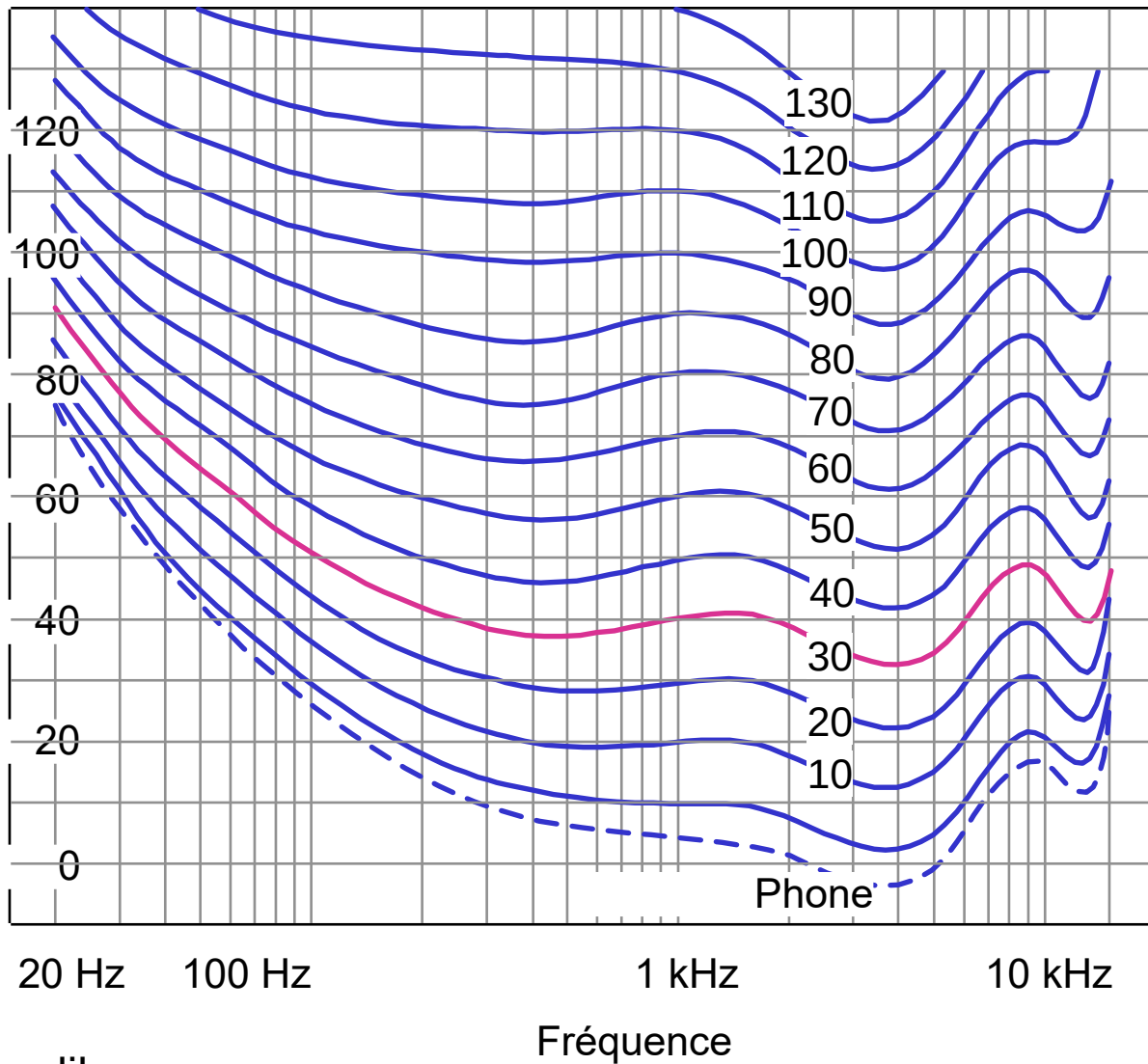


Perception des niveaux sonores

Changement du niveau sonore (dB)	Changement de la perception
3	Juste perceptible
5	Différence notable
10	Deux fois plus fort
15	Grand changement
20	Quatre fois plus fort

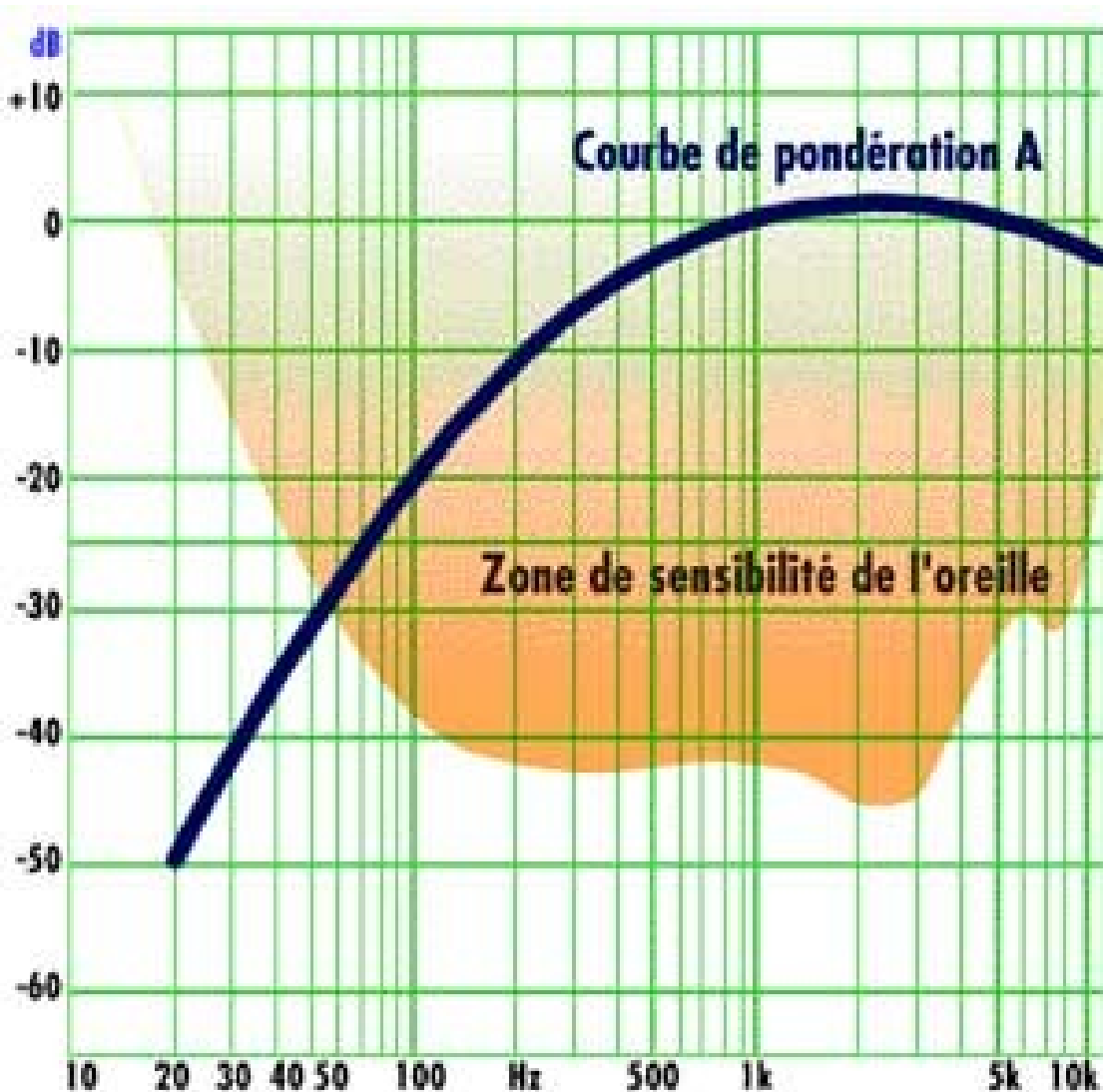
Courbes isosoniques

Niveau
Sonore, L_p
(dB re 20μ Pa)



Sons purs en champ libre

Courbe de pondération A



$$L_A = 20 \log_{10} \frac{p_A}{p_0}$$

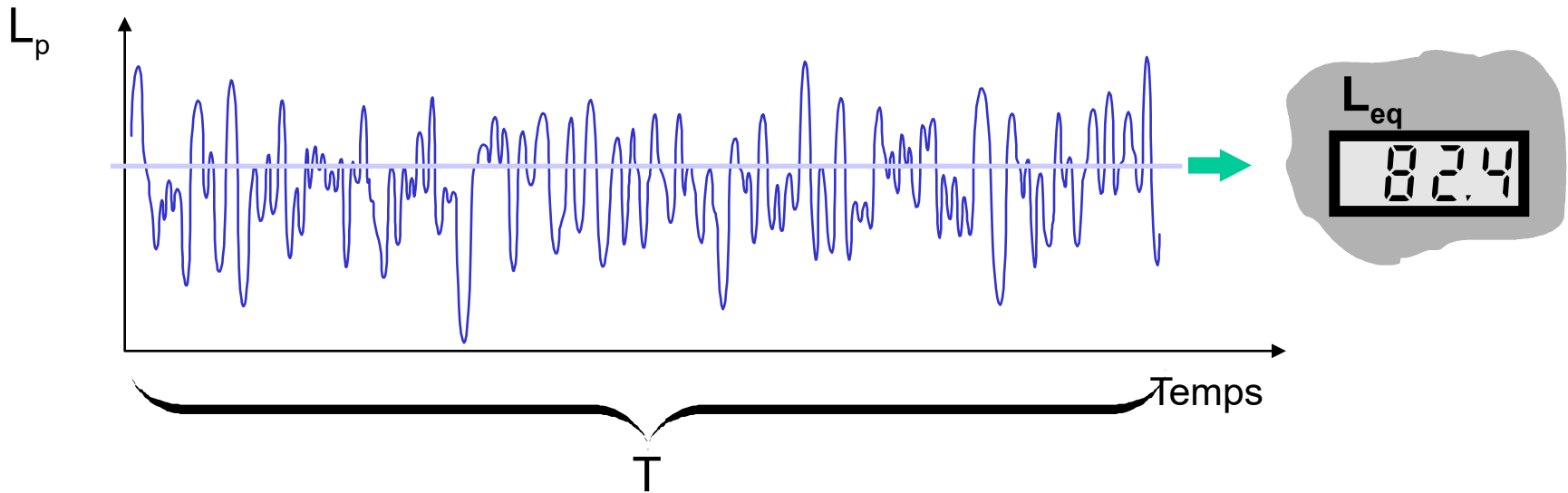
p_A pression filtrée
par une fonction
ayant la courbe A
comme réponse
en fréquence

Indicateurs et gène

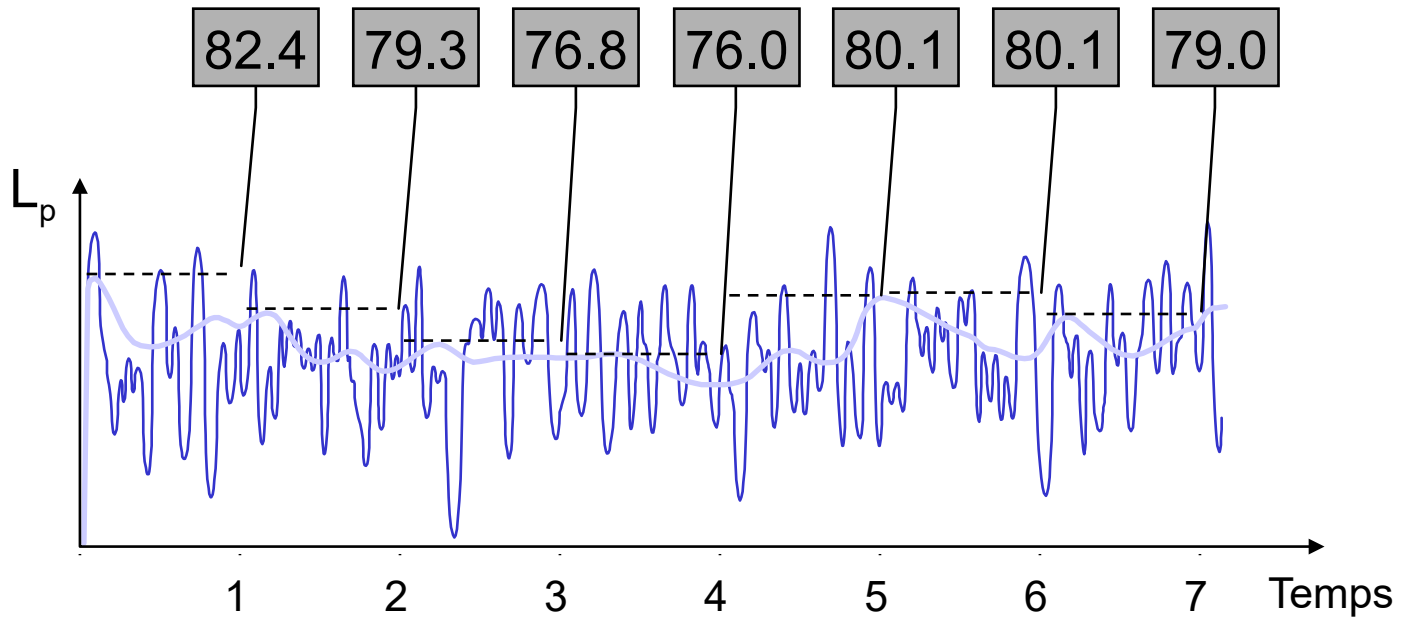
Niveau sonore équivalent, L_{eq}

$$L_{eq} = 10 \log_{10} \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{p(t)}{p_0} \right)^2 dt$$

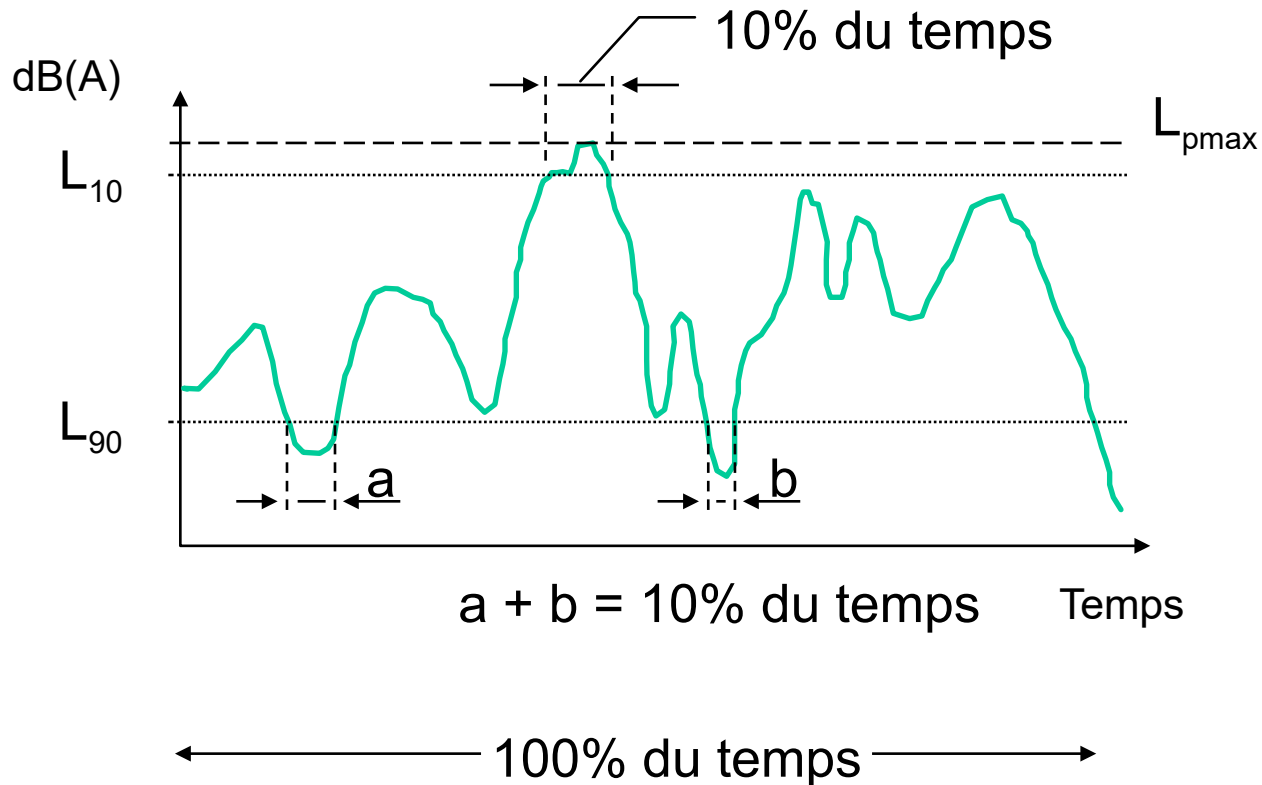
En général $p(t)$ mesuré en dBA



Moyenne sur temps court



Niveaux en pourcentage du temps, L_N



Bruit impulsionnel

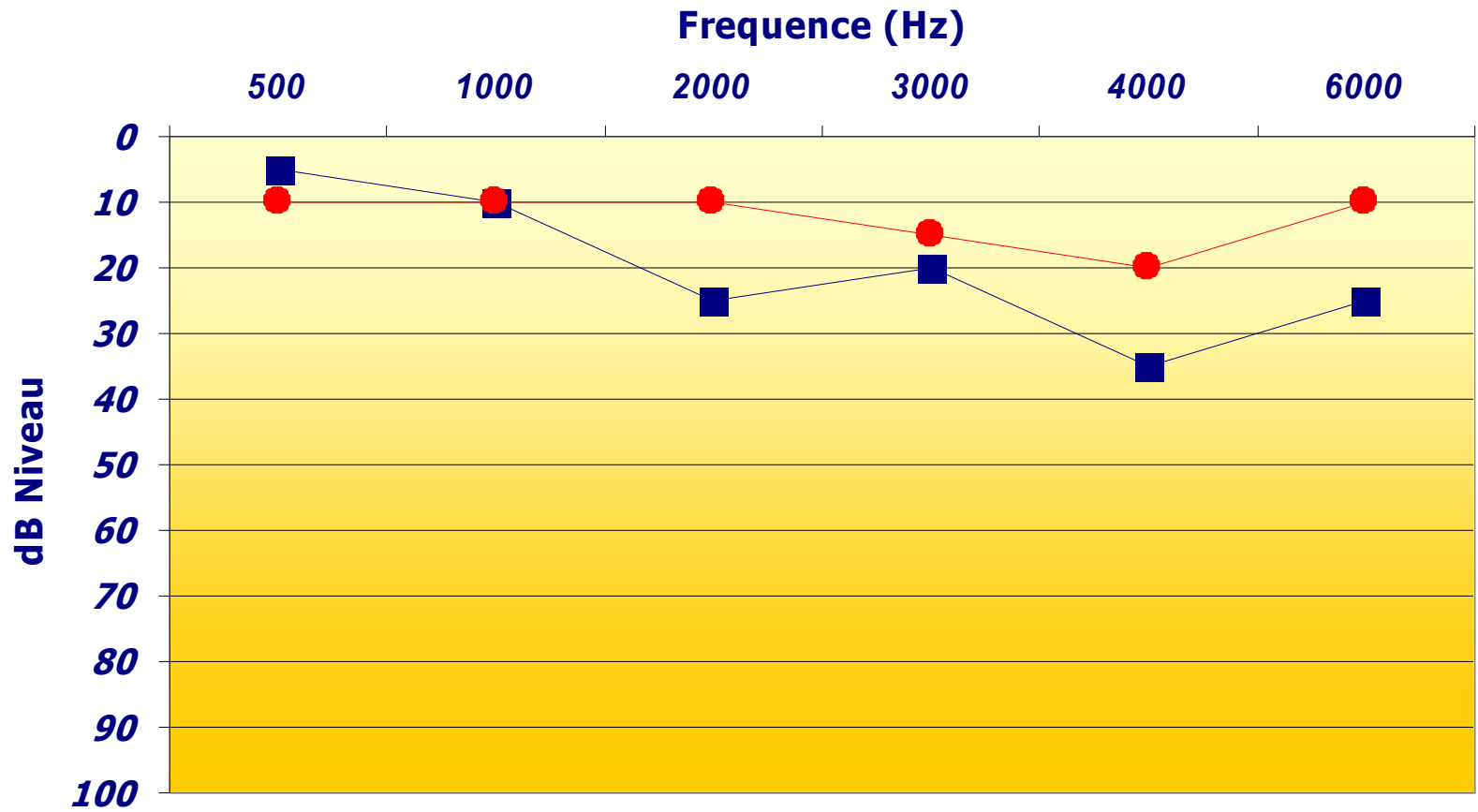
- Augmentation de + de 40 dB en moins de 0.5s
- L'oreille peut supporter 130dBA pendant plus de 2mn
- Limite de sécurité à 140dB

La gêne

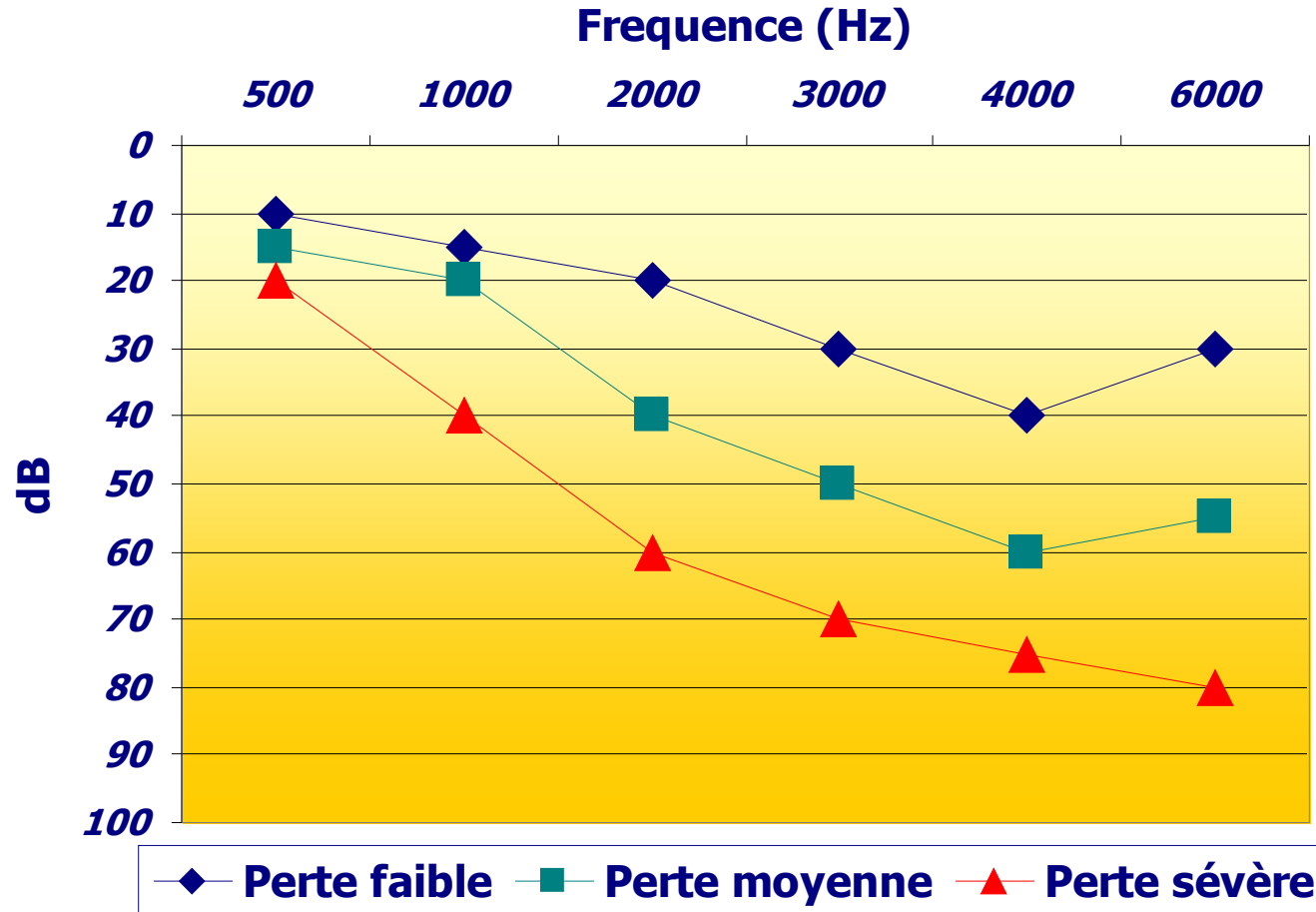
- Notion complexe
 - caractéristiques physiques du bruit
 - aspects physiologiques
 - aspects psychologiques
 - facteurs sociologiques
 - facteurs contextuels
- Problème : relier le sentiment de gêne aux valeurs physiques
- + ou – corrélée aux indicateurs

Dangers et réglementation

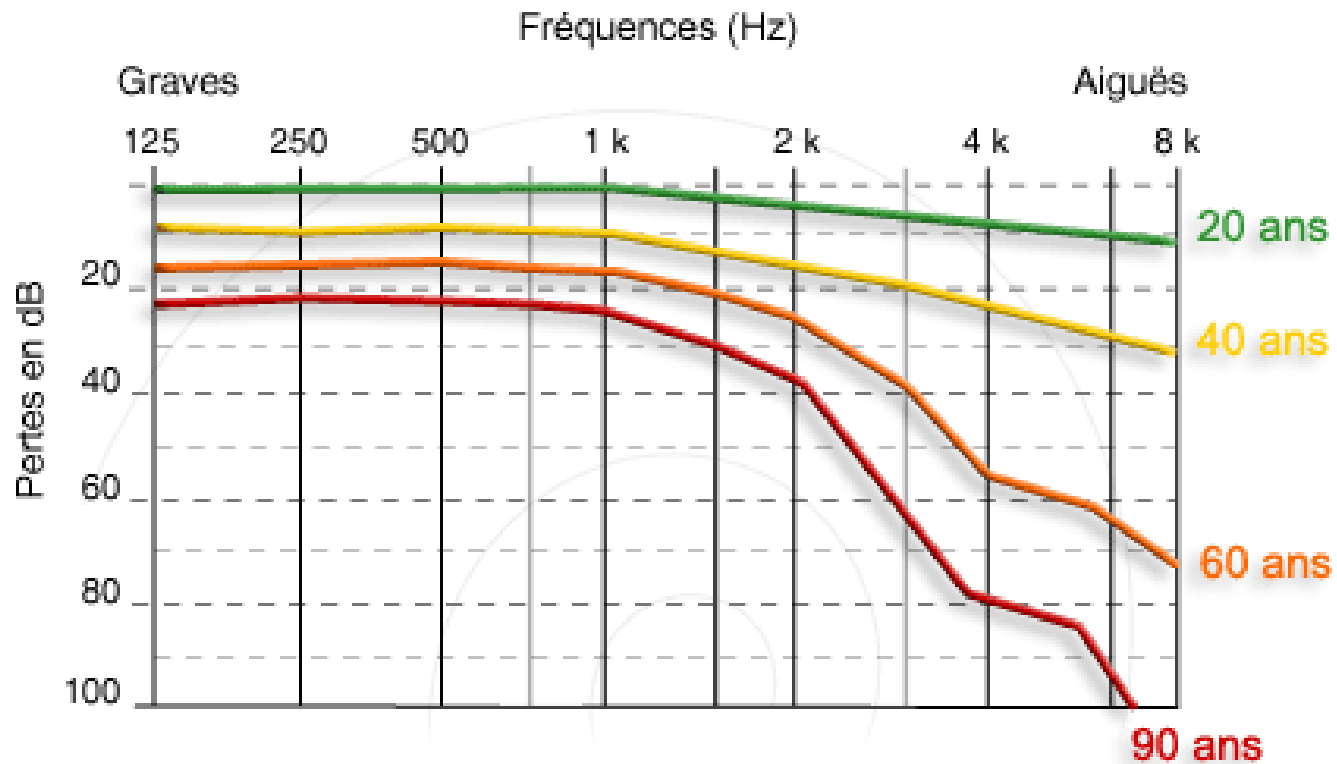
Audiogrammes



Dommmages auditifs



Perte avec l'âge

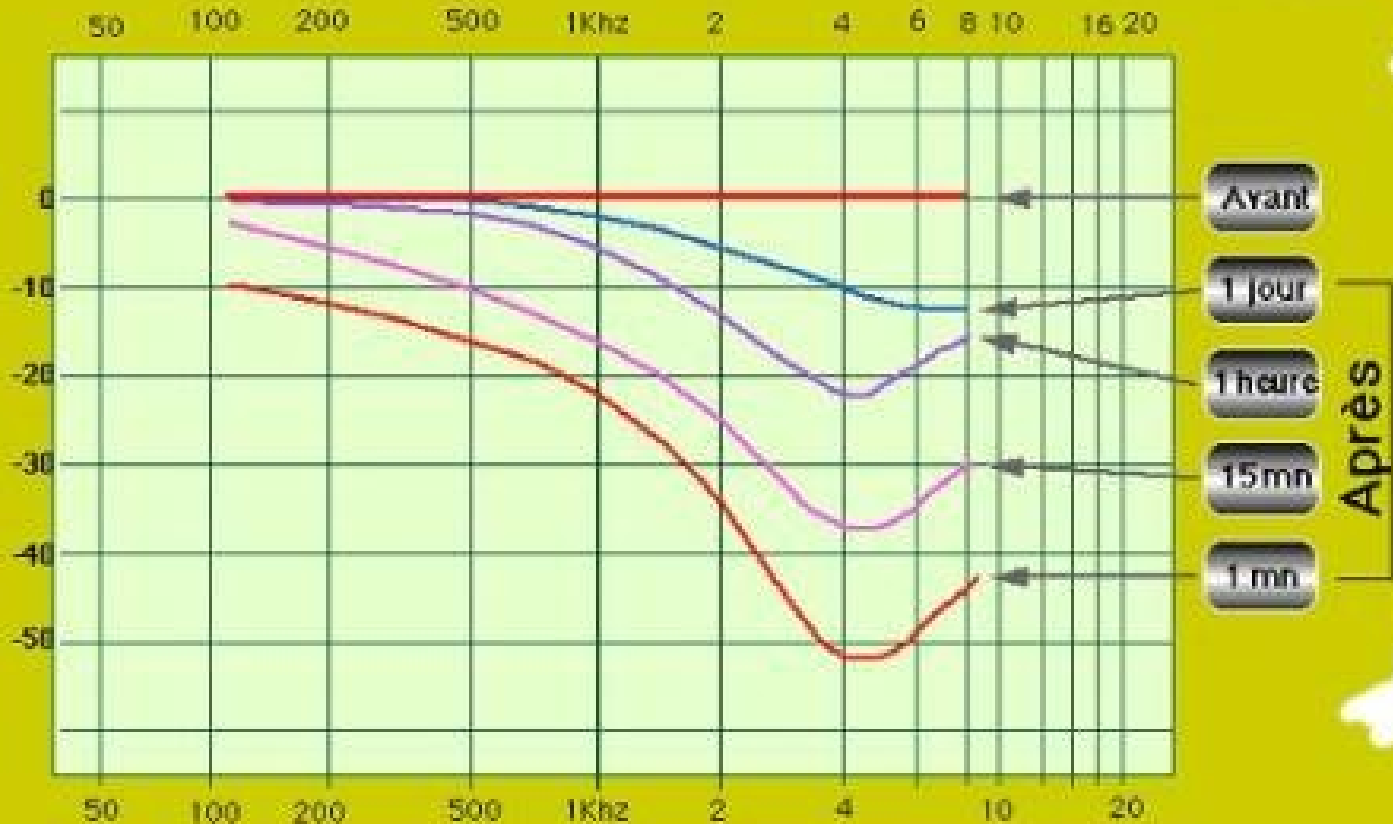


Effets des pertes d'audition

- La nuisance se traduit par des pertes de compréhension de la parole, de signaux ou une altération des réflexes.
- Seule la prévention est efficace : les effets sont souvent irréversibles.
- La fatigue auditive se traduit par une élévation du seuil d'audition et par un abaissement du seuil de la douleur
- Pour une conversation normale il faut rapport un signal sur bruit entre 7 et 11 dB
- Pour une personne ayant des problèmes auditifs, elle n'entendra pas dans ces conditions

FATIGUE AUDITIVE

Test sur un :
ou une :



Exemple

Seuils de bruit

- 85 dBA constitue un seuil d'alerte
- 90 dBA est le seuil de danger
- Variation avec les individus
 - 5% des individus exposés à des niveaux de 80dBA développent des pertes auditives significatives.
 - 5-15% pour une exposition à 85dBA.
 - 15-25% pour une exposition à 90dBA

Effets à long terme

- Au delà d'un niveau sonore élevé, 80-85dB, une exposition de longue durée se traduit par une fatigue auditive et par une perte temporaire d'audition.
- L'acuité auditive se récupère lentement.
- Si la dose de bruit est trop forte et le temps de récupération trop court des pertes définitives d'audition peuvent survenir.

Acouphènes

Réglementation

- Bruit dans l'environnement
 - Bruit au travail
 - Bruit de voisinage
 -
-
- Différentes normes
 -

FIN