

# 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

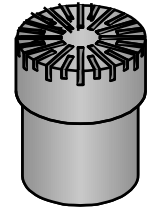
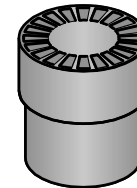
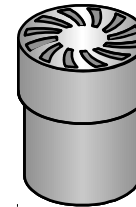
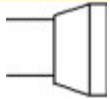


énergie utilisable  
sous une forme différente.

*mécanique, thermique, lumineuse*

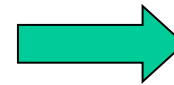
*acoustique, électrique*

## les microphones



**transducteur acousto-électrique d'entrée**

**énergie acoustique**



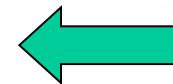
**énergie électrique**

## 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**

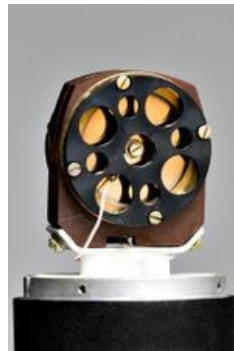
à bobine mobile  
à ruban



**Effets électrostatiques**

**Microphones électrostatiques**

à membrane polarisée  
à membrane pré-polarisée (électrets)



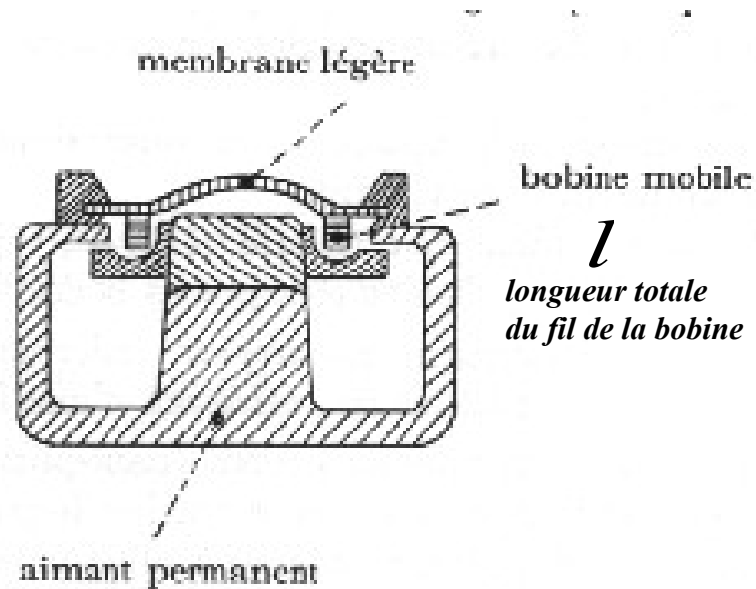
# Le microphone électrodynamique à bobine mobile

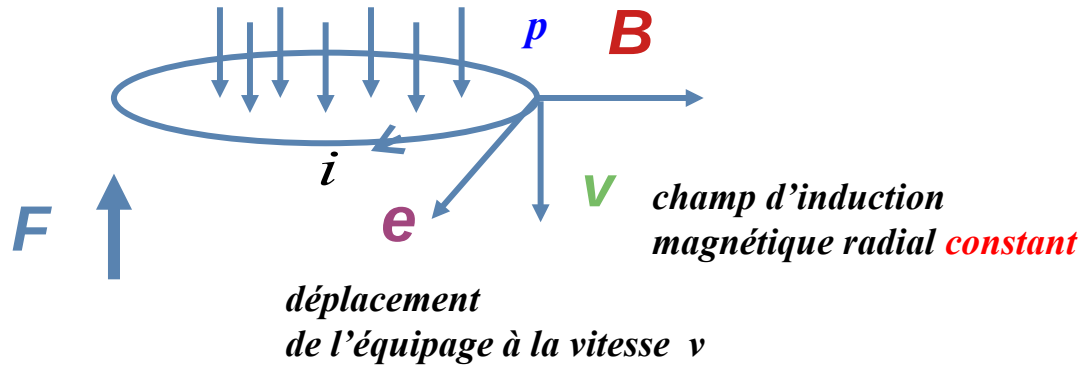
principe

## Couplage électrodynamique

bobine solidaire de la membrane

bobine + membrane = équipement mobile





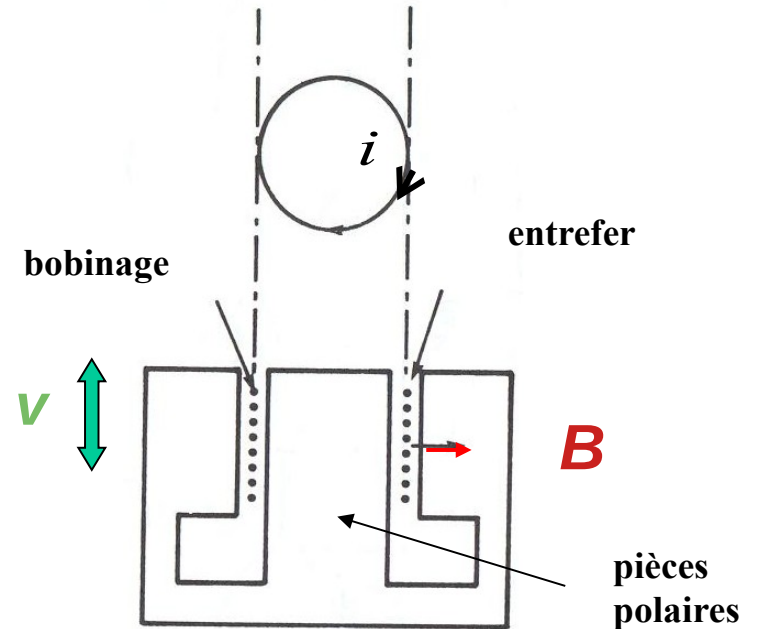
→  $e = l v \wedge B$

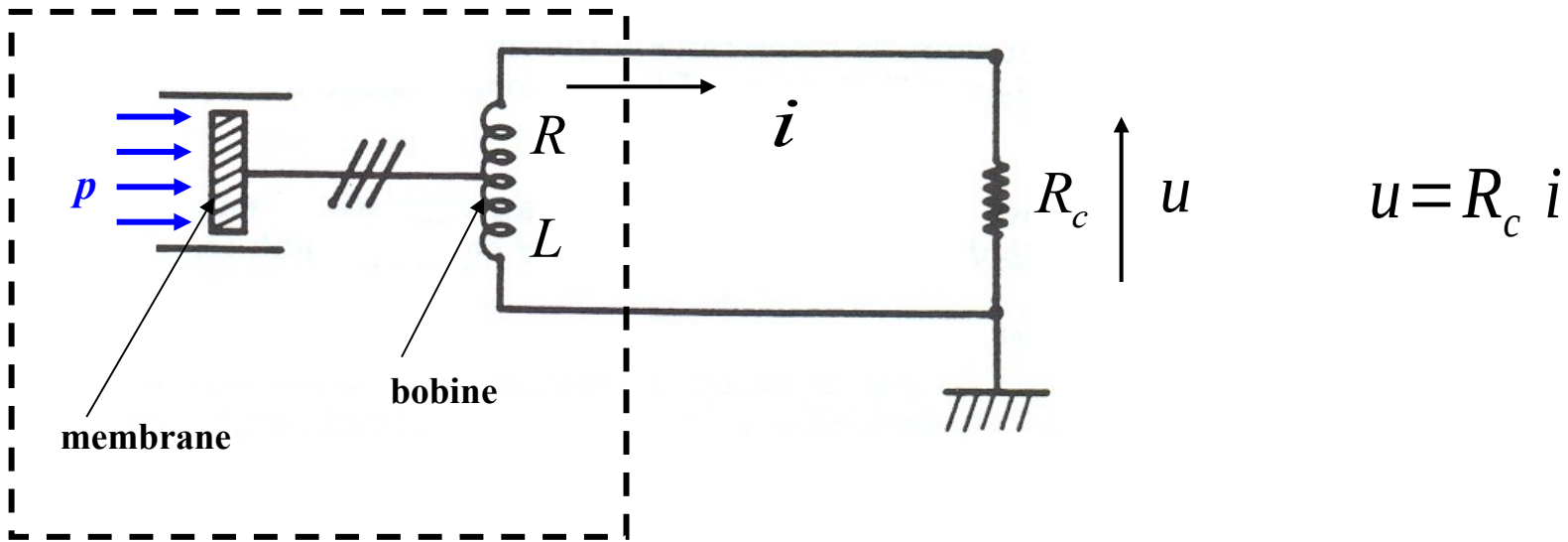
force électromotrice

→  $i$  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**

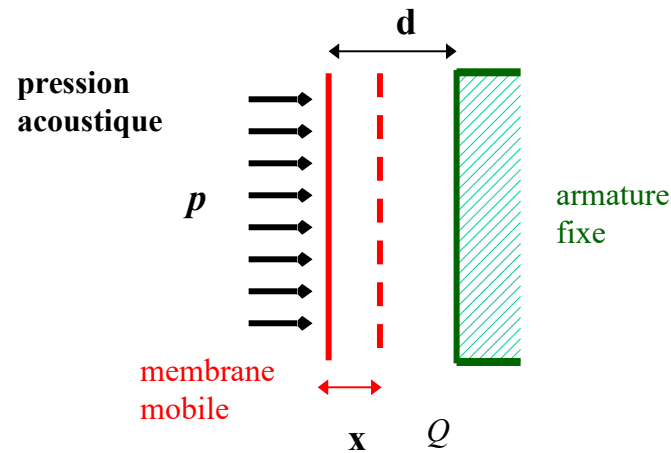
**avantages** : sensibilité, définition

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



Microphone électrostatique de studio

## principe

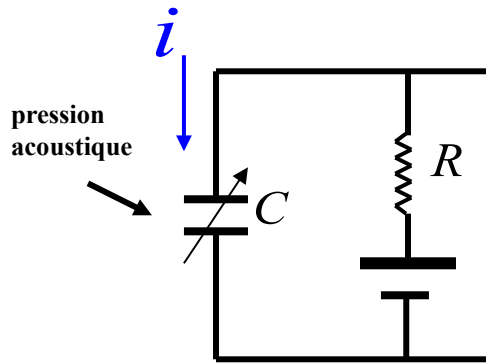
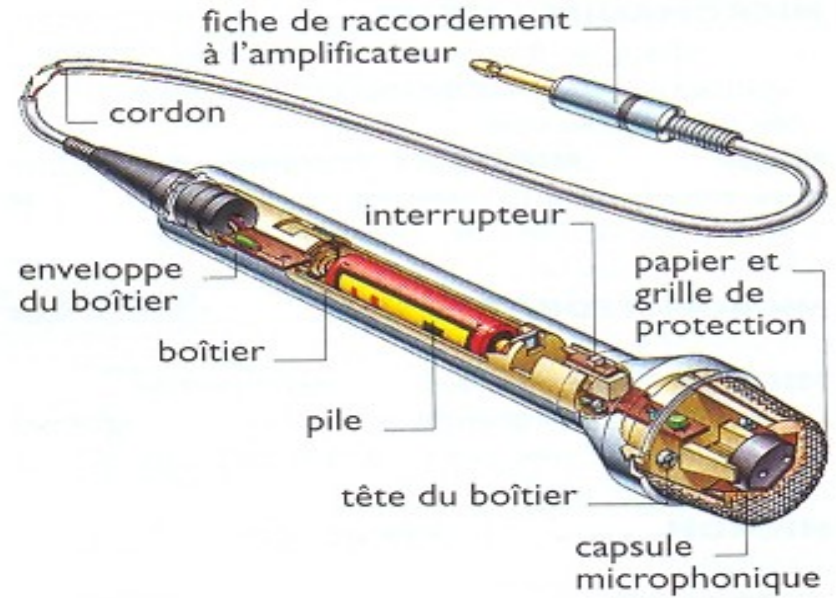
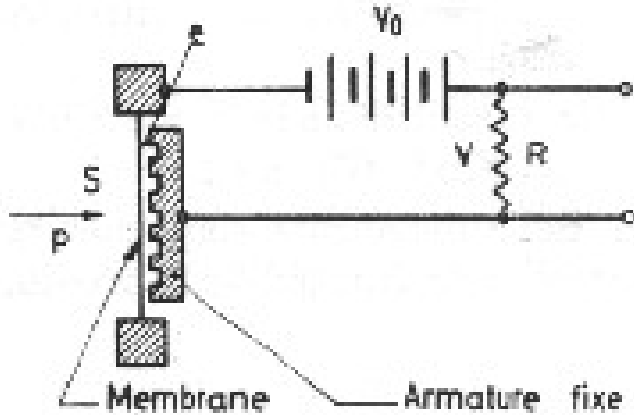


## condensateur plan

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  $Q = Q_0 + q$

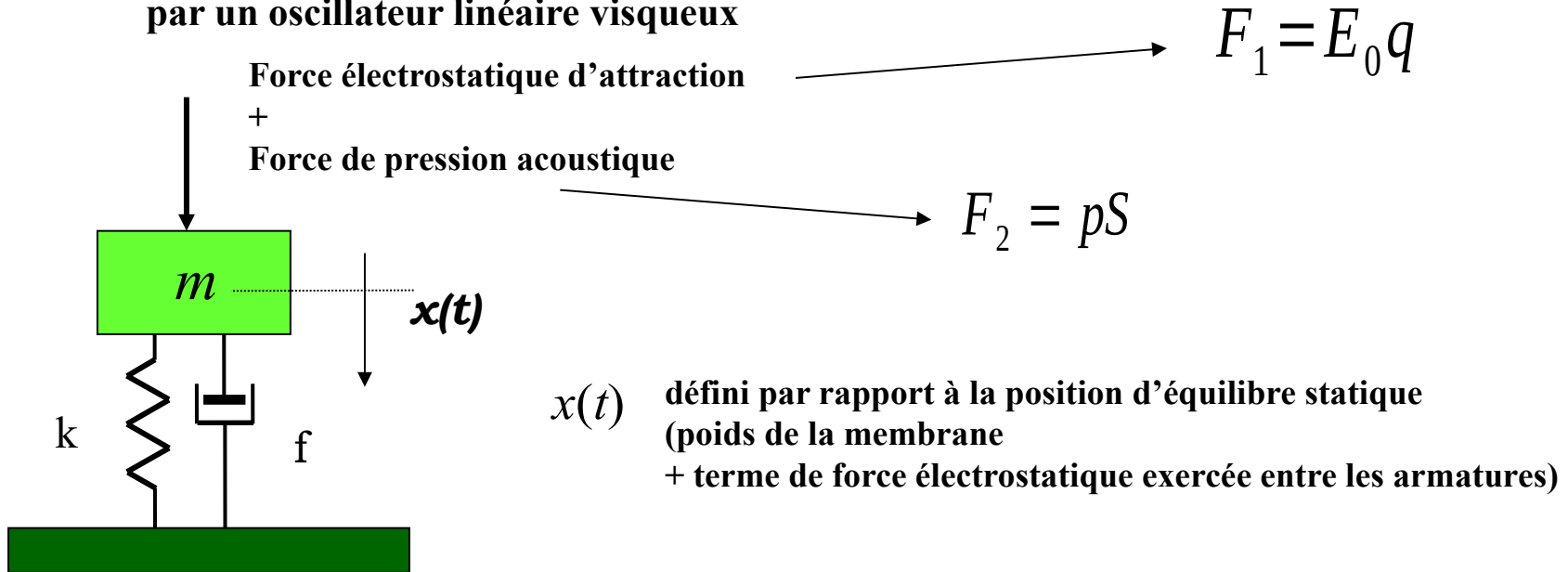
$$q = \int i dt$$

*équation électrique du transducteur*

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

## Equation mécanique de la membrane

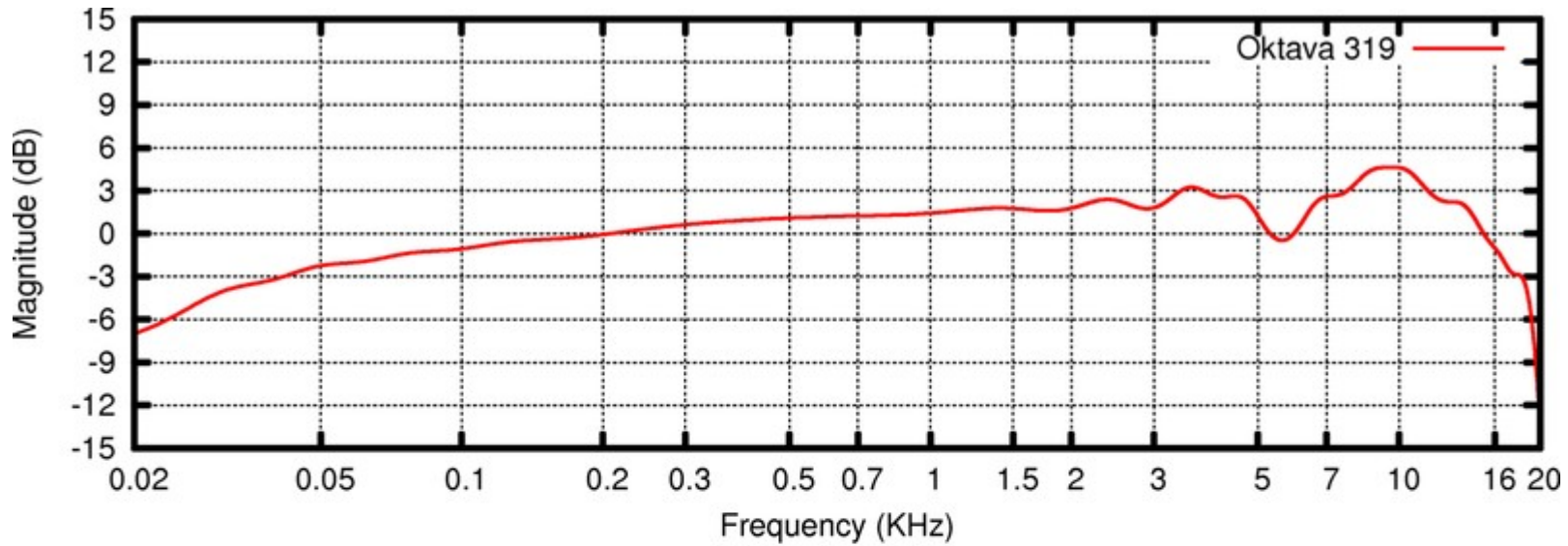
comportement de la membrane modélisé  
par un oscillateur linéaire visqueux



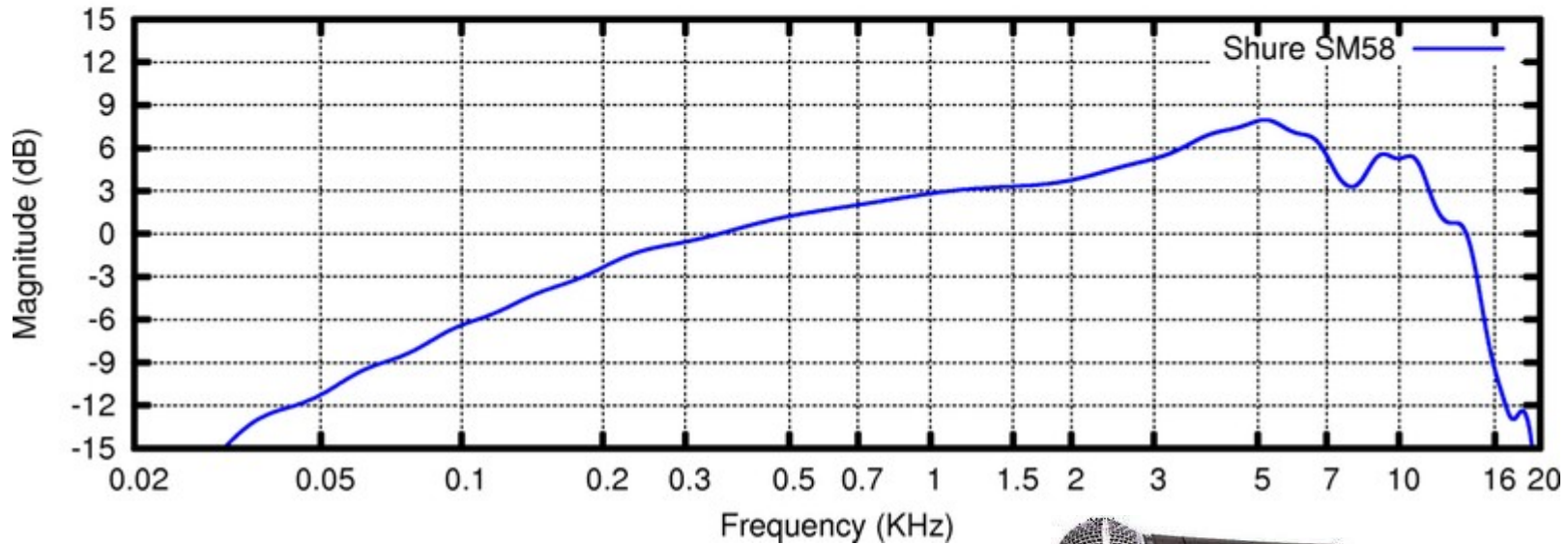
$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F_1 + F_2 = E_0 q + pS$$

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

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



Oktava 319  
(microphone  
à condensateur)

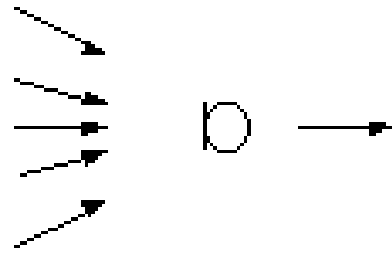


Shure SM58  
(microphone dynamique)



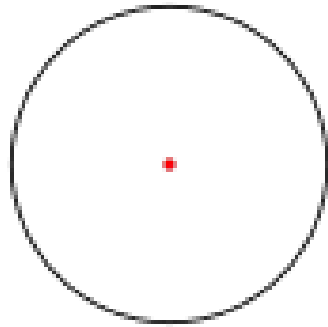
# Directivité d'un microphone

Provenances  
diverses des sons

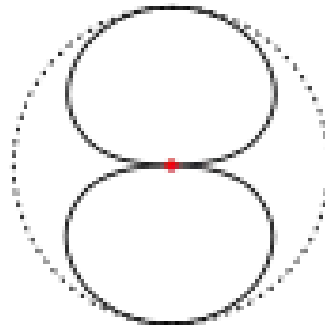


Tension de sortie

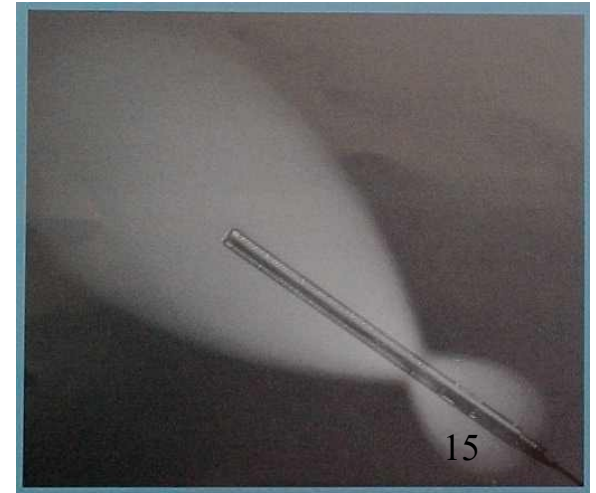
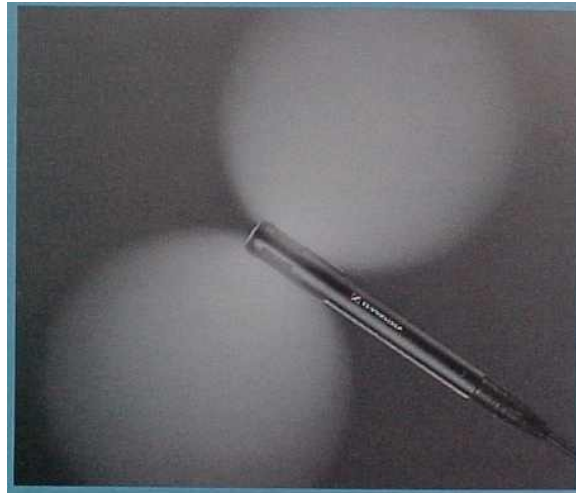
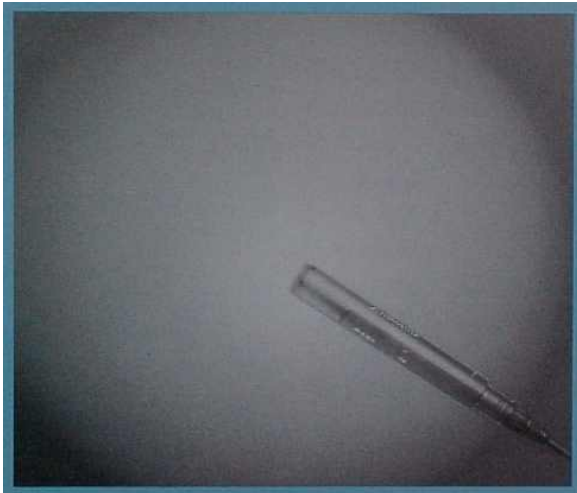
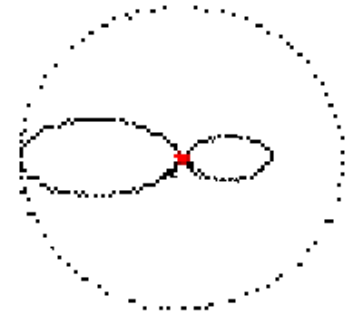
**Omnidirectionnel**



**Bi-directionnel**

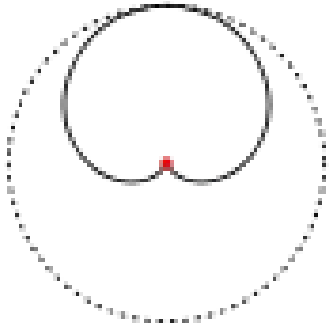


**Uni-directionnel**

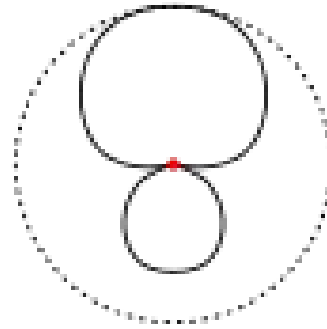


# Autres diagrammes de directivités

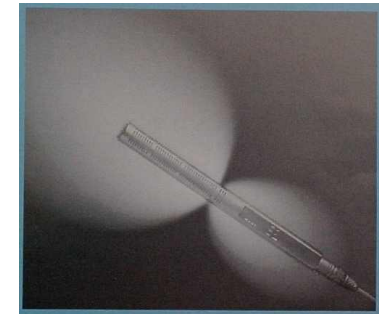
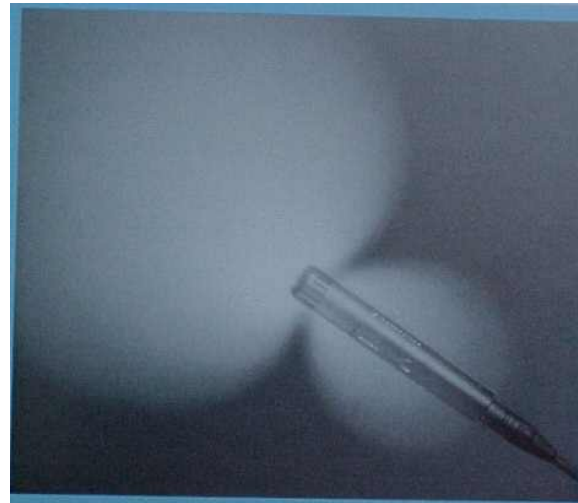
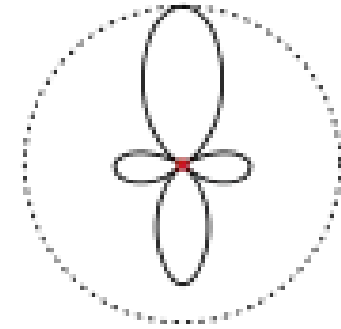
**Cardioïde**



**Hypercardioïde**



**Canon**



**Cardioïde – lobe court**



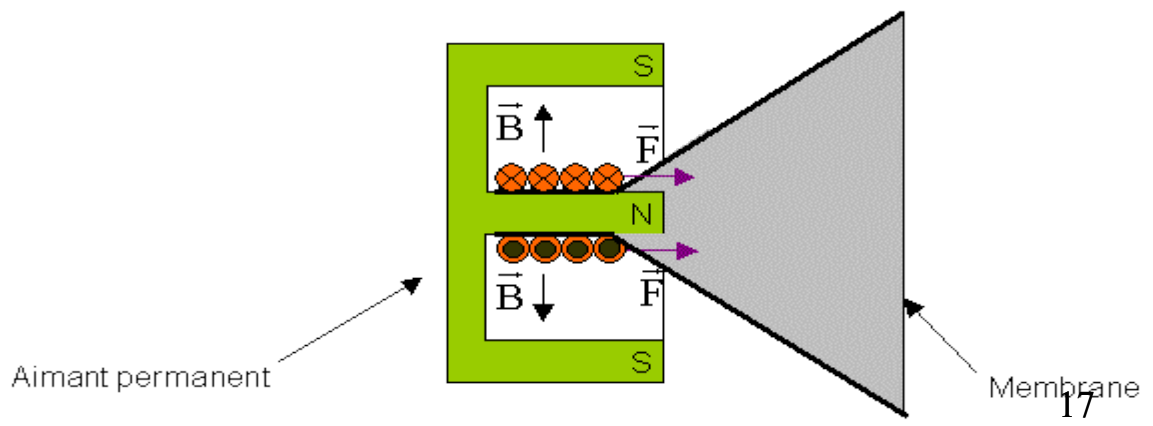
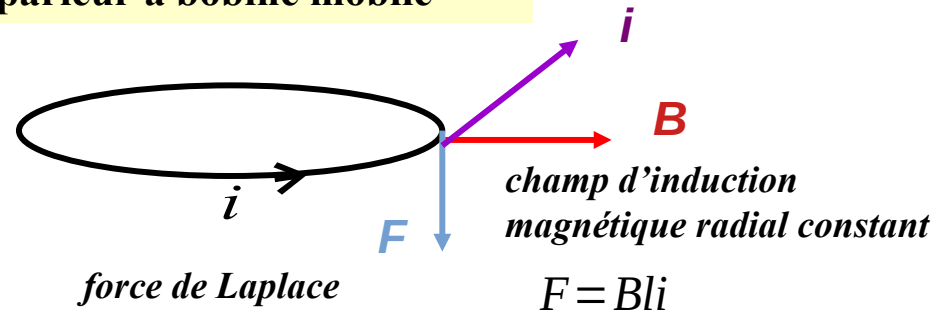
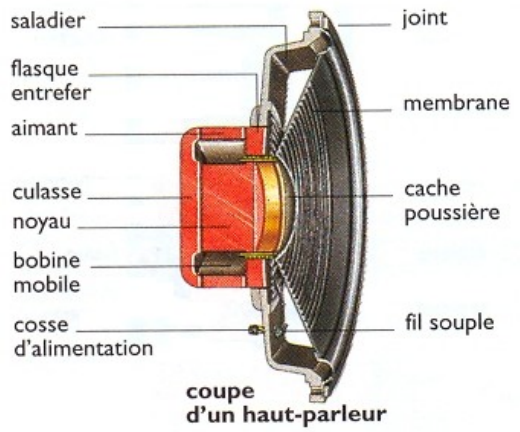
# Le haut-parleur

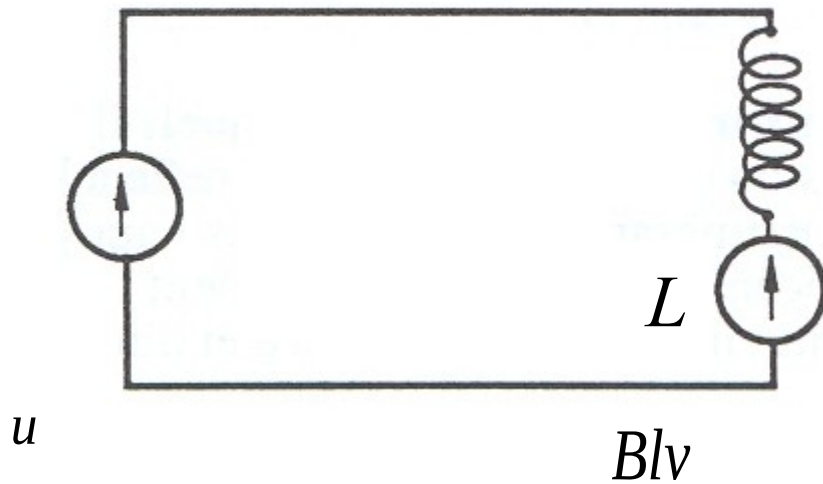
transducteur électro-acoustique  
(de sortie)

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*

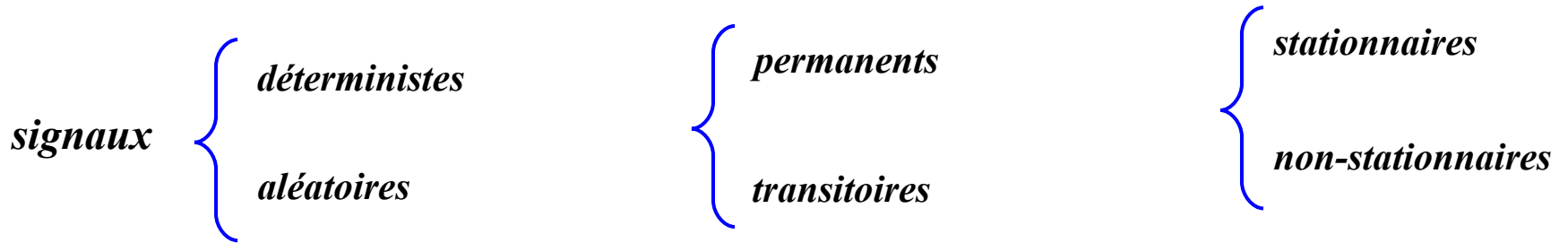
*développement  
en séries de Fourier  
transformation de Fourier*

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*

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

{

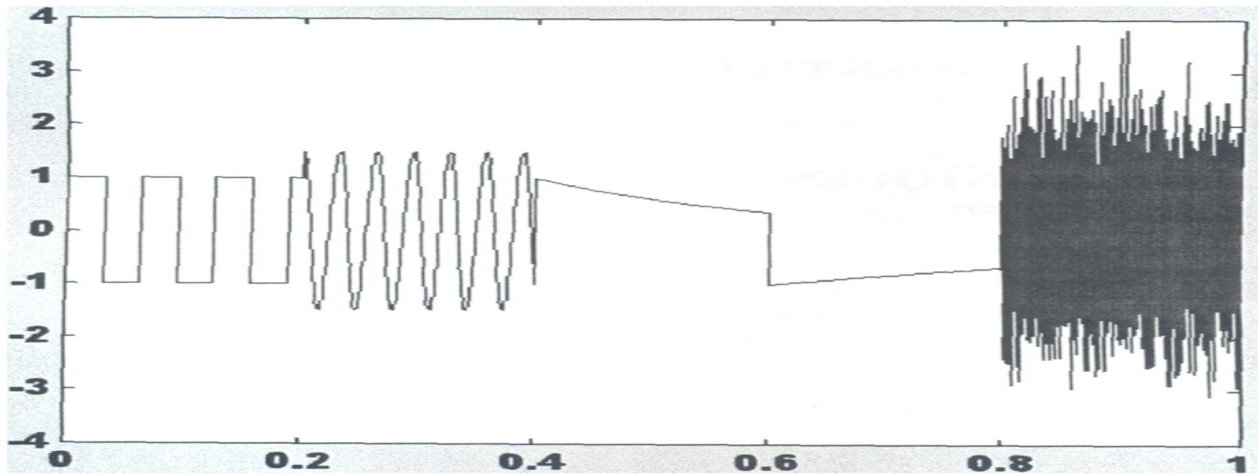
*signaux continus*  
*signaux discrets*


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

# 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*

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

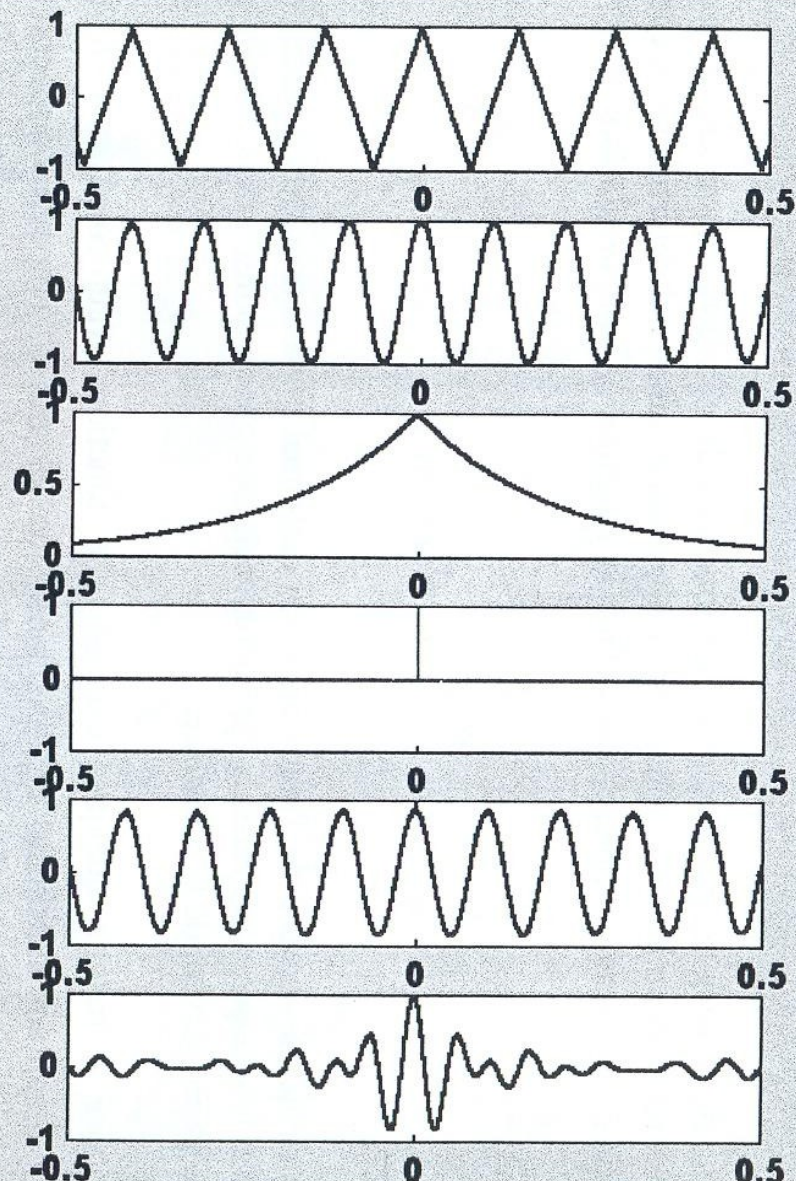
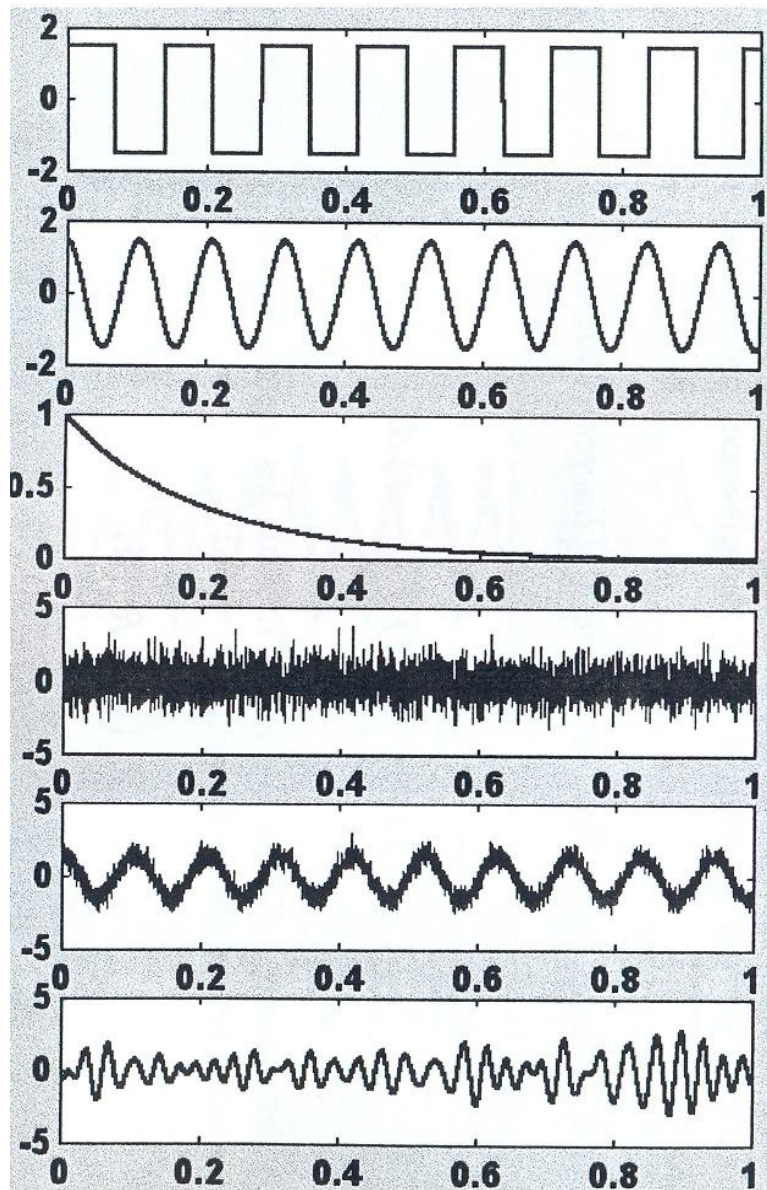
$$R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} x(t) \overline{x(t-\tau)} dt$$



# Signaux usuels et leurs fonctions d'autocorrélation respectives normalisées

DOMAINE TEMPOREL  $x(t)$

AUTOCORRELATION  $R_{xx}(\tau)$



temps

retard

*$x(t)$  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*

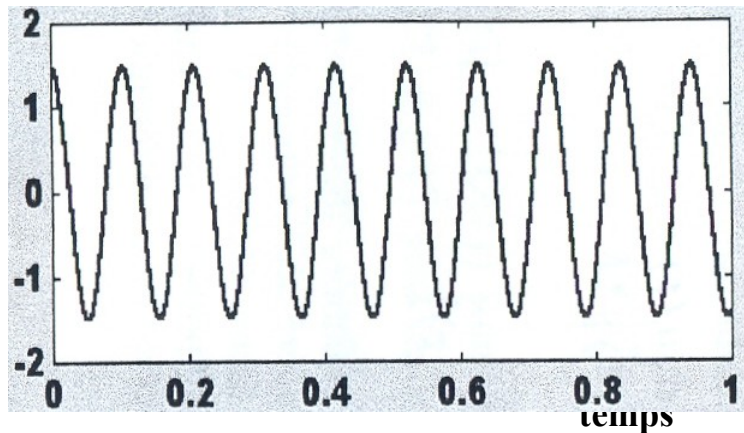
$$\lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} |x(t)|^2 dt < +\infty$$

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

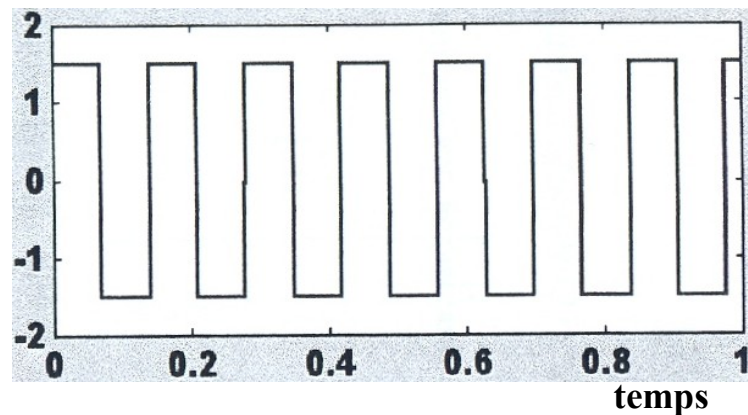
$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} x(t) \overline{y(t-\tau)} dt$$

# Signaux et fonctions d'intercorrélation respectives (normalisées)

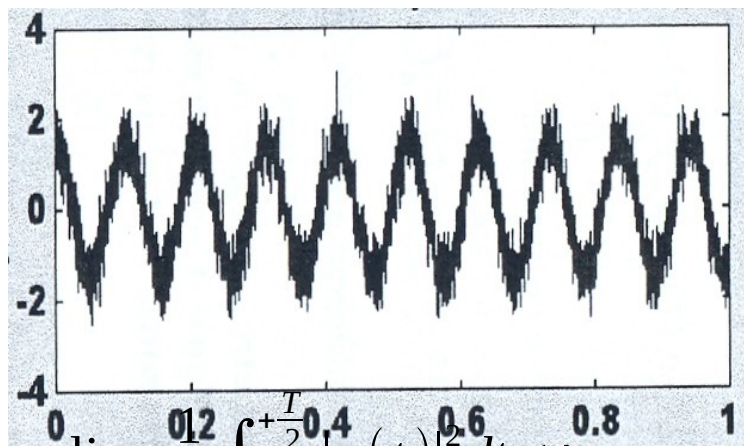
$x(t)$



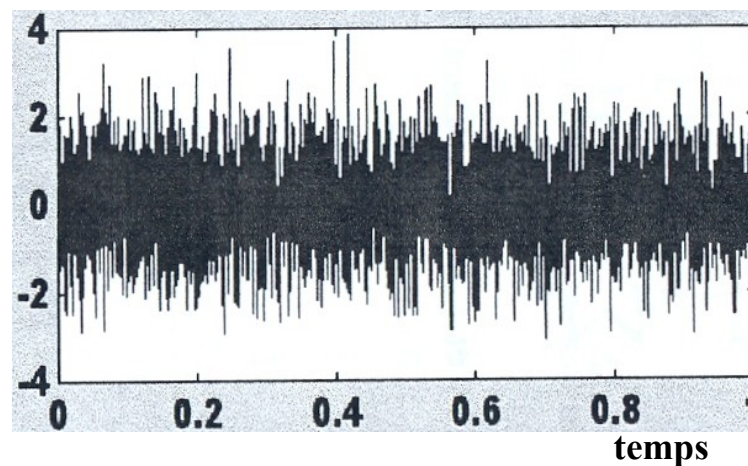
$x(t)$



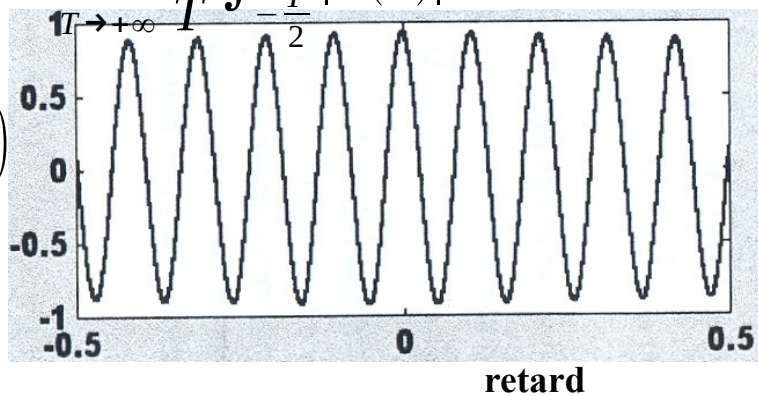
$y(t)$



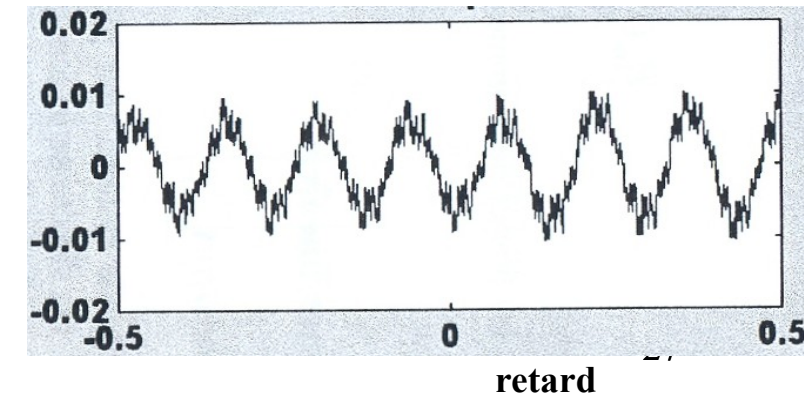
$y(t)$



$R_{xy}(\tau)$



$R_{xy}(\tau)$

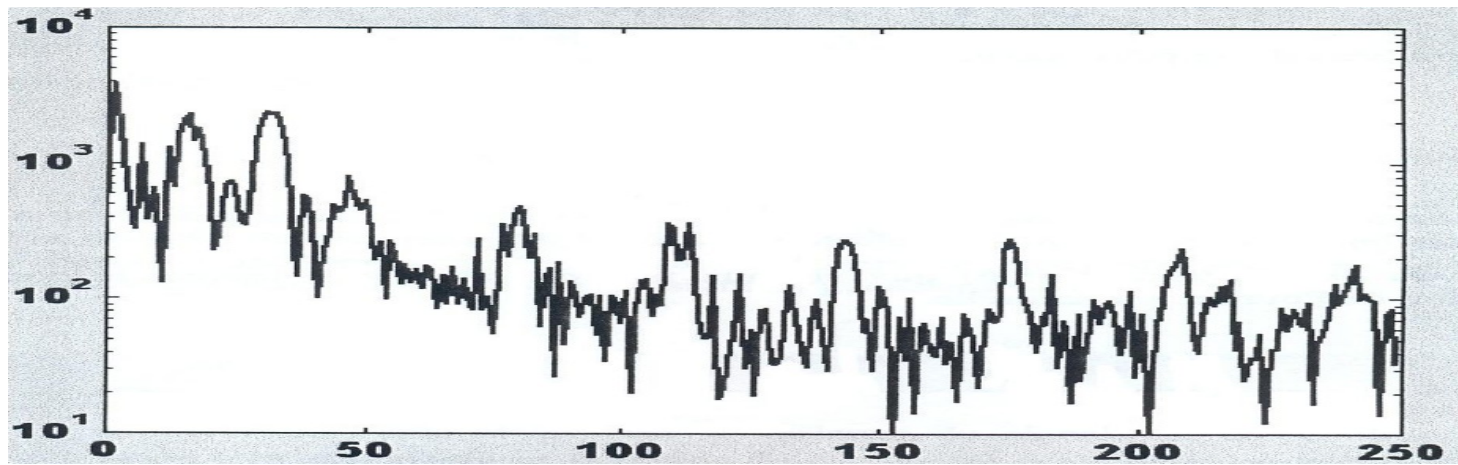


$$\lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} |x(t)|^2 dt < +\infty$$

# 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*

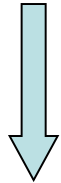
$$\hat{y}(v) = \int_{-\infty}^{+\infty} y(t) e^{-2i\pi vt} dt$$

**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

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

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

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

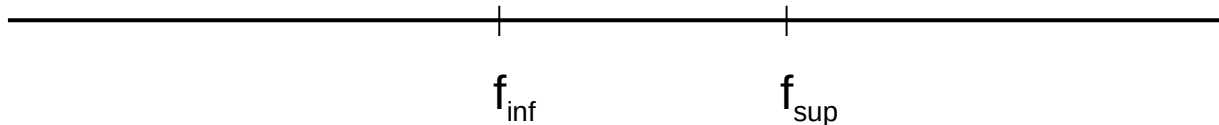
$$\text{Puissance spectrale } S \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} |x_i(\omega)|^2$$

# Analyse spectrale

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

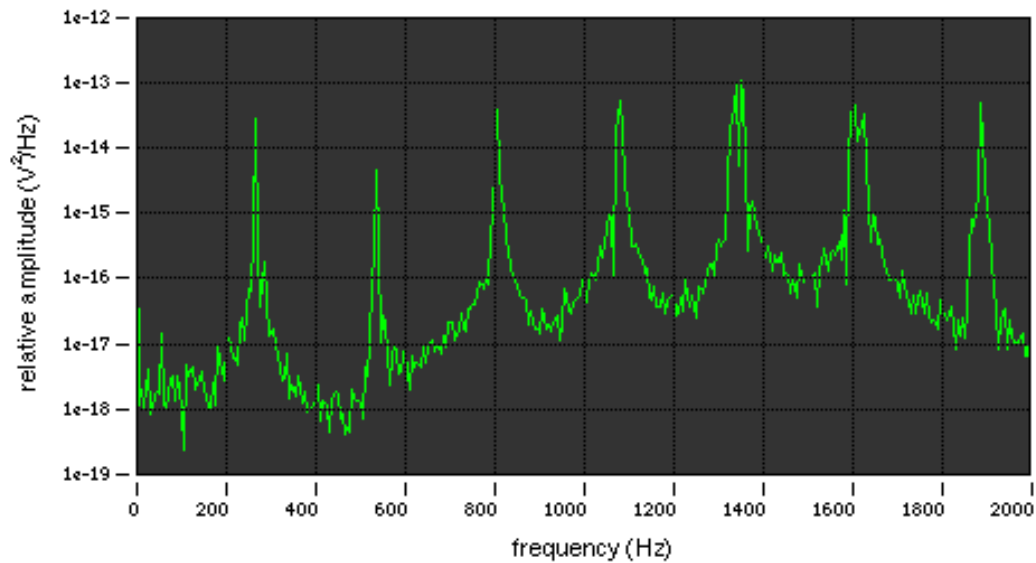
- Analyse par octave  $f_{sup} = 2 f_{inf}$

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

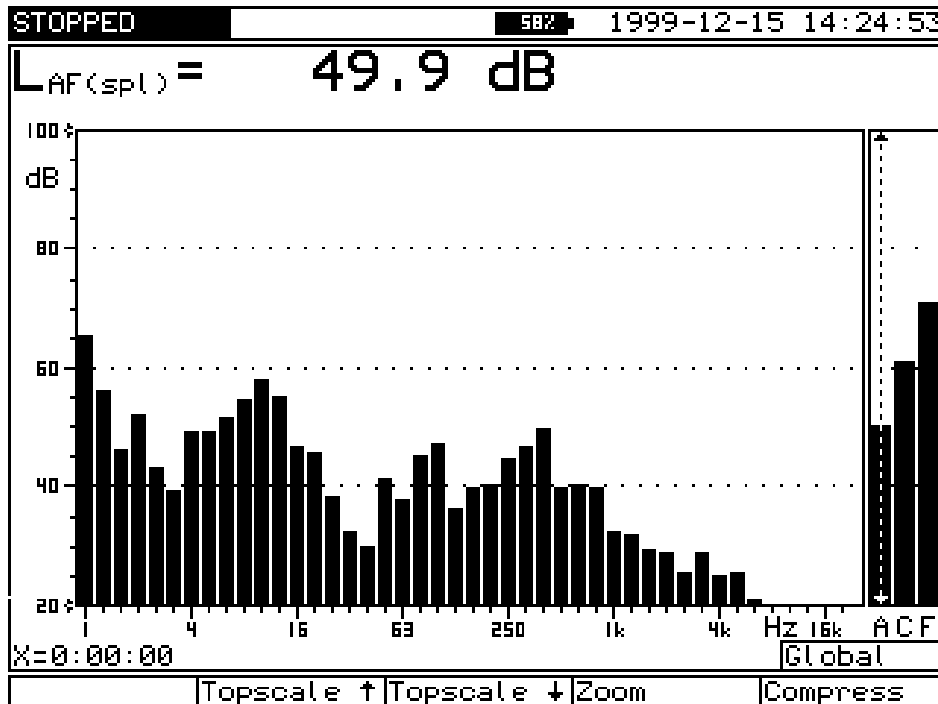




bande	Octave			1/3 Octave		
	Limite inf	Centre	Limite sup	Limite inf	Centre	Limite sup
12	11	<b>16</b>	22	14,1	<b>16</b>	17,8
13				17,8	<b>20</b>	22,4
14				22,4	<b>25</b>	28,2
15	22	<b>31,5</b>	44	28,2	<b>31,5</b>	35,5
16				35,5	<b>40</b>	44,7
17				44,7	<b>50</b>	56,2
18	44	<b>63</b>	88	56,2	<b>63</b>	70,8
19				70,8	<b>80</b>	89,1
20				89,1	<b>100</b>	112
21	88	<b>125</b>	177	112	<b>125</b>	141
22				141	<b>160</b>	178
23				178	<b>200</b>	224
24	177	<b>250</b>	355	224	<b>250</b>	282
25				282	<b>315</b>	355
26				355	<b>400</b>	447
27	355	<b>500</b>	710	447	<b>500</b>	562
28				562	<b>630</b>	708
29				708	<b>800</b>	891
30	710	<b>1000</b>	1420	891	<b>1000</b>	1122
31				1122	<b>1250</b>	1413
32				1413	<b>1600</b>	1778
33	1420	<b>2000</b>	2840	1778	<b>2000</b>	2239
34				2239	<b>2500</b>	2818
35				2818	<b>3150</b>	3548
36	2840	<b>4000</b>	5680	3548	<b>4000</b>	4467
37				4467	<b>5000</b>	5623
38				5623	<b>6300</b>	7079
39	5680	<b>8000</b>	11360	7079	<b>8000</b>	8913
40				8913	<b>10000</b>	11220
41				11220	<b>12500</b>	14130
42	11360	<b>16000</b>	22720	14130	<b>16000</b>	17780
43				17780	<b>20000</b>	22390



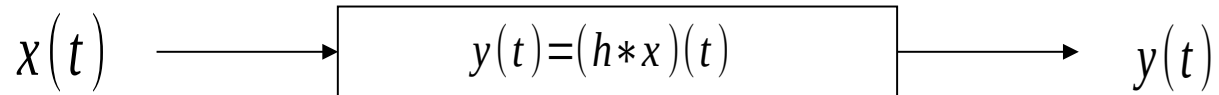
Bande fine



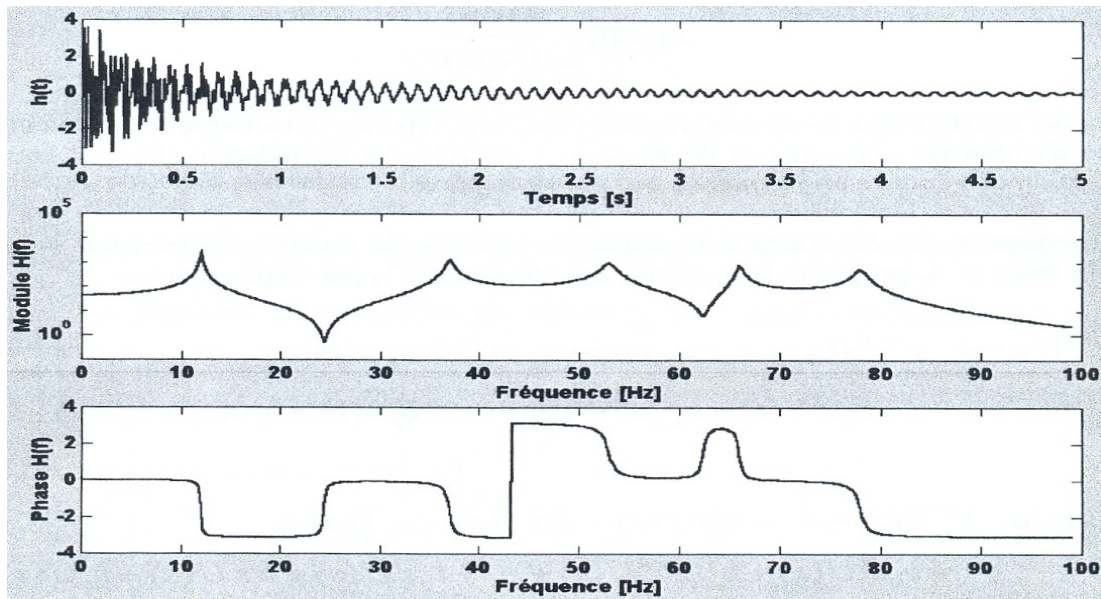
Tiers d'octave

# 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

$$x_n = x(nT_e)$$

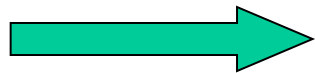
$$y_n = y(nT_e)$$

$T_e$  est la période d'échantillonnage

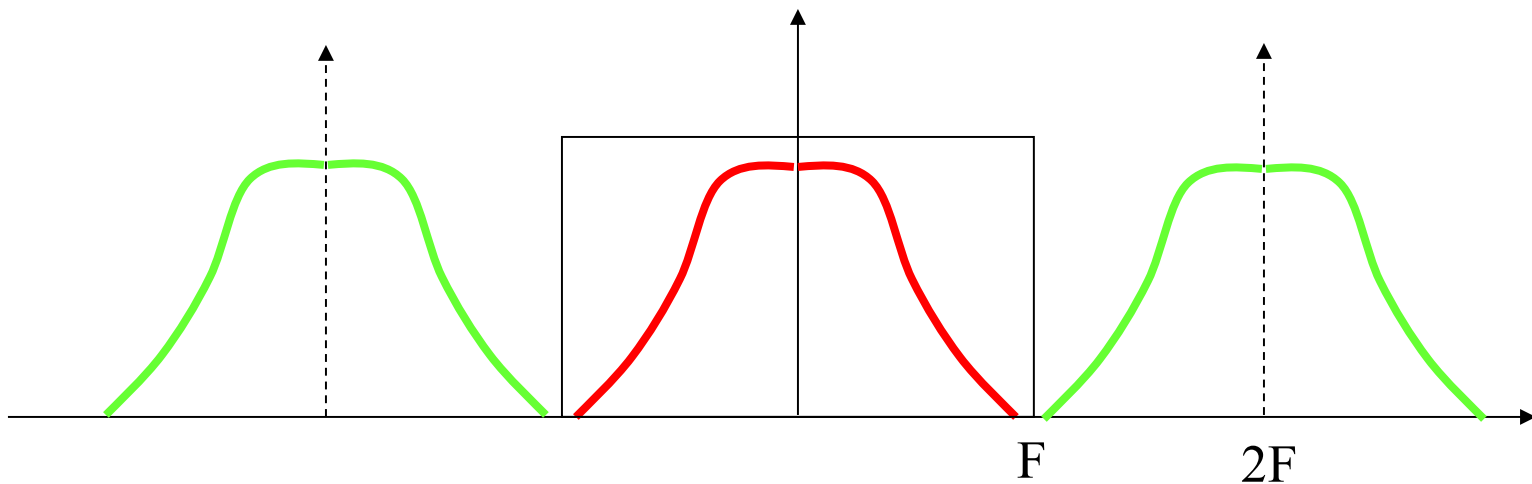
$$y(t) = \int_0^{+\infty} h(\tau) x(t - \tau) d\tau$$

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

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  $x_i$

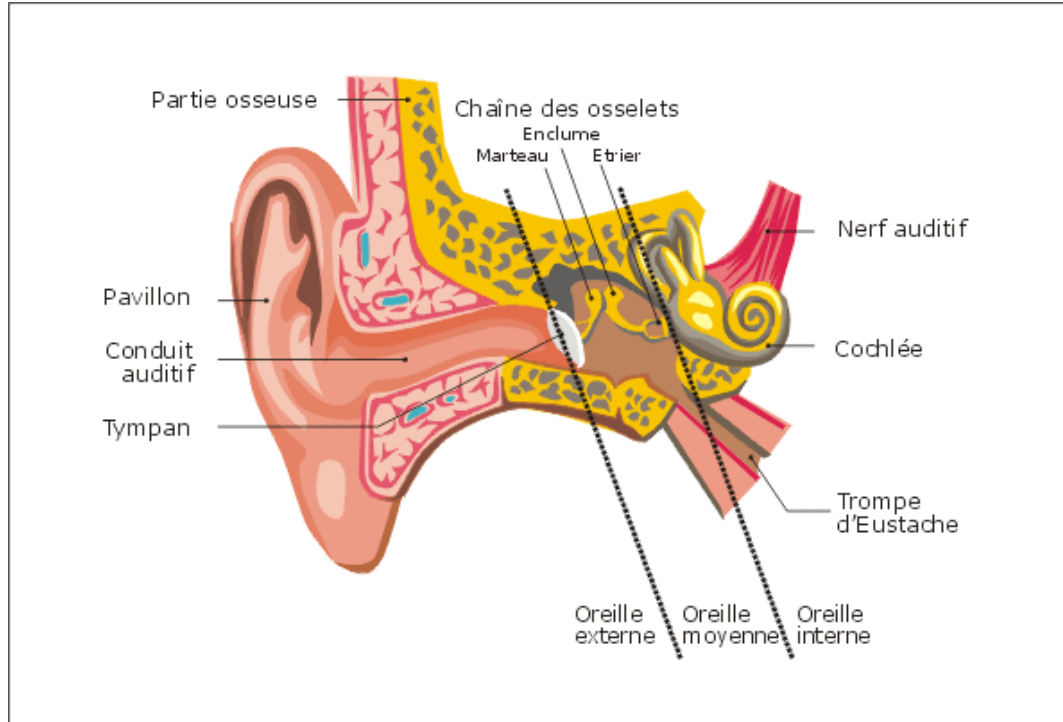
# 3. Perception du son



# 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

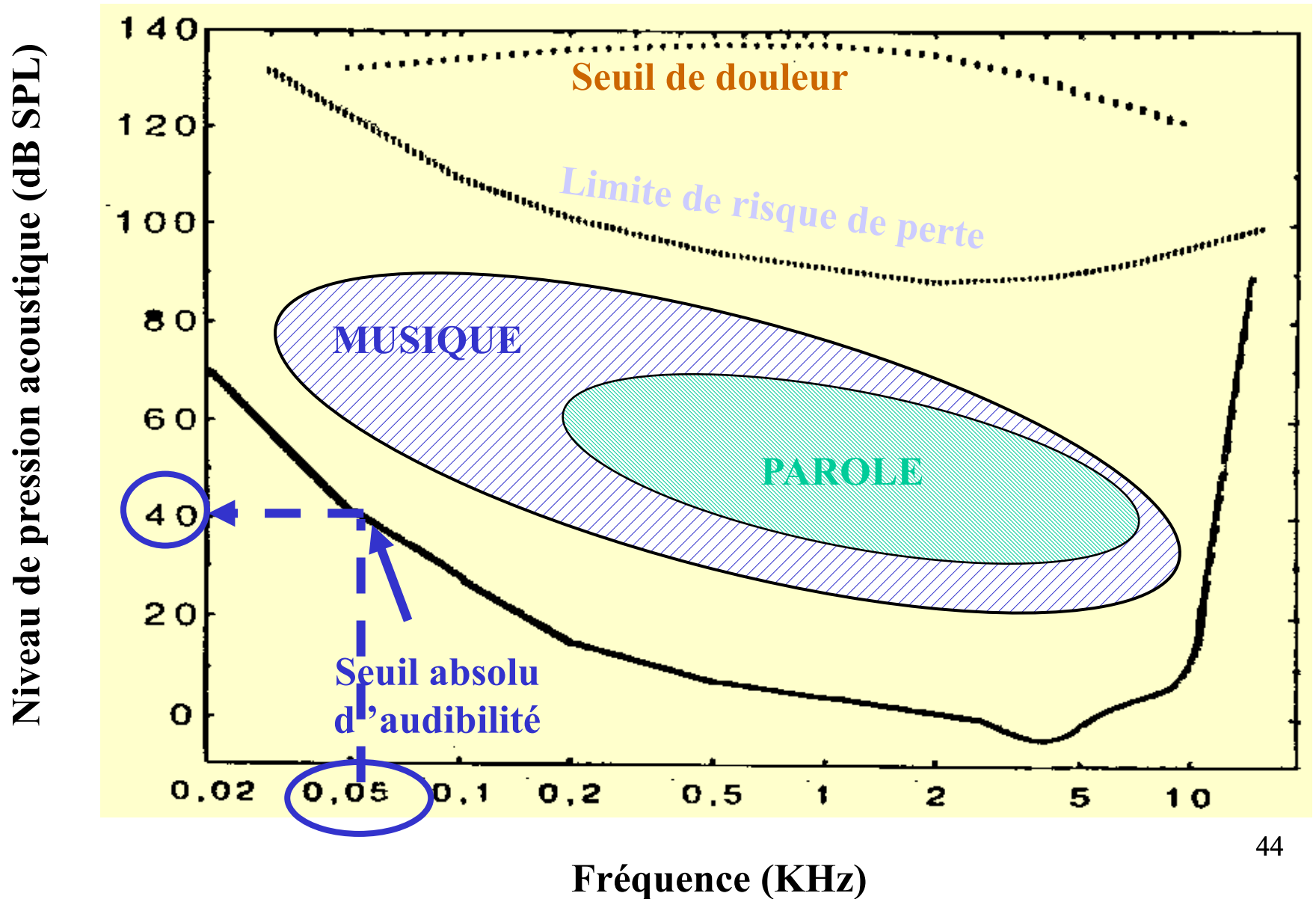


- Oreille externe : collecte du son
- Oreille moyenne: Transfert mécanique
- Oreille interne (Cochlée):
  - Transformation des vibrations mécaniques en impulsions nerveuses
- Système nerveux, cerveau
  - Sensation : fréquence, amplitude
  - Synthèse droite-gauche
  - Identification du son (danger, musique,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

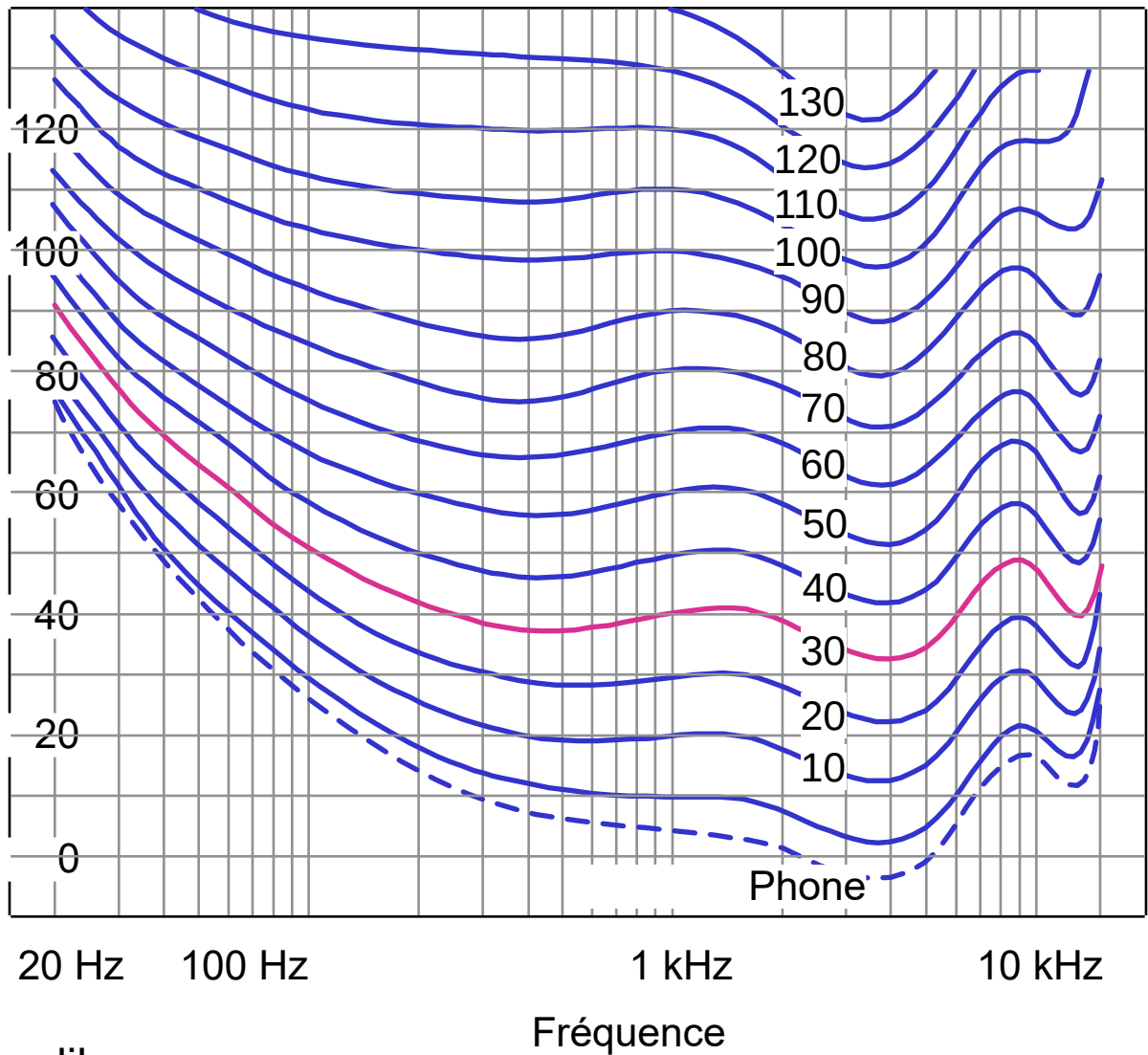


# Perception des niveaux sonores

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

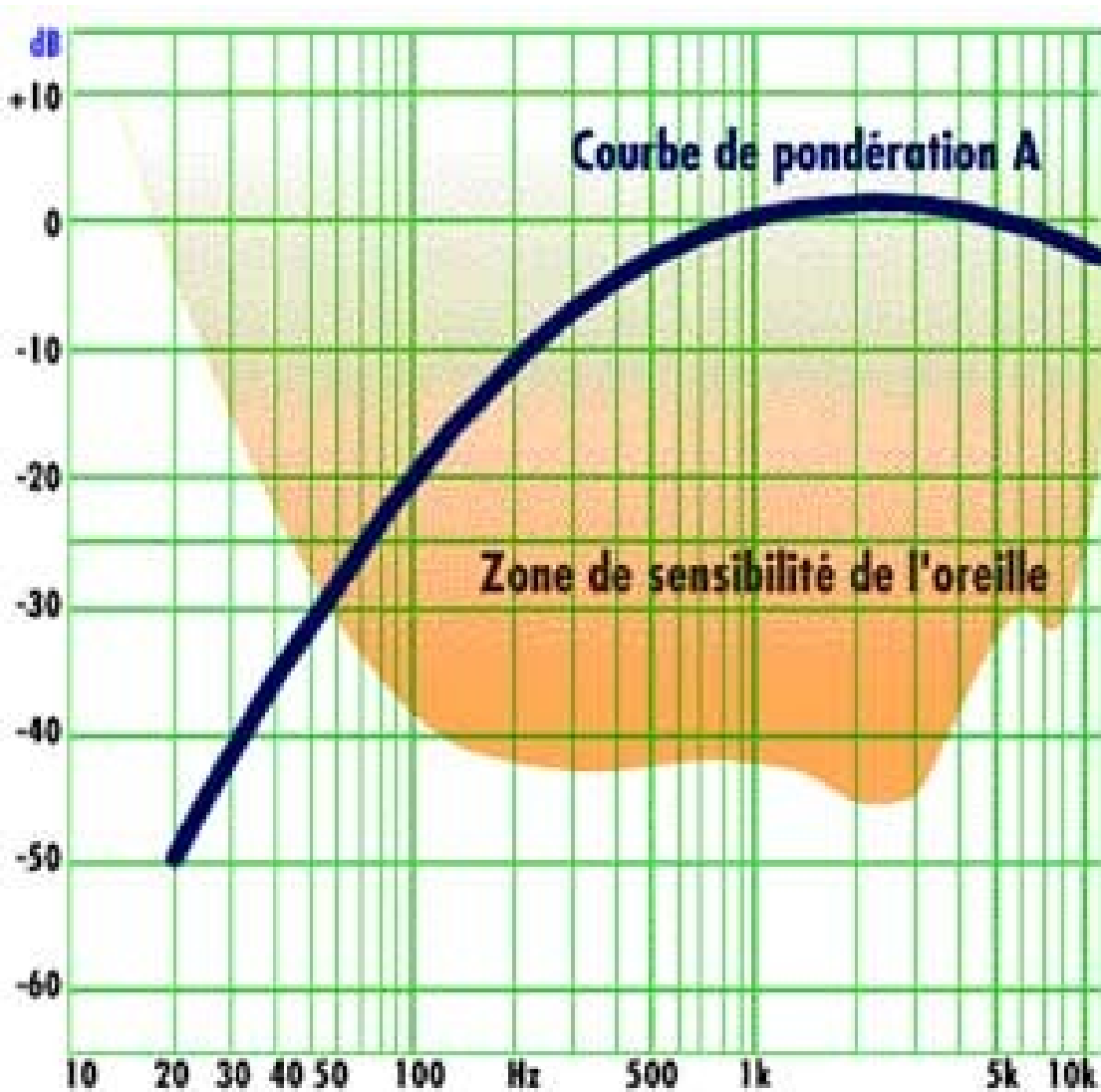
# Courbes isosoniques

Niveau  
Sonore,  $L_p$   
(dB re  $20\mu$  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

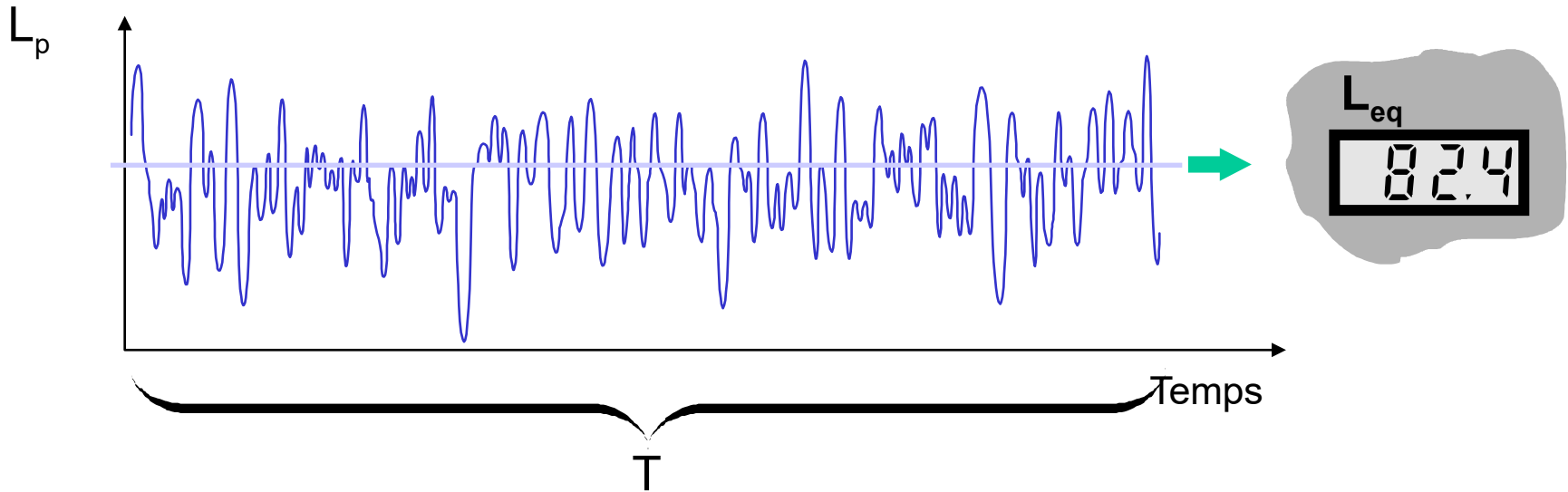
# Indicateurs et gène



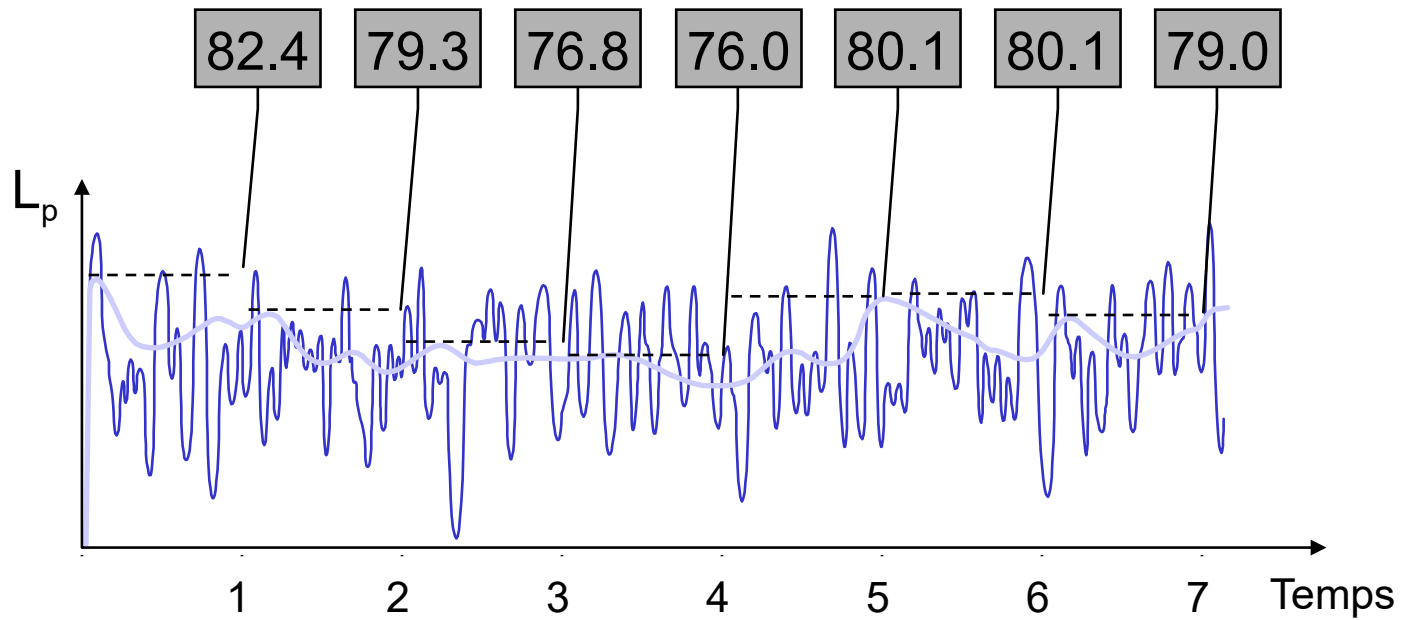
# Niveau sonore équivalent, $L_{eq}$

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

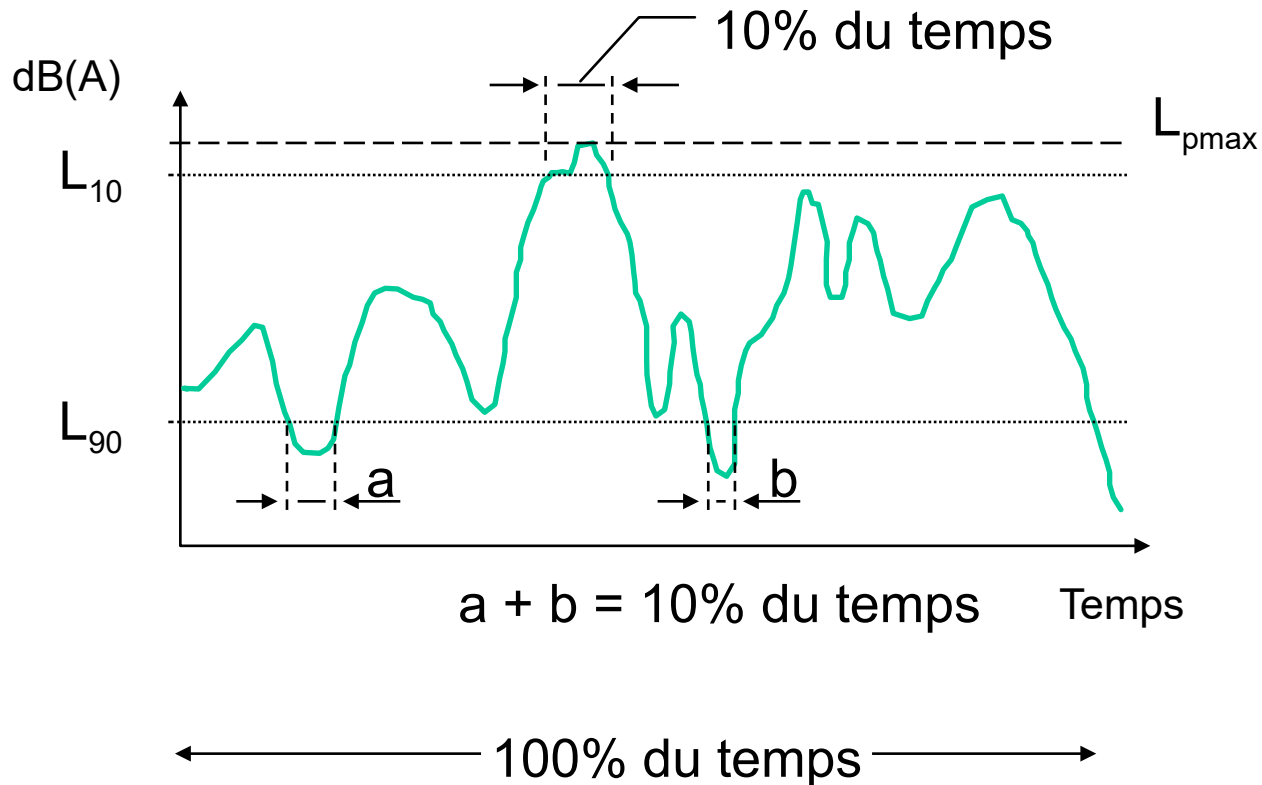
En général  $p(t)$  mesuré en dBA



# Moyenne sur temps court



# Niveaux en pourcentage du temps, $L_N$



# Bruit impulsionnel

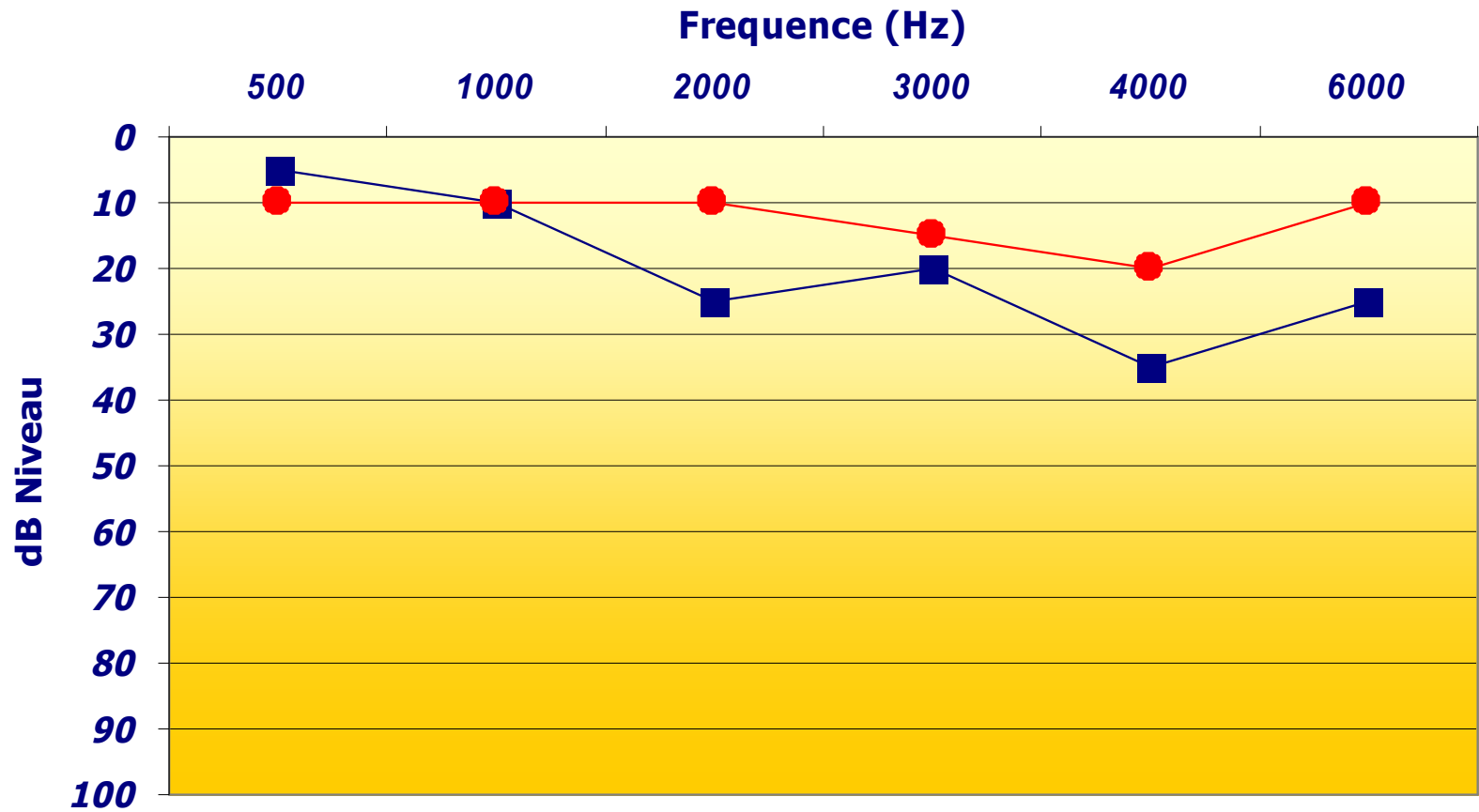
- Augmentation de + de 40 dB en moins de 0.5s
- L'oreille peut supporter 130dBA pendant plus de 2mn
- Limite de sécurité à 140dB

# La gêne

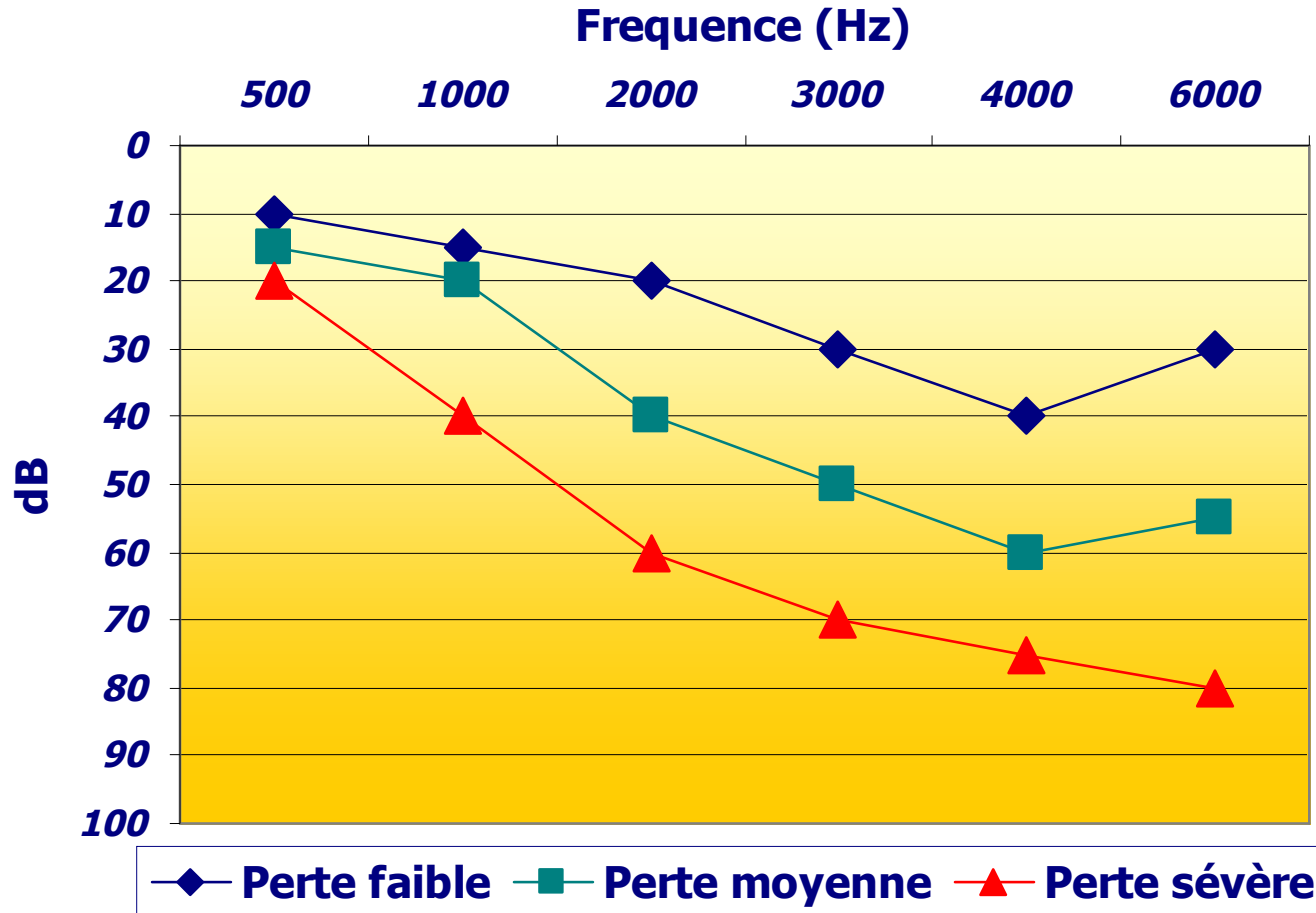
- Notion complexe
  - caractéristiques physiques du bruit
  - aspects physiologiques
  - aspects psychologiques
  - facteurs sociologiques
  - facteurs contextuels
- Problème : relier le sentiment de gêne aux valeurs physiques
- + ou – corrélée aux indicateurs

# Dangers et réglementation

# Audiogrammes

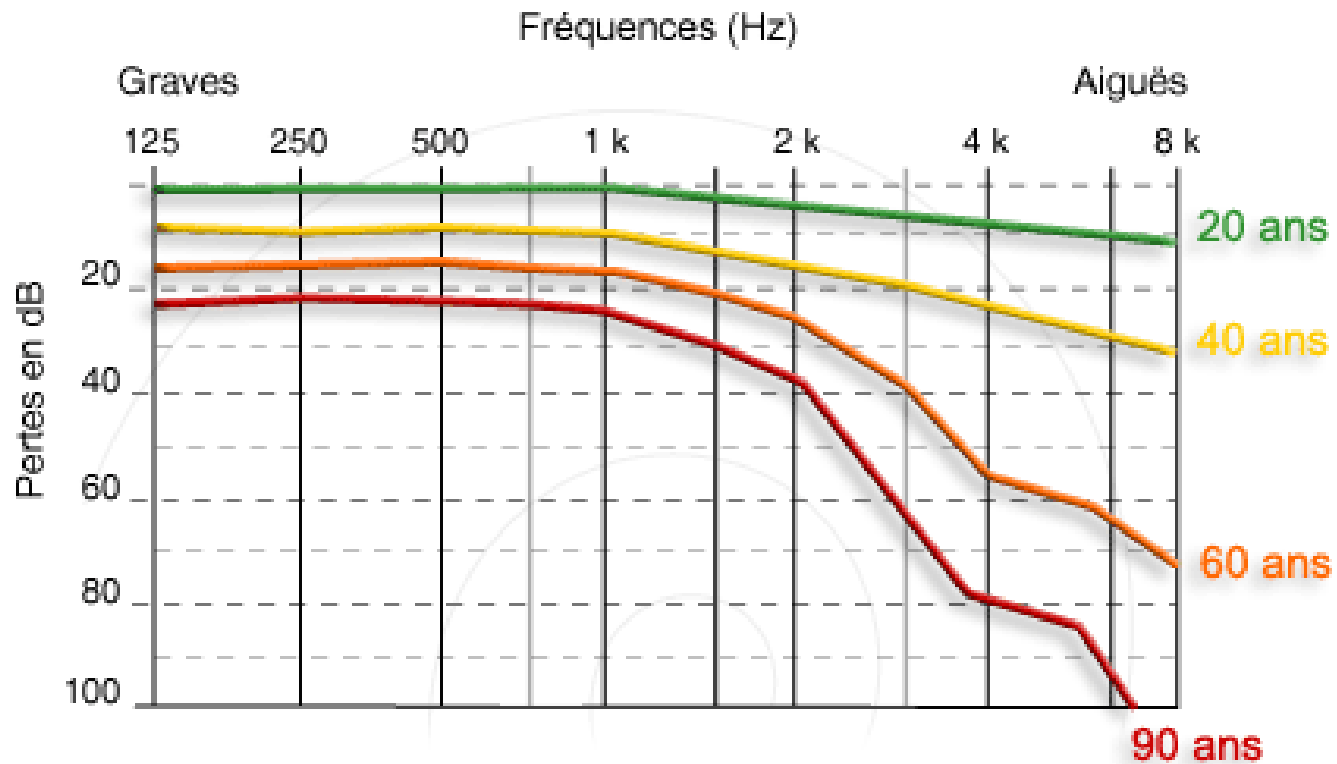


# Dommmages auditifs





# Perte avec l'âge



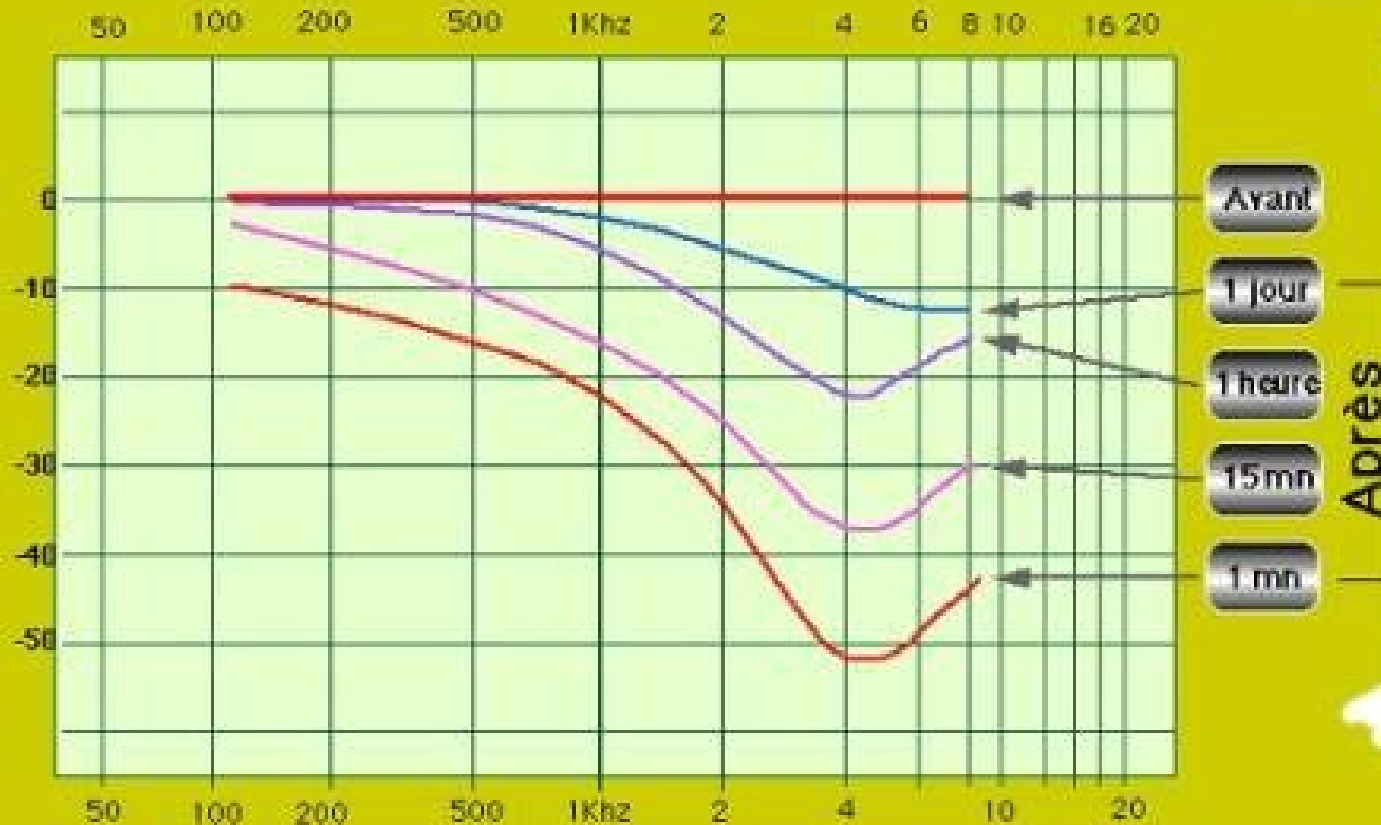
# Effets des pertes d'audition

- 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