

L'information : A – La Voix



EFREI L1

2015 – 2016



1. Notion d'Onde

a) Généralités

- ⇒ **Onde** : transmission d'un signal (*ie.* d'énergie) d'un point à un autre sans transport de matière
- ⇒ **Types d'ondes** :
 - ⇒ matérielle / immatérielle 
 - ⇒ scalaire / vectorielle
 - ⇒ transversale / longitudinale / de surface 
- ⇒ **Représentation mathématique** :
 - Dépend de l'espace
 - Dépend du temps
 - ⇒ fonction(s) de 4 variables :
 - $f(x, y, z, t)$
 - $\mathbf{E}(x, y, z, t) = \{E_x, E_y, E_z\}$

⇒ **Onde plane : une seule coordonnées d'espace**

⇒ **direction de propagation**

⇒ par exemple : (Ox)

⇒ Onde scalaire plane : $f(x, t)$

⇒ Onde vectorielle plane : $\{ E_x(x, t), E_y(x, t), E_z(x, t) \}$

⇒ Onde plane longitudinale : $E_x(x, t)$,

⇒ Onde plane transversale : $\{ E_y(x, t), E_z(x, t) \}$

b) Ondes Mécaniques

⇒ **Signal : déplacement local des molécules**

⇒ Vibrations autour d'une position d'équilibre fixe

⇒ Déplacement macroscopique de l'onde

⇒ **Exemples :**

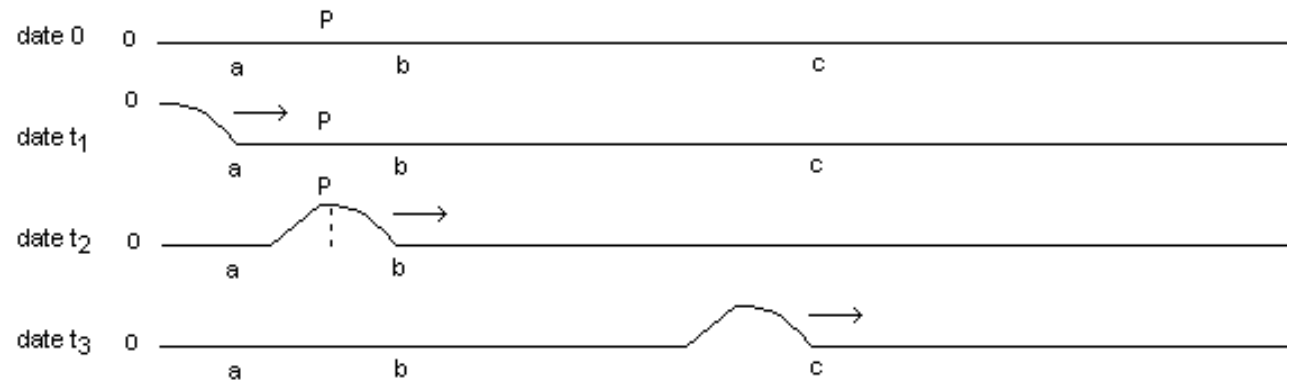
⇒ Corde vibrante (transversale)

⇒ Compression d'un ressort (longitudinale)

⇒ Ondes de surface

⇒ Ondes élastiques

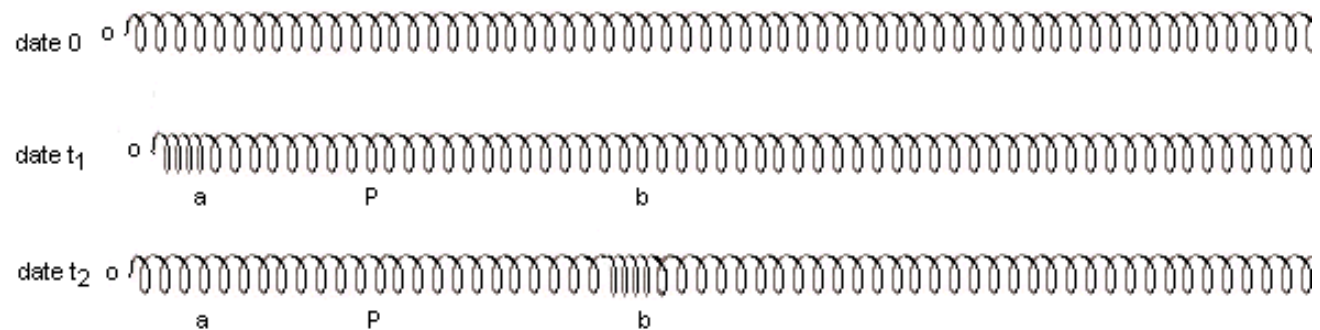
⇒ Corde vibrante (transversale)



Chaque point P de la corde se soulève **verticalement**. Le signal se propage **horizontalement**. Il est **transversal**.

La **vitesse** de propagation est $v = \frac{ab}{t_2 - t_1} = \frac{bc}{t_3 - t_2}$

⇒ Compression d'un ressort (longitudinale)

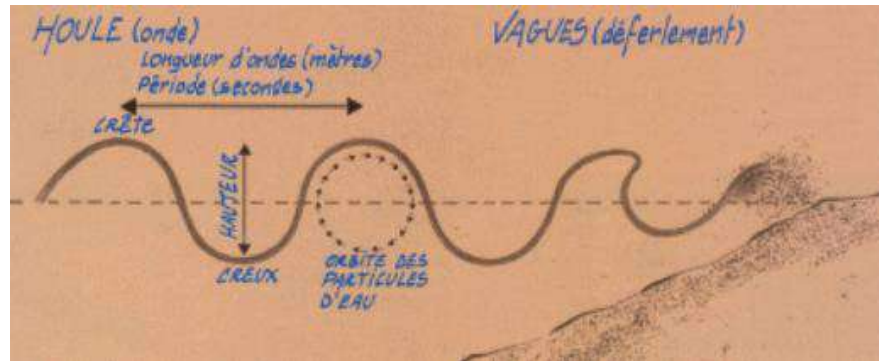
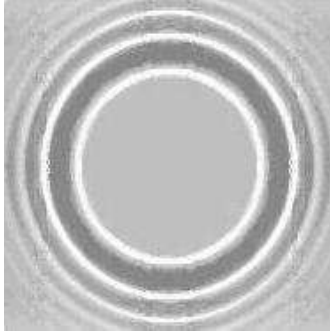


Chaque point P du ressort se déplace **horizontalement**. La perturbation se déplace également **horizontalement**.

L'onde est **longitudinale**.

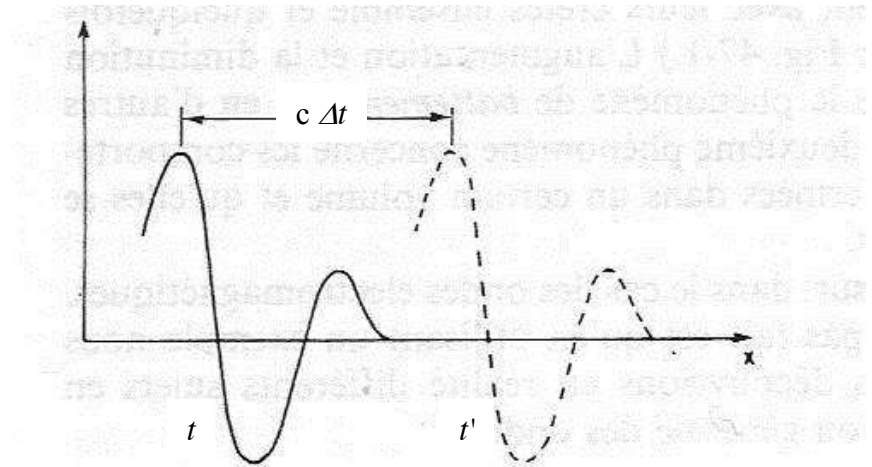
La **vitesse** de propagation est $v = \frac{ab}{t_2 - t_1}$

⇒ Ondes de surface



c) Onde progressive

- ⇒ Onde qui se déplace sans se déformer
- ⇒ Caractérisé par sa vitesse de propagation ou **célérité** : c (en m.s^{-1})
- ⇒ **Onde plane progressive** :



- ⇒ Amplitude constante si :

$$\Delta x = c \Delta t$$

$$(x' - x) = c (t' - t)$$

$$x' - c t' = x - c t \quad \forall x, x', t, t'$$

⇒ la quantité $(x - c t)$ est conservée et caractérise l'amplitude de l'onde

- ⇒ $f(x, t) = f(x - ct)$

- ⇒ Généralisation à une onde plane quelconque : $f(\mathbf{OM}) = f(\mathbf{OM} \cdot \mathbf{u} - c t)$

d) Onde harmonique (ou sinusoïdale)

⇒ **Fonction sinusoïdale du temps**

⇒ caractérisé par :

↪ Période T

↪ Fréquence f

↪ Pulsation ω

⇒ **Onde plane progressive harmonique :**

⇒ $f(x - ct)$

⇒ Fonction sinusoïdale du temps et de l'espace

$$f(x, t) = f(x - ct) = g(t - x/c) = A \cdot \cos(\omega(t - x/c) + \varphi) = A \cdot \cos(\omega t - kx + \varphi)$$

$$\begin{aligned} f(x, t) &= A \cdot \cos(\omega t - kx + \varphi) \\ &= B \cdot \sin(\omega t - kx + \psi) \\ &= C \cdot \cos(\omega t - kx) + D \cdot \sin(\omega t - kx) \end{aligned}$$



⇒ **Double périodicité :**

✓ Temporelle			✓ Spatiale		
Période	T	s	Longueur d'onde	λ	m
fréquence	f	Hz	Nombre d'onde	σ	m^{-1}
pulsation	ω	$rad.s^{-1}$	vecteur d'onde	k	$rad.m^{-1}$

⇒ Relation de dispersion :

$$\omega = kc \quad \text{ou} \quad \lambda = cT$$

⇒ **Notation complexe :**

$$\underline{f}(x, t) = \underline{A} \cdot e^{i(\omega t - kx)} \quad \text{avec} \quad \underline{A} = A e^{i\varphi}$$

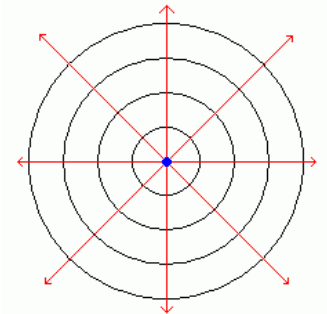
$$f(x, t) = A \cdot \cos(\omega t - kx + \varphi) = \text{Re}(\underline{f})$$

⇒ **Décomposition harmonique :**

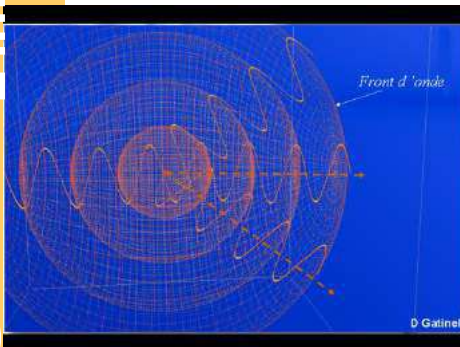
⇒ Toute onde est la superposition d'ondes harmoniques de différentes fréquences

e) Onde sphérique

- ⇒ **Onde progressive non plane : plusieurs directions de propagation**
- ⇒ **Front d'onde : ensemble des points vibrant en phase**
 - ⇒ Onde plane : plans \perp direction de propagation
- ⇒ **Onde sphérique : onde émise par une source ponctuelle de façon isotrope**
 - ⇒ Paramètre d'espace : distance à la source r
 - ⇒ Fronts d'onde : sphères concentriques centrées sur la source
 - ⇒ $f(r, t) = A(r) \cdot g(t - r/c)$
 - $A(r)$: terme d'amplitude ($A(r) = A_0 / r$)
 - $g(t - r/c)$: terme de phase
 - ⇒ Onde sphérique harmonique :



$$f(r, t) = A(r) \cdot \cos(\omega t - kr + \varphi) = \frac{A_0}{r} \cdot \cos(\omega t - kr + \varphi)$$



f) Puissance - Intensité

⇒ Puissance de l'onde : \mathcal{P}

⇒ Puissance totale de l'onde

⇒ Puissance émise par la source

⇒ Unité : Watt

⇒ Vibrations très rapides \Rightarrow valeur moyenne $\langle \mathcal{P} \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \mathcal{P}(t) dt$

⇒ Intensité

⇒ Puissance perçue par unité de surface : $I = \frac{\langle \mathcal{P} \rangle}{S}$

⇒ Unité : W.m^{-2}

⇒ Proportionnel à f^2 $I \propto \langle f^2 \rangle$ Rem : $\langle f^2 \rangle \neq \langle f \rangle^2$!

⇒ Ici signal = pression

$$I \propto \langle p^2 \rangle = p_{\text{eff}}^2 \quad \left(p_{\text{eff}} = \sqrt{\langle p^2 \rangle} \right)$$

⇒ Onde harmonique

$$\begin{aligned} \Rightarrow f(x, t) &= A \cdot \cos(\omega t - kx + \varphi) \Rightarrow f^2(x, t) = A^2 \cdot \cos^2(\omega t - kx + \varphi) \\ &\Rightarrow \langle f^2(x, t) \rangle = A^2 \cdot \langle \cos^2(\omega t - kx + \varphi) \rangle \\ &\Rightarrow \langle f^2(x, t) \rangle = \frac{A^2}{2} \\ &\Rightarrow I \propto A^2 \Rightarrow I = I_0 = \text{cste} \end{aligned}$$

⇒ Onde sphérique

⇒ 2 plans d'onde (r, t) (r', t')

⇒ Énergie conservée :

$$\mathcal{P}(r) = \mathcal{P}(r')$$

$$I(r, t) \cdot S(r) = I(r', t') \cdot S(r')$$

$$I(r, t) \cdot 4\pi r^2 = I(r', t') \cdot 4\pi r'^2$$

$$\langle A^2(r) \cdot \cos^2(\omega t - kr) \rangle \cdot 4\pi r^2 = \langle A^2(r') \cdot \cos^2(\omega t - kr') \rangle \cdot 4\pi r'^2$$

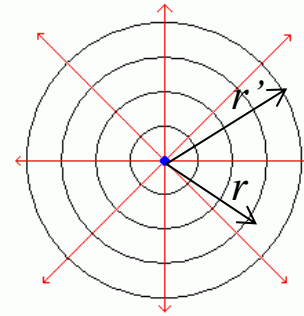
$$\langle A^2(r) \rangle \cdot 2\pi r^2 = \langle A^2(r') \rangle \cdot 2\pi r'^2$$

$$A^2(r) \cdot r^2 = A^2(r') \cdot r'^2$$

$$A(r) = \frac{A(r') \cdot r'}{r} \quad \forall r'$$

$$A(r) \propto \frac{1}{r} \Rightarrow A(r) = \frac{A_0}{r}$$

$$\Rightarrow I(r) \propto \frac{1}{r^2} \Rightarrow I(r) = \frac{I_1}{r^2}$$



⇒ Puissance de la source:

$$\mathcal{P}_S = I(r) \cdot S(r) \Rightarrow \mathcal{P}_S = 4\pi r^2 I(r) \Rightarrow I(r) = \frac{\mathcal{P}_S}{4\pi r^2}$$

2. Onde acoustique – Onde sonore

- ⇒ **Onde acoustique**
 - ⇒ Onde mécanique
 - ⇒ Signal : variation de pression

a) Pression

- ⇒ **Fluide** : milieu constitué de particules pouvant se déplacer librement
- ⇒ **Agitation thermique** : mouvements désordonnés des molécules (isotrope)
- ⇒ **Chocs entre les molécules**
- ⇒ **Forces**

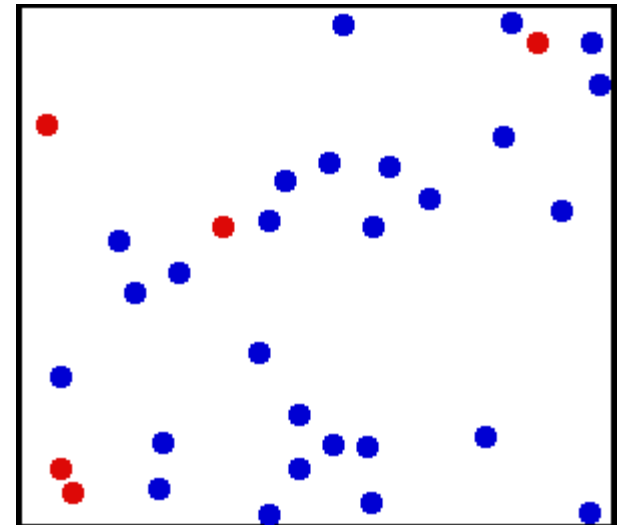
- ⇒ **Pression :**

$$P = \frac{F}{S}$$

- ⇒ unité : N.m^{-2} ou Pa

- ⇒ Air à $T \approx 20^\circ\text{C}$

- $\langle v \rangle \approx 400 \text{ m.s}^{-1}$
- $\langle l \rangle \approx 70 \text{ nm}$
- $\langle n \rangle \approx 5.10^9 \text{ collisions/s}$



⇒ **Variations autour d'une valeur moyenne :** $P = P_0 + p$

⇒ P_0 : pression moyenne ou pression atmosphérique

⇒ p : pression variable ou pression acoustique

⇒ Dans l'air : $P_0 = 1 \text{ atm} \approx 10^5 \text{ Pa}$, $p \approx 10^{-5} - 10 \text{ Pa}$

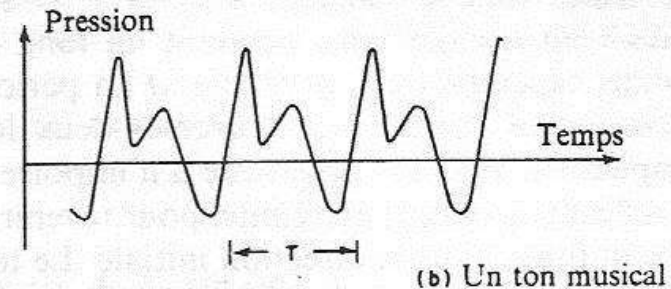
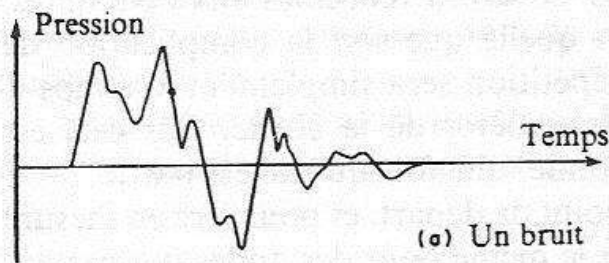
$$\langle P \rangle = P_0 \text{ et } \langle p \rangle = 0$$

b) Caractéristiques physiologiques d'un son

⇒ **Son et bruit**

⇒ Son : variation périodique de la pression

⇒ Bruit : variation non périodique de la pression



⇒ **Sensations auditives : 3 paramètres**

⇒ Hauteur

⇒ Force

⇒ Timbre

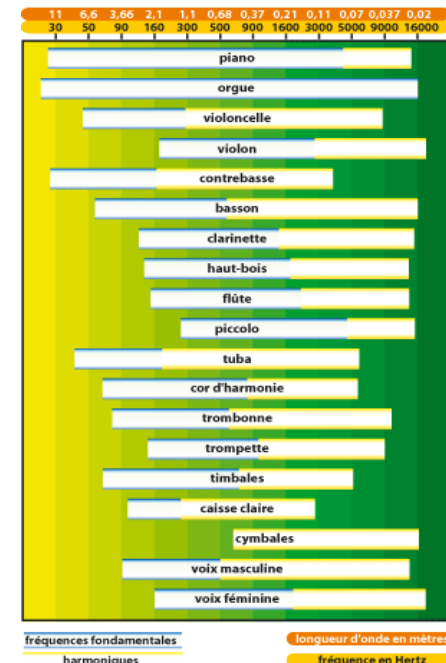
⇒ Hauteur :

- ⇒ son grave ou aigu
- ⇒ Directement lié à la fréquence f / période T
- ⇒ L'effet de 2 sons successifs (mélodie) ou simultanés (accord) ne dépend que du rapport f_1 / f_2 et pas de la hauteur absolue ⇒ échelle multiplicative
- ⇒ Décomposition en octaves : intervalle correspondant à un doublement de la fréquence
- ⇒ Gamme tempérée : octave découpé en douze intervalles chromatiques égaux
 - **do** | do# | ré | mi b | mi | fa | fa# | sol | sol# | la | si b | si | **do**
 - Passage d'une note à une autre (demi-ton) : $f \rightarrow 2^{1/12} f \approx 1,059 f$
- ⇒ Seuil de sensibilité : $\Delta f / f \approx 1\%$

⇒ Domaine audible par l'homme :

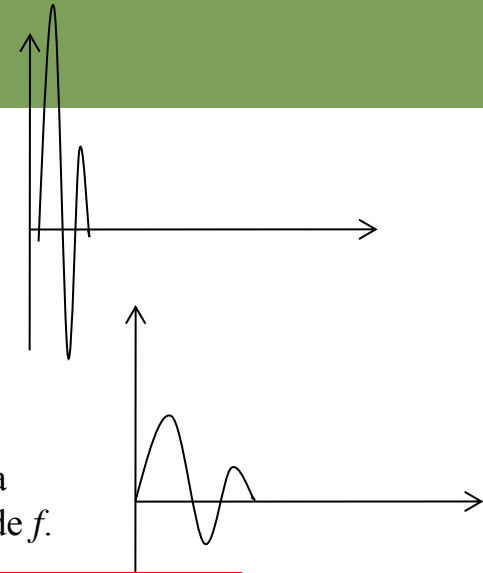
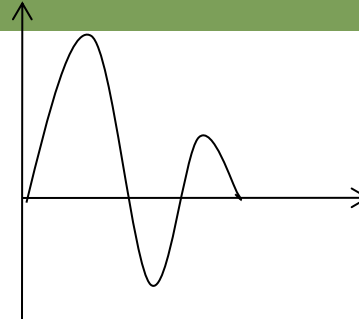
$$20 \text{ Hz} \leq f \leq 20 \text{ kHz}$$

- $f < 20 \text{ Hz}$: infrasons
- $f > 20 \text{ kHz}$: ultrasons



⇒ **Timbre :**

⇒ Forme du motif de l'onde

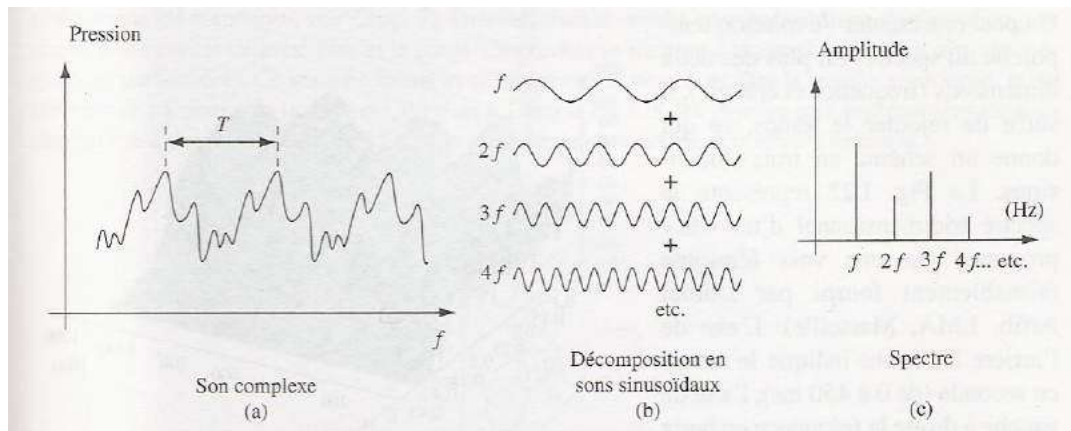


⇒ Décomposition harmonique:

- Tout signal de fréquence f peut se décomposer comme la somme de signaux sinusoïdaux de fréquences multiples de f .

$$s(t) = s_0 + \sum_{n=1}^{+\infty} s_n \cdot \cos(2\pi nft + \varphi_n) = a_0 + \sum_{n=1}^{+\infty} a_n \cdot \cos(2\pi nft) + b_n \cdot \sin(2\pi nft)$$

- $n = 1$: fondamental
- $n > 1$: harmonique de rang n



⇒ Spectre d'amplitude

- Son pur : peu d'harmoniques
- Son riche : beaucoup d'harmoniques

⇒ **Force**

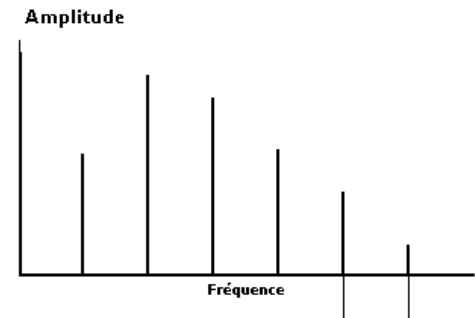
⇒ Lié à l'amplitude des

- Variations de pression
- Oscillations des molécules

⇒ Son et bruit

⇒ Quantifié par l'intensité I

Spectre d'amplitude d'un signal périodique



(à 1 kHz)	$I \text{ (W.m}^{-2}\text{)}$	$p \text{ (Pa)}$	$a \text{ (m)}$
Seuil d'audition	10^{-12}	$2 \cdot 10^{-5}$	$0,5 \cdot 10^{-10}$
Seuil de douleur	1	20	$0,5 \cdot 10^{-4}$

c) Niveau sonore

⇒ **Test d'écoute :**

⇒ Si p faible, on perçoit Δp faible

⇒ Si p fort, on ne perçoit pas Δp faible

⇒ **Courbe de sensibilité de l'oreille :**

⇒ Échelle logarithmique

⇒ **Niveau sonore :**

$$L = 20 \log \left(\frac{p_{eff}}{p_0} \right)$$

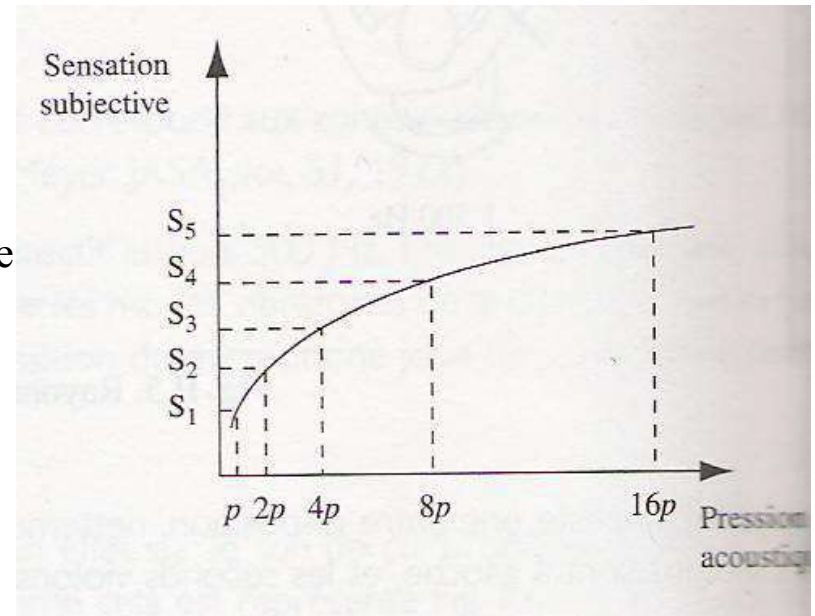
⇒ p_0 : pression de référence = pression au seuil d'audition : $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$

$$\Rightarrow I = \alpha \cdot p^2 \Rightarrow L = 20 \log \left(\frac{(I/\alpha)^{1/2}}{p_0} \right) \Rightarrow L = 20 \log \left(\left(\frac{I}{\alpha p_0^2} \right)^{1/2} \right) \Rightarrow L = 10 \log \left(\frac{I}{\alpha p_0^2} \right)$$

$$L = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right)$$

⇒ I_0 : intensité de référence = Intensité au seuil d'audition : $I_0 = 10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$

⇒ "unité" : décibel (acoustique) ou dB



⇒ Doublement d'amplitude :

$$p' = 2 \times p \Rightarrow L' = 20 \log \left(\frac{2p}{p_0} \right) \Rightarrow L' = L + 20 \log(2) \approx L + 6\text{dB}$$

⇒ Doublement de puissance :

$$I' = 2 \times I \Rightarrow L' = 10 \log \left(\frac{2I}{I_0} \right) \Rightarrow L' = L + 10 \log(2) \approx L + 3\text{dB}$$

⇒ Onde sphérique :

$$I(r) = \frac{I_1}{r^2} \Rightarrow L(r) = 10 \log \left(\frac{I_1}{I_0 r^2} \right) = 10 \log \left(\frac{I_1}{I_0} \right) + 10 \log \left(\frac{1}{r^2} \right)$$

$$L(r) = L_1 - 20 \log r$$

⇒ **Échelle (indicative) des niveaux sonores**

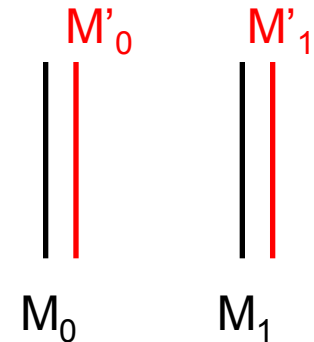
Niveau (dB)	Pression (Pa)	Intensité (W.m ⁻²)	Effets	Exemple
194	101 300	25 10 ⁶		Pression atmosphérique
180	20 000	10 ⁶		Fusée
140	200	100	lésions irréversibles	Avion à réaction
120	20	1	Seuil de douleur	Atelier Industriel
100	2	10 ⁻²	Perte d'audition après une exposition brève	Discothèque
80	0.2	10 ⁻⁴	Perte d'audition après une exposition prolongée	Orchestre
60	0.02	10 ⁻⁶		Rue
40	0.002	10 ⁻⁸		Conversation
20	0.0002	10 ⁻¹⁰		Chuchotement
0	0.00002	10 ⁻¹²		Silence

3. Propagation d'une onde acoustique

a) Propagation d'un ébranlement

⇒ **Ebranlement : déplacement rapide, de faible amplitude**

- ⇒ Compression de l'air
- ⇒ Poussée supplémentaire
- ⇒ Poussée sur le point voisin
- ⇒ Propagation longitudinale



⇒ **Variables mises en jeu**

↪ Déplacement $\zeta(x,t)$
 ↪ Vitesse $\dot{\zeta}(x,t) = \frac{\partial \zeta}{\partial t}$
 ↪ Accélération $\ddot{\zeta}(x,t) = \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2}$

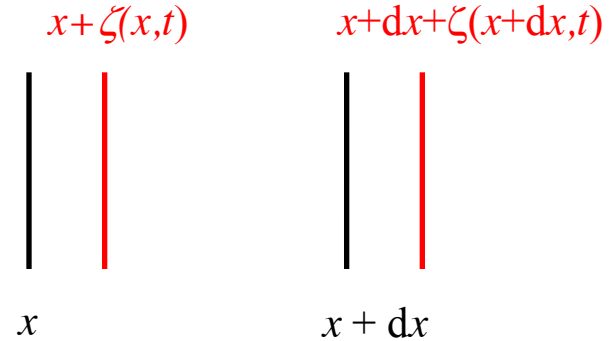
↪ Surpression $p_e(x,t)$
 $P = P_o + p_e$
 et
 $p_e \ll P_o$

↪ Masse volumique $\rho_e(x,t)$
 $\rho = \rho_o + \rho_e$
 et
 $\rho_e \ll \rho_o$

b) Equation de Propagation

⇒ **3 Phénomènes**

- I** Le gaz se déplace et change de densité
- II** Le changement de densité entraîne un changement de pression
- III** Les inégalités de pression engendrent le déplacement du gaz



I Le gaz se déplace et change de densité

⇒ Conservation de la masse : $\rho_o \cdot S dx = \rho \cdot S((x + dx + \zeta(x + dx, t)) - (x + \zeta(x, t)))$

$$\text{si } dx \rightarrow 0 \quad \zeta(x + dx, t) = \zeta(x, t) + \frac{\partial \zeta}{\partial x}(x, t) \cdot dx$$

$$\rho_o \cdot dx = (\rho_o + \rho_e) \cdot \left[dx + \frac{\partial \zeta}{\partial x}(x, t) \cdot dx \right]$$

$$\rho_o = (\rho_o + \rho_e) \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial x}(x, t) + (\rho_o + \rho_e)$$

$$\rho_e = -(\rho_o + \rho_e) \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial x}(x, t)$$

$$\Rightarrow \rho_e = -\rho_o \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial x} \quad (\text{I})$$

III Le changement de densité entraîne un changement de pression

⇒ Dilatation d'un fluide : Relation entre P et ρ

$$P = f(\rho) \text{ et } P_o = f(\rho_o)$$

$$P = P_o + p = f(\rho_o + \rho_e) \approx f(\rho_o) + f'(\rho_o) \cdot \rho_e$$

$$p = f'(\rho_o) \cdot \rho_e$$

⇒ Dilatation d'un gaz parfait :

$$PV = nRT \quad \Rightarrow P = \frac{n}{V} RT$$

$$\text{et } \rho = \frac{m}{V} = \frac{nM}{V} \quad \Rightarrow P = \left(\frac{RT}{M} \right) \cdot \rho$$

⇒ Coefficient de compressibilité d'un fluide :

$$\chi = -\frac{1}{V} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta P} = -\frac{1}{V} \cdot \frac{V - V_o}{P - P_o} \quad \begin{array}{l} \text{dépend du fluide} \\ \text{dépend de } T \end{array}$$

$$\text{et } \theta = \frac{V - V_o}{V_o} = \frac{\frac{m}{\rho} - \frac{m}{\rho_o}}{\frac{m}{\rho_o}} = \frac{\rho_o - \rho}{\rho} \approx -\frac{\rho_e}{\rho_o} \quad \text{soit} \quad \chi = -\frac{\theta}{p} = \frac{\rho_e}{\rho_o p}$$

$$\Rightarrow p = \frac{1}{\rho_o \chi} \cdot \rho_e \quad (\text{II})$$

III Les inégalités de pression engendrent le déplacement de la tranche

⇒ Équation du mouvement de la tranche :

⇒ masse : $m = \rho_o \cdot S \cdot dx$

⇒ accélération : $\vec{a} = \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} \cdot \vec{u}_x$

⇒ forces :
$$\begin{aligned} \sum \vec{F} &= P(x, t) \cdot S \cdot \vec{u}_x - P(x + dx, t) \cdot S \cdot \vec{u}_x \\ &= (p(x, t) - p(x + dx, t)) \cdot S \cdot \vec{u}_x \\ &= -\frac{\partial p}{\partial x}(x, t) \cdot dx \cdot S \cdot \vec{u}_x \end{aligned}$$



⇒ RFD : $m \cdot \vec{a} = \sum \vec{F} \Rightarrow (\rho_o \cdot S \cdot dx) \cdot \left(\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} \cdot \vec{u}_x \right) = -\frac{\partial p}{\partial x}(x, t) \cdot dx \cdot S \cdot \vec{u}_x$

$$\Rightarrow \rho_o \cdot \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} = -\frac{\partial p}{\partial x} \quad (\text{III})$$

⇒ **Équation de propagation**

$$\rho_e = -\rho_o \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial x} \quad (\text{I})$$

$$p = \frac{1}{\rho_o \chi} \cdot \rho_e \quad (\text{II})$$

$$\rho_o \cdot \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} = -\frac{\partial p}{\partial x} \quad (\text{III})$$

$$\rho_o \cdot \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} \stackrel{(\text{III})}{=} -\frac{\partial p}{\partial x} \stackrel{(\text{II})}{=} -\frac{1}{\rho_o \chi} \cdot \frac{\partial \rho_e}{\partial x} \stackrel{(\text{I})}{=} -\frac{1}{\rho_o \chi} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(-\rho_o \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right)$$

$$\rho_o \cdot \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} = \frac{1}{\chi} \cdot \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2}$$

⇒ Équations identiques en p et ρ_e : $\rho_o \chi \cdot \frac{\partial^2 \rho_e}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 \rho_e}{\partial x^2}$ ou $\rho_o \chi \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$

⇒ Unité de $\rho_o \chi$: $\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^2$

⇒ On pose : $c_s = \frac{1}{\sqrt{\rho_o \chi}}$ (c_s en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

$$\Rightarrow \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \frac{1}{c_s^2} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0$$

c) Résolution de l'équation de d'Alembert

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

$$f(x, t) = f_+(x - ct) + f_-(x + ct)$$

Onde progressive dans
le sens des x croissants

Onde progressive dans
le sens des x décroissants

c) Vitesse du son

$$c_s = \frac{1}{\sqrt{\rho_o \chi}}$$

⇒ En général :

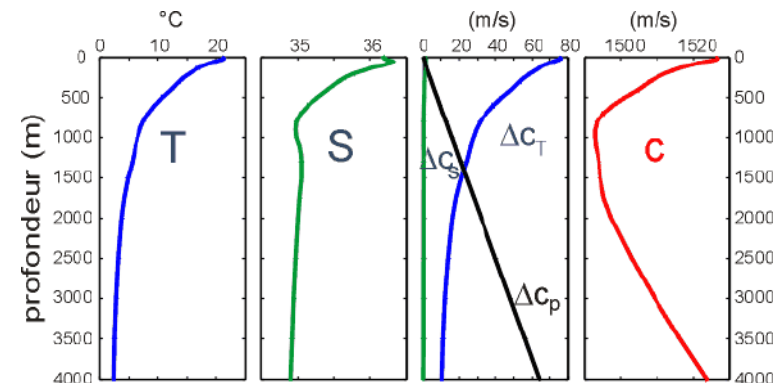
$$\left. \begin{array}{l} \rho_s > \rho_l > \rho_g \\ \text{mais } \chi_s \ll \chi_l \ll \chi_g \end{array} \right\} c_s > c_l > c_g$$

⇒ Quelques valeurs ($P_o = 1 \text{ atm}$, $T = 20 \text{ °C}$)

milieu	$c_s \text{ (m.s}^{-1}\text{)}$	milieu	$c_s \text{ (m.s}^{-1}\text{)}$	milieu	$c_s \text{ (m.s}^{-1}\text{)}$
air	340	PVC	2000 - 2400	verre	5300
eau	1480	béton	3100	acier	5600 - 5900
glace	3200	Bois	3300	granit	6200

⇒ Vitesse du son dans la mer

$$\begin{aligned} c = & 1449,2 \\ & + 4,6T - 0,055T^2 + 0,00029T^3 \\ & + (1,34 - 0,010T)(S - 35) \\ & + 1,58 \cdot 10^{-6} P \end{aligned}$$



⇒ Vitesse du son dans un gaz parfait

⇒ Loi des gaz parfaits : $PV = nRT$

⇒ Transformation adiabatique (sans échange de chaleur) : $PV^\gamma = \text{cste}$

γ : coefficient adiabatique du gaz

- gaz monoatomique : $\gamma = 5/3 = 1,67$

- gaz diatomique : $\gamma = 7/5 = 1,4$

$$PV^\gamma = \text{cste} \Rightarrow \ln P + \gamma \ln V = \text{cste} \Rightarrow \frac{dP}{P} + \gamma \frac{dV}{V} = 0$$

$$\Rightarrow \frac{1}{V} \cdot \frac{dV}{dP} = -\frac{1}{\gamma P} \Rightarrow \chi = -\frac{1}{V} \cdot \frac{dV}{dP} = \frac{1}{\gamma P}$$

⇒ Vitesse du son :
$$c = \frac{1}{\sqrt{\rho_o \chi}} = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho_o}} = \sqrt{\frac{\gamma P V}{m}} = \sqrt{\frac{\gamma P V}{n M}}$$

$$c = \sqrt{\frac{\gamma R T}{M}} \propto \sqrt{T}$$

⇒ Air à 20°C :
$$c = \sqrt{\frac{1,4 \times 8,31 \times 293}{29 \cdot 10^{-3}}} = 343 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

e) Puissance acoustique – Impédance acoustique

⇒ **Déplacement de matière associée à l'onde**

⇒ Puissance mécanique : $\mathcal{P} = \vec{F} \cdot \vec{v} = pS \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial t}$

⇒ Onde progressive : $\zeta(x, t) = f(x - ct)$

donc $\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -c \cdot f'(x - ct)$ et $\frac{\partial \zeta}{\partial x} = f'(x - ct)$

soit $\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -c \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial x} \stackrel{(I)}{=} -c \cdot -\frac{\rho_e}{\rho_o} \stackrel{(II)}{=} c \cdot \chi p$

donc $\mathcal{P} = S\chi c \cdot p^2$ or $c = \frac{1}{\sqrt{\rho_o \chi}} \Rightarrow \chi = \frac{1}{\rho_o c^2}$ soit $\mathcal{P} = \frac{S}{\rho_o c} \cdot p^2$

⇒ **Intensité acoustique** $I = \frac{\langle \mathcal{P} \rangle}{S} \Rightarrow I = \frac{\langle p^2 \rangle}{\rho_o c}$

⇒ Pression efficace : $p_{eff} = \sqrt{\langle p^2 \rangle} \Rightarrow I = \frac{p_{eff}^2}{\rho_o c}$

⇒ Onde harmonique :

$$p = p_o \cos(\omega t - kx + \varphi) \Rightarrow \langle p^2 \rangle = \frac{p_o^2}{2} \Rightarrow p_{eff} = \frac{p_o}{\sqrt{2}}$$

⇒ **Impédance acoustique** $Z = \rho_o \cdot c$

⇒ Unité : $\text{kg.m}^{-3} \times \text{m.s}^{-1}$ donc $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ou $\text{Pa.m}^{-1}.\text{s}$

⇒ Air à 20 °C : $Z = 1,29 \times 343 = 440 \text{ Pa.m}^{-1}.\text{s}$

⇒ **Analogie électrique**

Electricité			Acoustique		
Tension	U	V	Pression	p	Pa
Intensité	I	A	Vitesse	$v = \frac{\partial \zeta}{\partial t}$	m.s^{-1}
Puissance	P	W	Intensité	I	W.m^{-2}
Loi d'Ohm	$U = ZI$ ou $Z = \frac{U}{I}$			$p = Zv$ ou $Z = \frac{p}{v}$	
Loi de Joule	$P = U \cdot I = Z \cdot I^2 = \frac{U^2}{Z}$			$I = \langle p \cdot v \rangle = Z \cdot \langle v^2 \rangle = \frac{\langle p^2 \rangle}{Z}$	

4. Réflexion – Transmission d'une onde

a) Onde à l'interface de 2 milieux

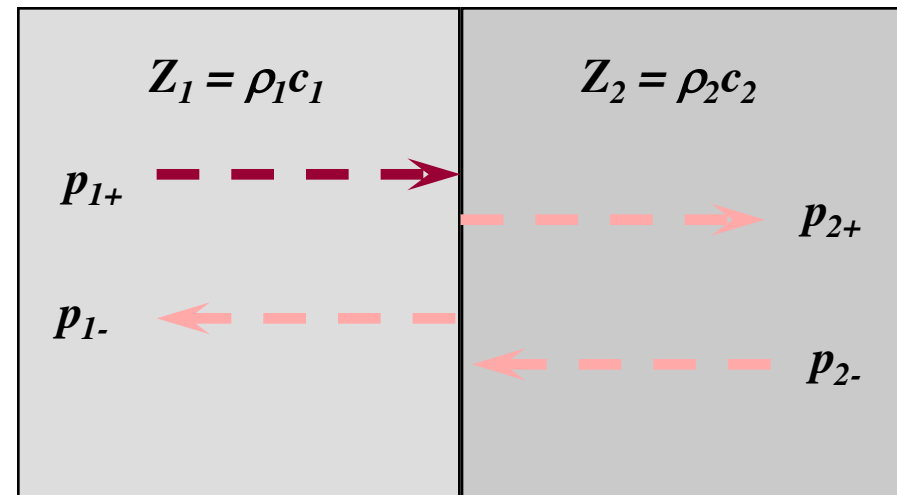
- ⇒ Surface séparant 2 milieux homogènes :
 - ⇒ Milieu 1 : ρ_1, c_1, Z_1
 - ⇒ Milieu 2 : ρ_2, c_2, Z_2
- ⇒ Interface localement plane
- ⇒ Ondes planes progressives harmoniques, perpendiculaires à l'interface

$$p_1(x,t) = p_{1+}(x,t) + p_{1-}(x,t)$$

$$= A_1 \cdot e^{i(\omega t - k_1 x)} + B_1 \cdot e^{i(\omega t + k_1 x)}$$

$$p_2(x,t) = p_{2+}(x,t) + p_{2-}(x,t)$$

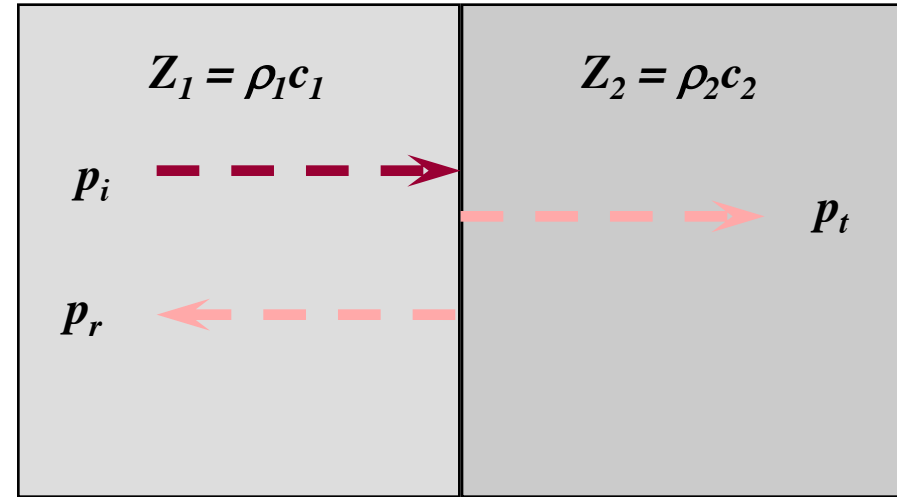
$$= A_2 \cdot e^{i(\omega t - k_2 x)} + B_2 \cdot e^{i(\omega t + k_2 x)}$$



⇒ **Onde provenant du milieu 1 :**

- ⇒ Onde incidente : p_{l+}
- ⇒ Onde réfléchie : p_{l-}
- ⇒ Onde transmise : p_{2+}
- ⇒ $A_1 = p_i, B_1 = p_r$
 $A_2 = p_t, B_2 = 0$

- ⇒ Milieu 1 : $Z_1 = \rho_1 \cdot c_1, k_1 = \frac{\omega}{c_1}, p_1 = \pm Z_1 \cdot v_1$
- ⇒ Milieu 2 : $Z_2 = \rho_2 \cdot c_2, k_2 = \frac{\omega}{c_2}, p_2 = \pm Z_2 \cdot v_2$



b) Coefficients d'amplitude

⇒ Coefficient de transmission en amplitude :

$$t = \frac{p_t}{p_i} = \frac{A_2}{A_1}$$

⇒ Coefficient réflexion en amplitude :

$$r = \frac{p_r}{p_i} = \frac{B_1}{A_1}$$

⇒ Continuité de la pression à l'interface :

$$p_1(0,t) = p_2(0,t) \Rightarrow A_1 \cdot e^{i(\omega t)} + B_1 \cdot e^{i(\omega t)} = A_2 \cdot e^{i(\omega t)} \Rightarrow A_1 + B_1 = A_2 \Rightarrow 1 + \frac{B_1}{A_1} = \frac{A_2}{A_1}$$

$$\Rightarrow 1 + r = t$$

⇒ Continuité de la vitesse à l'interface :

⇒ Relations vitesse/pression :

$$v_i = \frac{p_i}{Z_1}, v_t = \frac{p_t}{Z_2}, v_r = -\frac{p_r}{Z_1}$$

⇒ Continuité de v en $x = 0$:

$$v_1(0,t) = v_2(0,t) \Rightarrow v_i(0,t) + v_r(0,t) = v_t(0,t) \Rightarrow \frac{p_i(0,t)}{Z_1} - \frac{p_r(0,t)}{Z_1} = \frac{p_t(0,t)}{Z_2}$$

$$\Rightarrow \frac{A_1}{Z_1} - \frac{B_1}{Z_1} = \frac{A_2}{Z_2} \Rightarrow 1 - \frac{B_1}{A_1} = \frac{Z_1}{Z_2} \cdot \frac{A_2}{A_1}$$

$$\Rightarrow 1 - r = \frac{Z_1}{Z_2} t$$

⇒ **Coefficients en amplitude :**

$$\begin{cases} 1+r=t \\ 1-r=\frac{Z_1}{Z_2}t \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 2=\left(1+\frac{Z_1}{Z_2}\right)t \\ r=t-1 \end{cases} \Rightarrow \boxed{t=\frac{2Z_2}{Z_1+Z_2}, \quad r=\frac{Z_2-Z_1}{Z_1+Z_2}}$$

c) Coefficients en intensité

⇒ **Coefficient de transmission en intensité/énergie :**

$$\boxed{T = \frac{I_t}{I_i}}$$

⇒ **Coefficient de réflexion en intensité/énergie :**

$$\boxed{R = \frac{I_r}{I_i}}$$

⇒ **Intensité des ondes :** $I = \frac{\langle p^2 \rangle}{Z}, I_i = \frac{\langle p_i^2 \rangle}{Z_1}, I_r = \frac{\langle p_r^2 \rangle}{Z_1}, I_t = \frac{\langle p_t^2 \rangle}{Z_2}$

$$T = \frac{I_t}{I_i} = \frac{A_2^2}{Z_2} \cdot \frac{Z_1}{A_1^2} = \frac{Z_1}{Z_2} \cdot t^2$$

$$R = \frac{I_r}{I_i} = \frac{B_1^2}{Z_1} \cdot \frac{Z_1}{A_1^2} = r^2$$

⇒ **Coefficients en intensité/énergie :**

$$T = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}, \quad R = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^2$$

⇒ **Remarques :**

$$\begin{aligned} \Rightarrow T + R &= \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} + \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \\ &= \frac{4Z_1Z_2 + Z_2^2 - 2Z_1Z_2 + Z_1^2}{(Z_1 + Z_2)^2} = \frac{Z_2^2 + 2Z_1Z_2 + Z_1^2}{(Z_1 + Z_2)^2} = \frac{(Z_1 + Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2} \end{aligned}$$

⇒ Conservation de l'énergie : $T + R = 1$ (mais $t + r \neq 1$)

$$\Rightarrow T_{1 \rightarrow 2} = T_{2 \rightarrow 1}, \quad R_{1 \rightarrow 2} = R_{2 \rightarrow 1}$$

$$\Rightarrow \text{si } Z_1 \gg Z_2 \text{ (ou } Z_2 \gg Z_1), T \approx \frac{4Z_1Z_2}{Z_1^2} = \frac{4Z_2}{Z_1}, R \approx \frac{Z_1^2}{Z_1^2}, T \rightarrow 0, R \rightarrow 1$$

$$\Rightarrow \text{si } Z_1 \approx Z_2, T \approx \frac{4Z_1^2}{(2Z_1)^2}, R \approx \frac{0}{(2Z_1)^2}, T \rightarrow 1, R \rightarrow 0$$

⇒ **Atténuation en niveau acoustique :**

⇒ Atténuation en transmission :

$$\Delta L_t = L_t - L_i = 10 \log \frac{I_t}{I_o} - 10 \log \frac{I_i}{I_o} = 10 \log \frac{I_t}{I_i}$$

$$\Delta L_t = 10 \log T$$

⇒ Atténuation en réflexion :

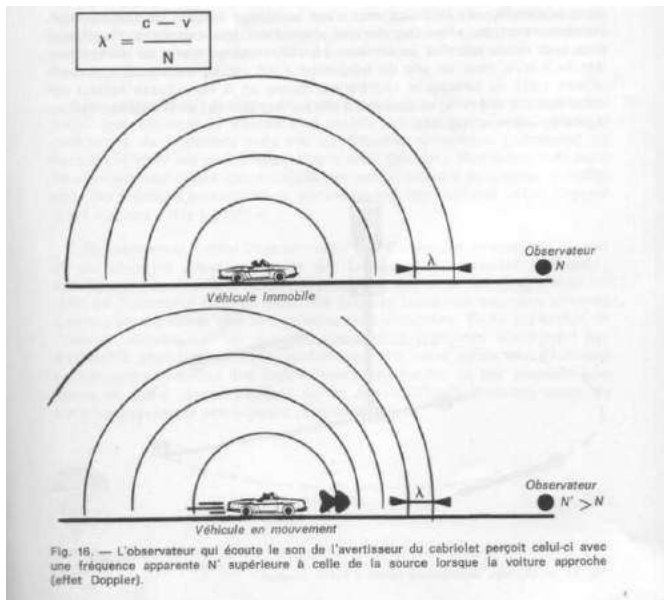
$$\Delta L_r = L_r - L_i = 10 \log \frac{I_r}{I_o} - 10 \log \frac{I_i}{I_o} = 10 \log \frac{I_r}{I_i}$$

$$\Delta L_r = 10 \log R$$

5. Phénomènes Ondulatoires

a) Effet Doppler – Bang Sonique

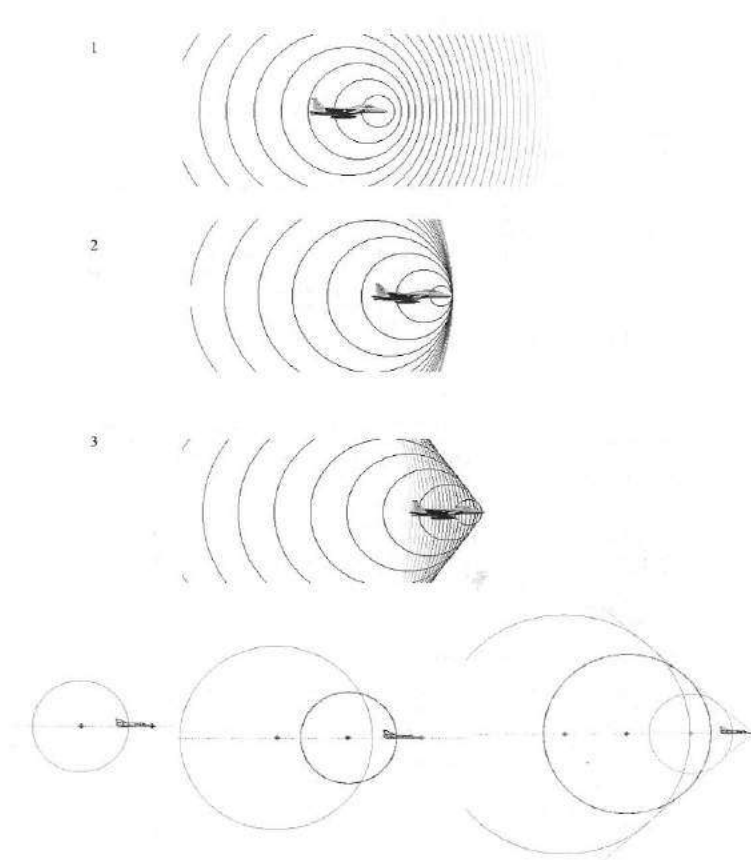
⇒ **Effet Doppler** : décalage de fréquence d'une onde acoustique ou électromagnétique entre la mesure à l'émission et la mesure à la réception lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur varie au cours du temps



$$f' = f \cdot \frac{c + V_o \cdot \cos \theta_o}{c - V_s \cdot \cos \theta_s}$$



- ⇒ **Objet supersonique** : répartition de la surpression sur un cône de Mach
 - ⇒ Bang sonique
- ⇒ **Objet transsonique** : répartition de la surpression devant l'objet
 - ⇒ Mur du son



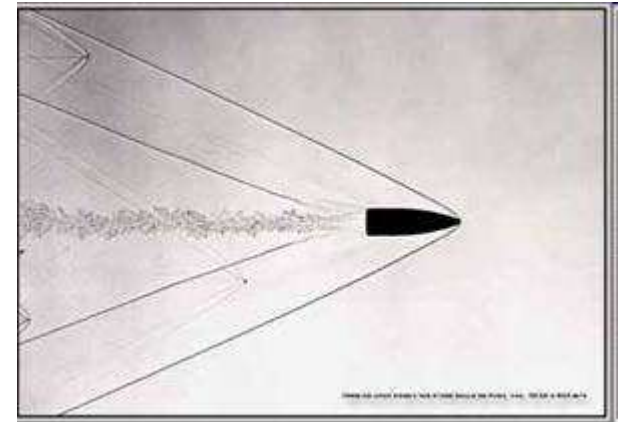
1. Subsonique ($v < c$)
2. Transsonique ($v \approx c$)
3. Supersonique ($v > c$)



- Avions :
 - Bell X1 (14/10/1947)
 - Concorde et Tupolev TU-144



- Balle de fusil ($v \approx 800$ m/s)

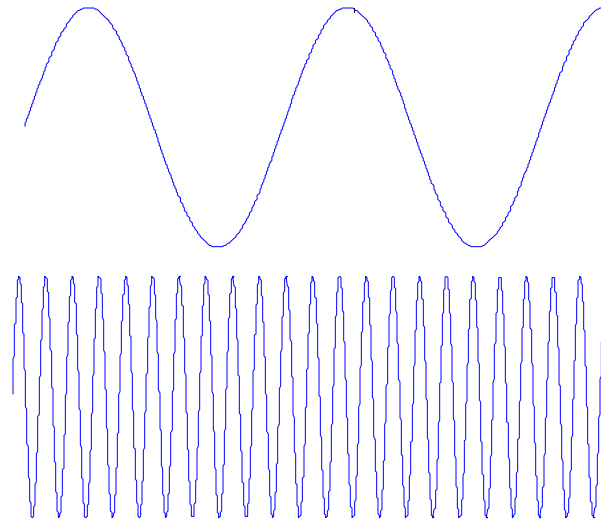


- Claquement du fouet



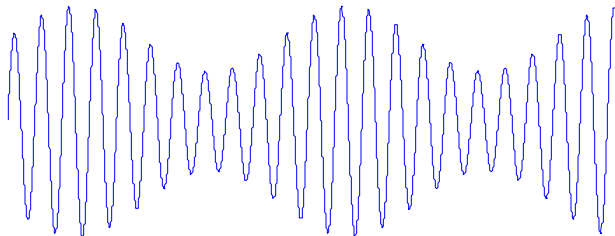
b) Transmission des sons – Modulation d'une onde

- ⇒ **Portée du son : quelques mètres**
- ⇒ **On transforme le signal acoustique en un signal électrique ou électromagnétique**
- ⇒ **On lui trouve un support de transmission**
 - ⇒ Radiodiffusion: espace hertzien
 - ⇒ Télécommunications: câble en cuivre, fibre optique, espace hertzien
- ⇒ **On trouve, si nécessaire, un véhicule du signal**
 - ⇒ porteuse dont le choix des caractéristiques dépend du support de propagation



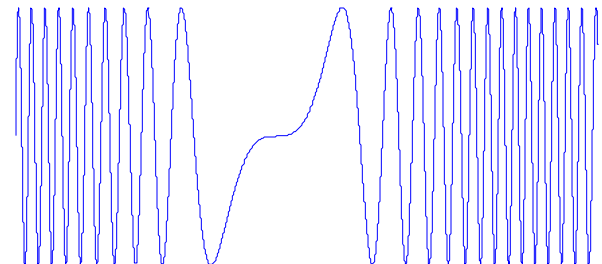
AM

$$I = (I_0 + I_{s\max} \sin \omega_s t) \sin \omega_0 t$$



FM

$$I = I_{0\max} \sin(\omega_0 t + (\omega_0 / \omega_s) \sin \omega_s t)$$



Modulation d'amplitude

Une porteuse sinusoïdale $e_o(t) = E \cos(\omega t)$ modulée en amplitude par un signal modulant basse-fréquence $s(t)$ qui peut être un signal audiofréquence, vidéo, analogique ou numérique s'écrit :

$$e(t) = E (1 + k.s(t)) \cos(\omega t)$$

- en l'absence de signal modulant $s(t)=0$ et $e(t) = e_o(t) = E \cos(\omega t)$
- en présence de modulation l'amplitude de la porteuse s'écrit : $E(1+k.s(t))$

Pour représenter l'allure temporelle d'un signal AM, on utilise les propriétés suivantes :

- la porteuse oscille entre deux limites qui sont les enveloppes supérieure et inférieure
- l'enveloppe supérieure a pour équation $x(t) = E (1 + k.s(t))$ (lorsque $\cos(\omega t) = 1$)
- l'enveloppe inférieure a pour équation $y(t) = -E (1 + k.s(t))$ (lorsque $\cos(\omega t) = -1$)
- on retrouve la forme du signal modulant $s(t)$ dans les deux enveloppes

Lorsque le signal modulant est sinusoïdal, on a $s(t) = a \cos(\Omega t)$ et la porteuse modulée s'écrit :

$$e(t) = E (1 + k a \cos(\Omega t)) \cos(\omega t) = E (1 + m \cos(\Omega t)) \cos(\omega t)$$

m : indice de modulation

Figure 1.
Allure d'une
porteuse
modulée en
amplitude

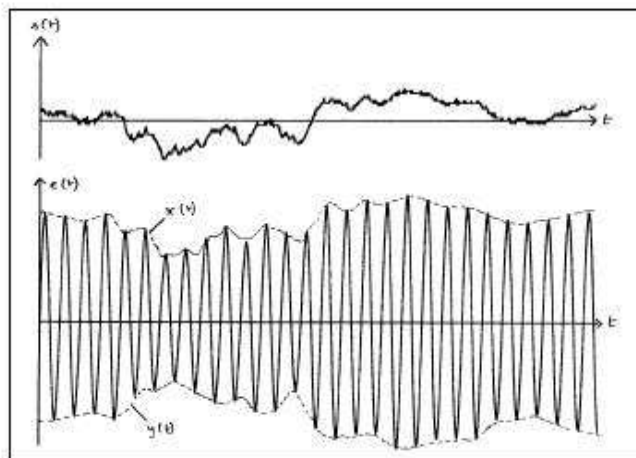
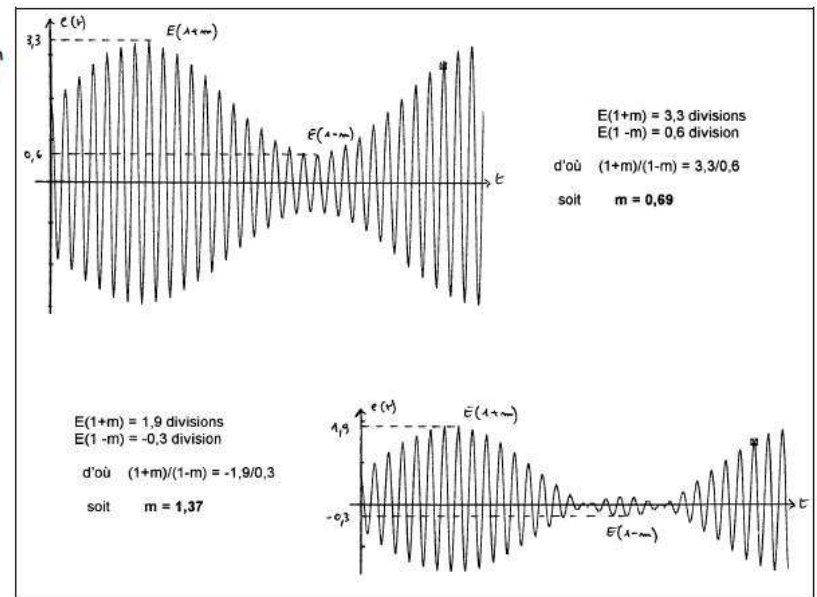


Figure 2.
Influence de m
sur l'allure de
la porteuse

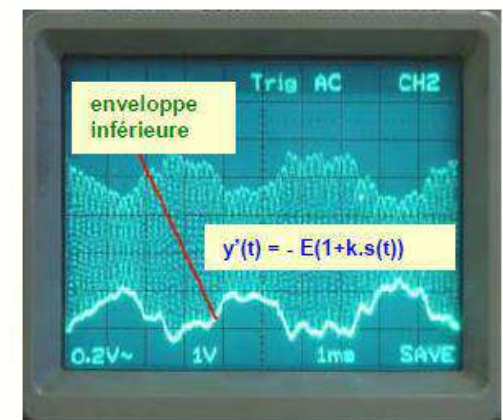
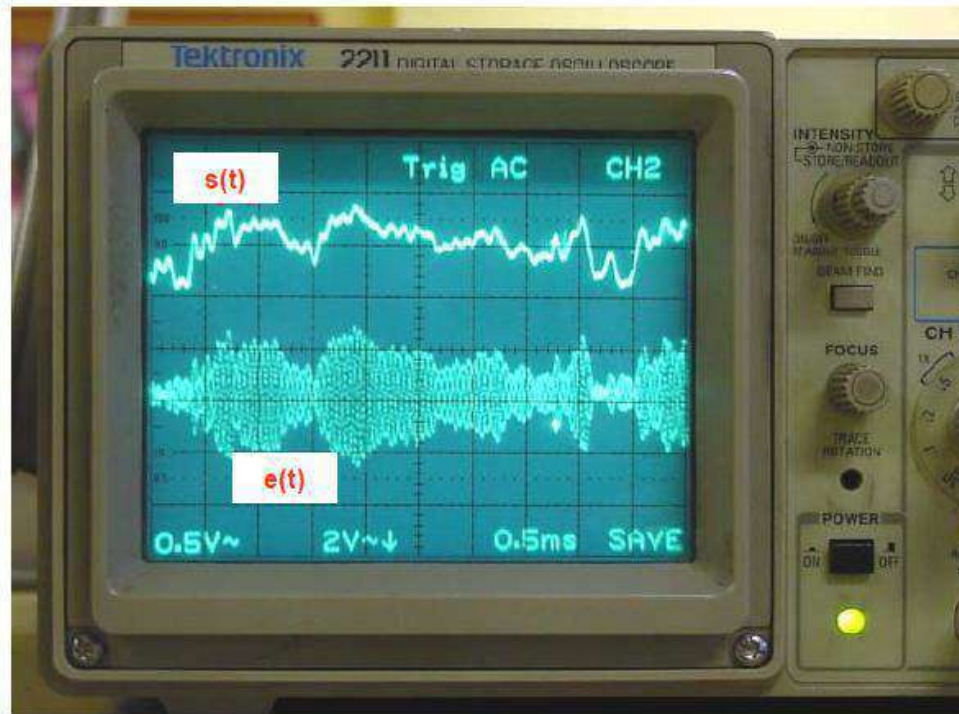


Pour produire un signal modulé en amplitude, il faut :

- une information basse-fréquence $s(t)$ qui peut être un signal audiofréquence, vidéo, analogique ou numérique
- une porteuse sinusoïdale $e_o(t)$

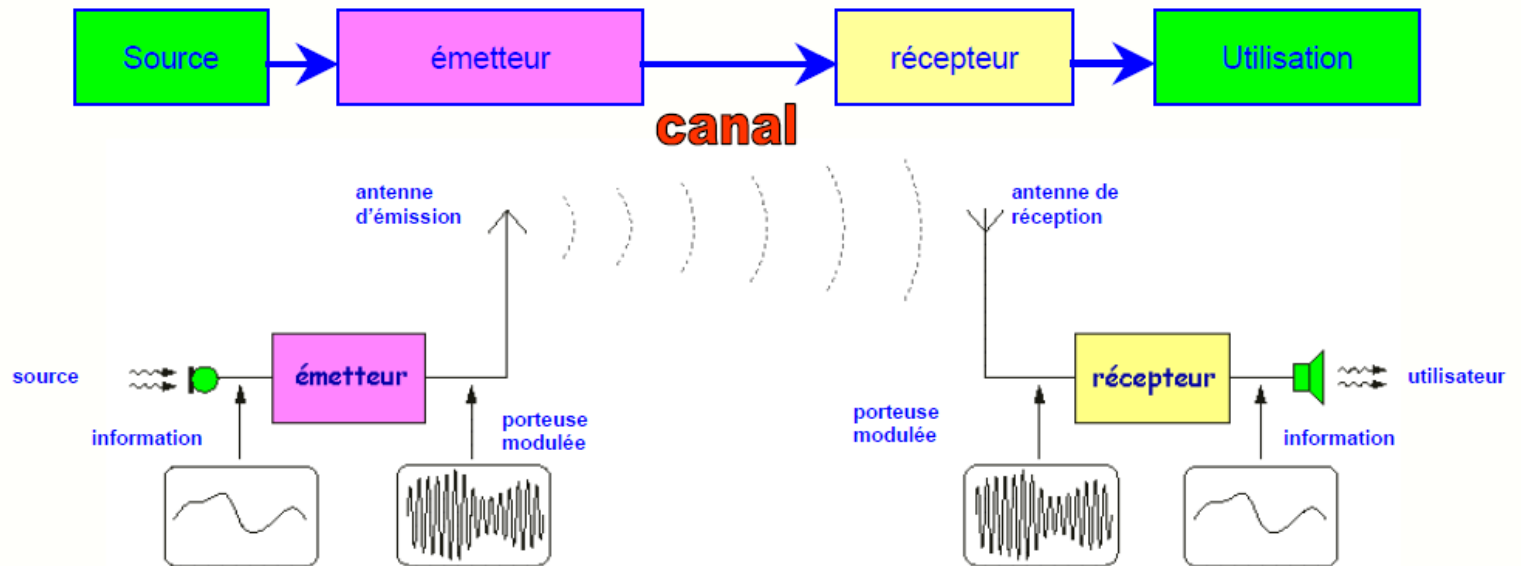
La porteuse modulée en amplitude s'écrit alors :

$$e(t) = E[1 + k.s(t)]\cos(\omega t + \varphi)$$



- en l'absence de signal modulant $s(t)=0$ et $e(t) = e_o(t) = E\cos(\omega t)$
- en présence de modulation, la porteuse oscille entre les enveloppes supérieure et inférieure
- l'enveloppe supérieure s'écrit $y(t) = E(1+k.s(t))$ et l'enveloppe inférieure $y'(t) = -E(1+k.s(t))$

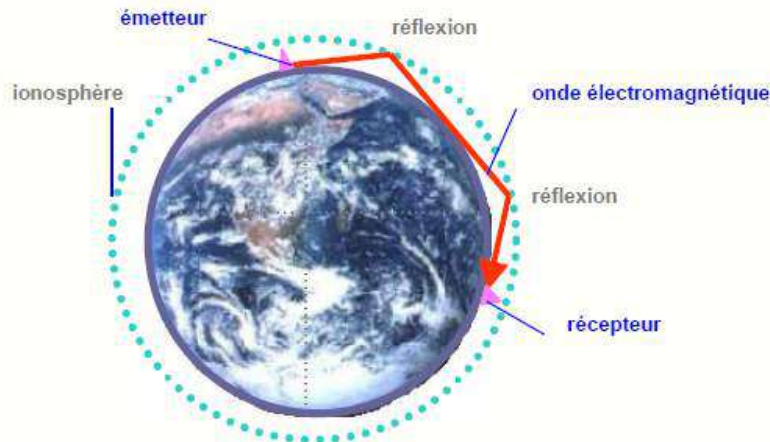
Un système de communication transmet à travers un canal des informations de la source vers un utilisateur :



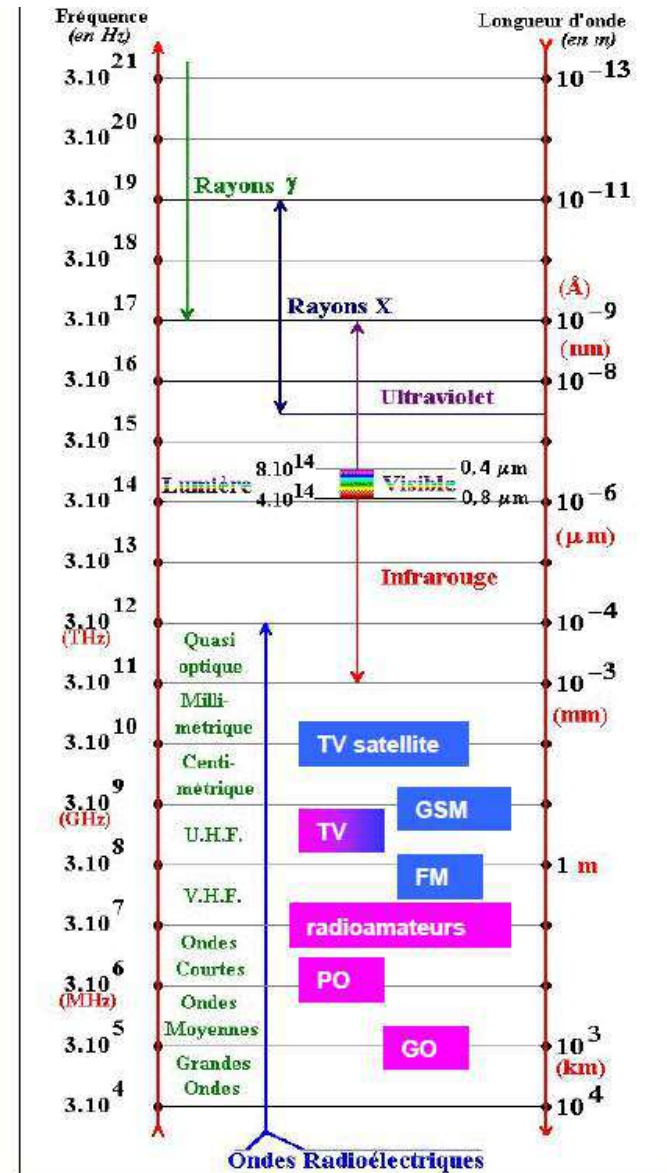
- la source fournit l'information sous la forme d'un **signal analogique** ou **numérique**
- l'émetteur inscrit cette information sur une porteuse sinusoïdale de fréquence f_0 : c'est la **modulation**
- ce signal électrique modulé est transformé en onde électromagnétique par l'**antenne**
- le **canal** est l'espace libre entre l'antenne d'émission et de réception dans lequel se propage l'onde électromagnétique
- le récepteur **sélectionne** la fréquence de la porteuse et **démodule** l'information qui y est inscrite
- l'information est restituée avec une **dégradation** liée aux qualités de l'émetteur, du récepteur et des perturbations du canal

La AM est utilisée dans un grand nombre d'applications :

- les Grandes Ondes de 150 à 280 kHz pour la radiodiffusion commerciale
- de 30 kHz à 3 MHz : les radiophares, balises d'aéroports, radios maritimes, services de météorologie...
- les Petites Ondes de 520 à 1710 kHz pour la radiodiffusion commerciale
- les Ondes Courtes de 3 à 30 MHz avec les cibistes (autour de 27 MHz) et les radioamateurs trafiquant dans 13 bandes allant de 120m (2,3 à 2,5 MHz) à 11m (25,6 à 26,1 MHz)
- les VHF et UHF de 30 MHz à 3 GHz où on trouve les radioamateurs, la télévision pour la luminance et le son, les communications avec les satellites, les émissions des aéroports, de la police...



Remarque : jusqu'à 50 MHz, les ondes radio peuvent se réfléchir sur l'ionosphère, ce qui permet une portée importante avec une puissance réduite.

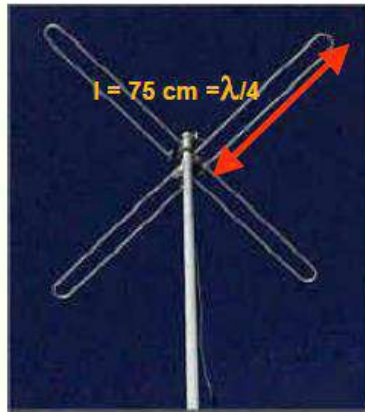


Une antenne a une fréquence de résonance liée à la dimension du brin actif :

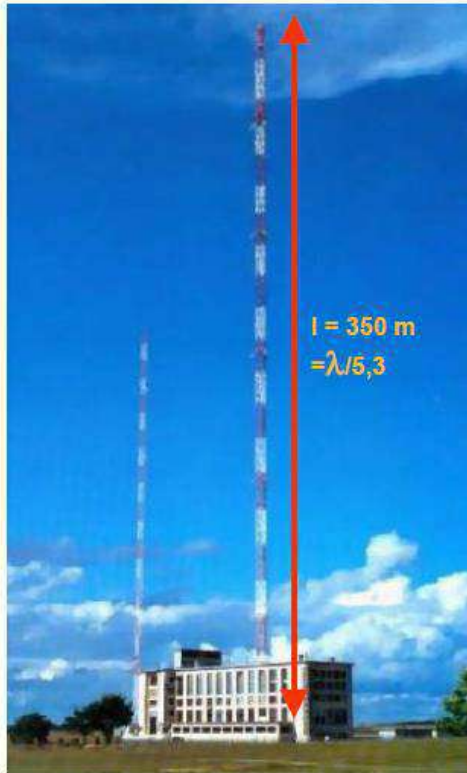
- sa longueur est typiquement égale au quart de la longueur d'onde
- en travaillant à une fréquence f_0 élevée, l'antenne sera donc de taille réduite

$$l = \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{4f_0}$$

antennes bande FM : 88 à 108 MHz et $\lambda \approx 3\text{m}$



Antenne TV-UHF : 400 à 800 MHz et $\lambda \approx 50\text{ cm}$



Le centre GO d'Allouis utilise deux antennes pylônes de 350m de haut diffusant les programmes de France Inter à 162 kHz ($\lambda = 1852\text{ m}$).



Ce mobile GSM qui tient dans la main contient 3 antennes différentes :

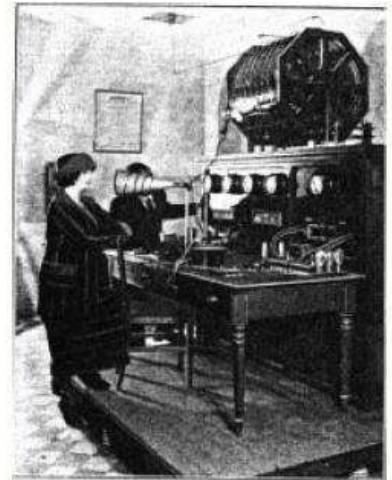
- bande GSM autour de 900 MHz
- bande DCS autour de 1,8 GHz
- bande Bluetooth autour de 2,45 GHz

Le 26 novembre 1921 a lieu la première émission de radiophonie française :

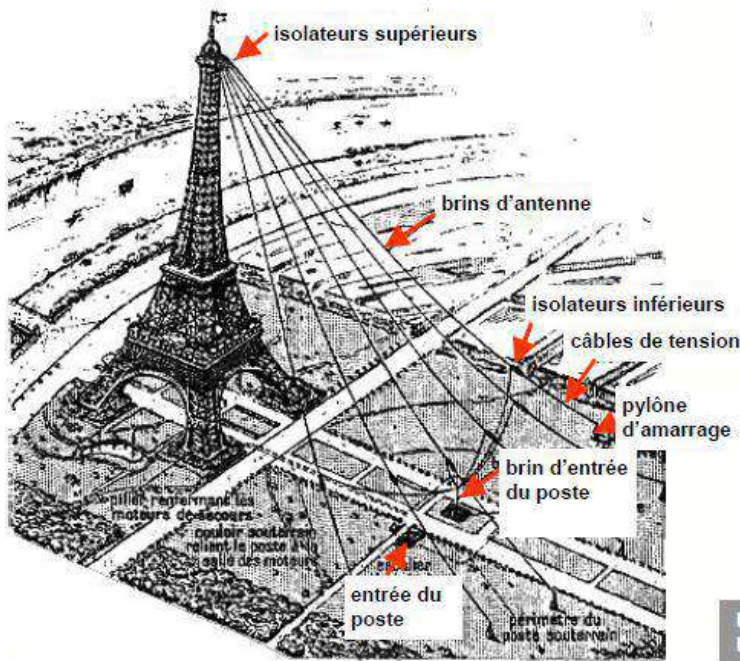
- à Sainte-Assise, près de Melun, Yvonne Brothier, debout au milieu de tout l'appareillage d'émission, interprète "la Marseillaise" et un air du "Barbier de Séville"
- cette musique est captée par un microphone puis **module en amplitude** une porteuse
- à 40 kilomètres de là, à Paris, une assemblée d'ingénieurs ravis entend la voix de la chanteuse
- le concert est également capté par de nombreuses stations dans un rayon de 1600 km

A cette époque, les nombre d'émissions est faible et l'audience réservée à quelques passionnés. En 1922, Émile GIRARDEAU crée un service public d'information et de musique, l'émetteur de la **Tour Eiffel** est installé et commence à émettre à $f_o = 113,2 \text{ kHz}$ (2650 m) avec $P = 1 \text{ kW}$

Les émissions radio en modulation d'amplitude n'ont plus cessé depuis...



La première émission AM



Émetteur de la tour Eiffel



Récepteur à galène

Modulation de fréquence

Le message basse-fréquence $s(t)$ à transmettre est inscrit dans la fréquence instantanée de la porteuse.

Sa fréquence dépend alors du temps et s'écrit :

$$f(t) = f_0 + k.s(t) \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} s(t) : \text{signal modulant} \\ f_0 : \text{fréquence de la porteuse non modulée} \end{array}$$

On passe aisément de la fréquence à la pulsation instantanée :

$$\omega(t) = 2\pi.f(t) = \omega_0 + 2\pi k s(t)$$

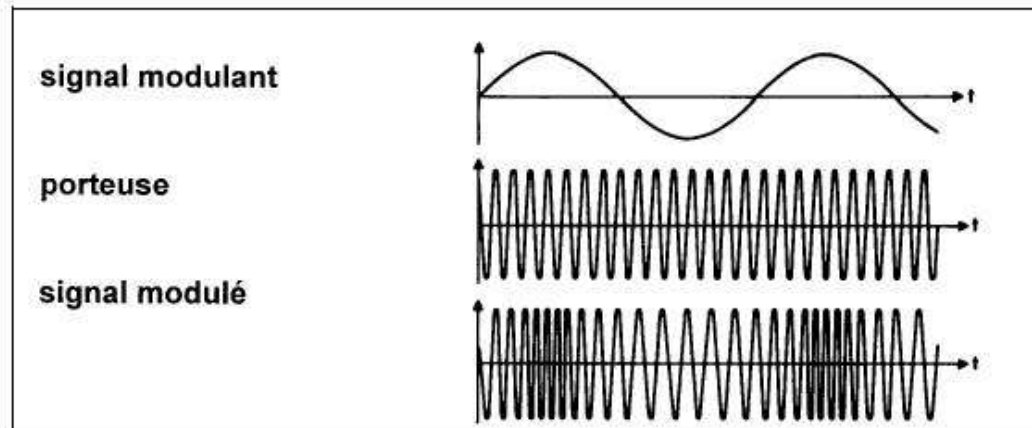
puis à la phase en intégrant la pulsation :

$$\theta(t) = \int \omega(t)dt = \omega_0 t + 2\pi k \int s(t)dt$$

Le signal modulé en fréquence est un signal sinusoïdal d'amplitude E et de fréquence $f(t)$. Son expression mathématique est donc la suivante :

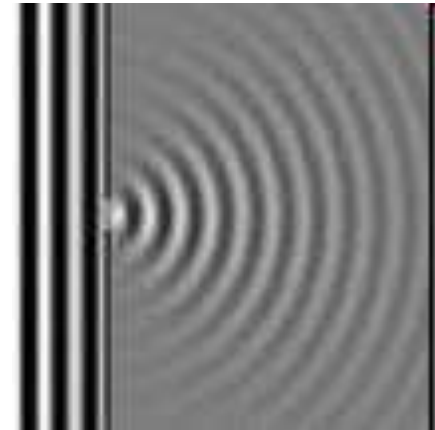
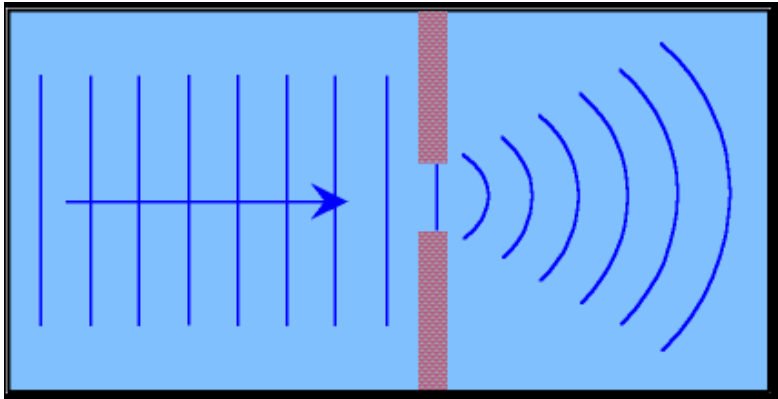
$$e(t) = E \cos(\theta(t)) = E \cos(\omega_0 t + 2\pi k \int s(t)dt)$$

Figure 1.
Porteuse FM
avec signal
modulant
sinusoïdal

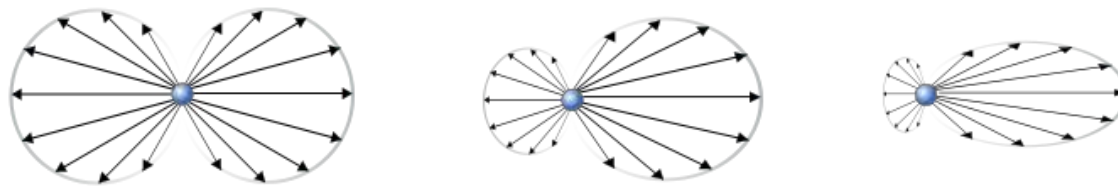


c) Diffraction – Diffusion

⇒ **Diffraction** : comportement particulier de l'onde lorsqu'elle rencontre un obstacle de la taille de sa longueur d'onde : $L \approx \lambda$



⇒ **Diffusion** : phénomène par lequel une onde est déviée dans de multiples directions par une interaction avec d'autres objets.



Diffusion de Rayleigh :

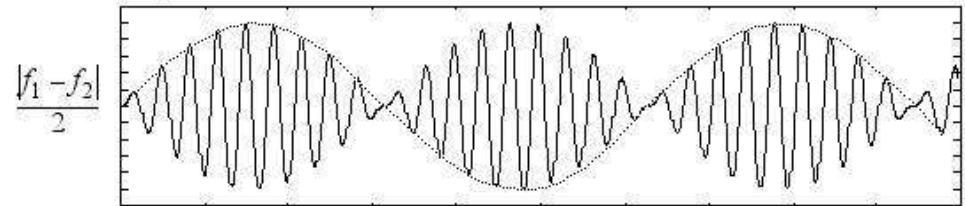
$$I = I_0 \cdot 8\pi^4 \cdot N\alpha^2 \cdot \frac{1 + \cos^2(\Theta)}{\lambda^4 \cdot R^2}$$

d) Battements – Interférences

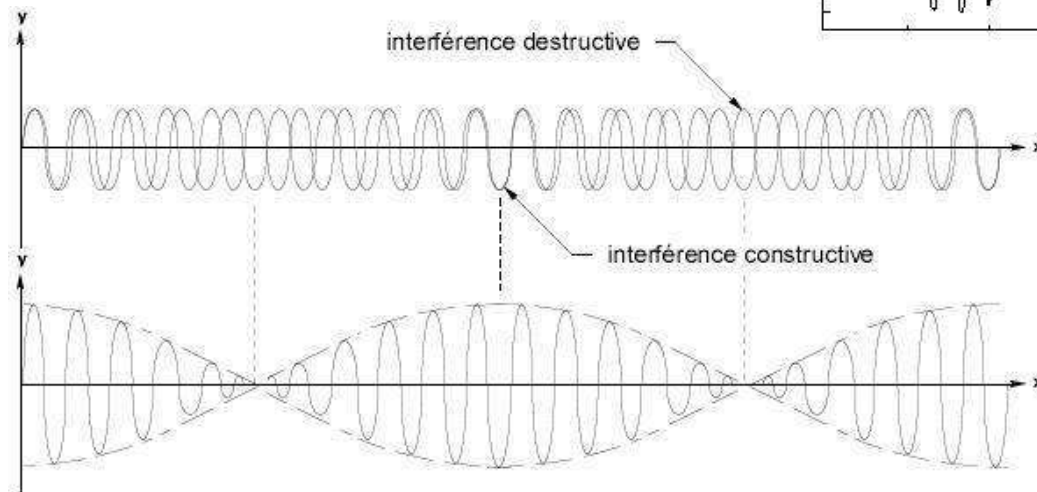
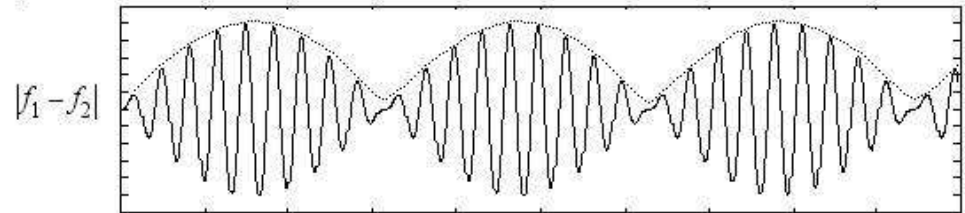
⇒ **Battements** : superposition de 2 sons de fréquences très proches mais non identiques

⇒ Audible si $|f_1 - f_2| < 7 \text{ Hz}$

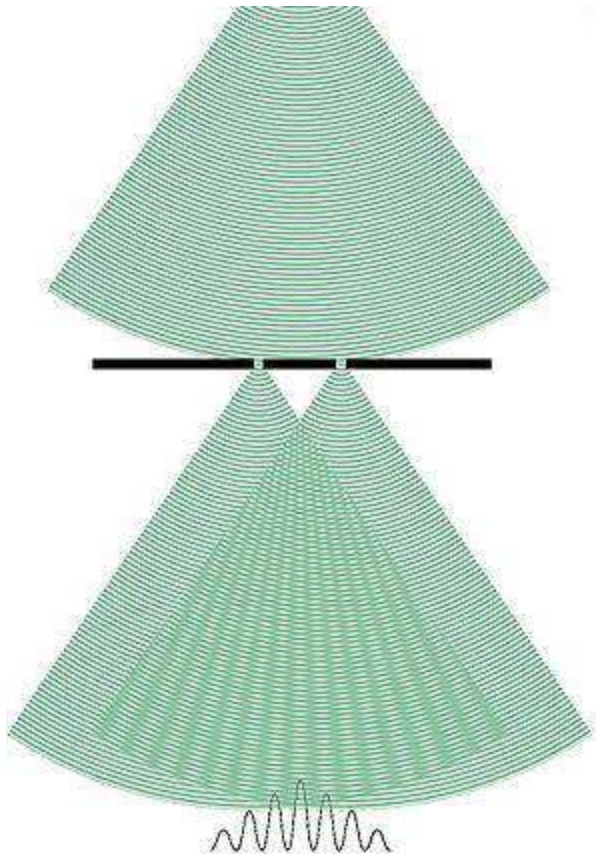
mathématiquement



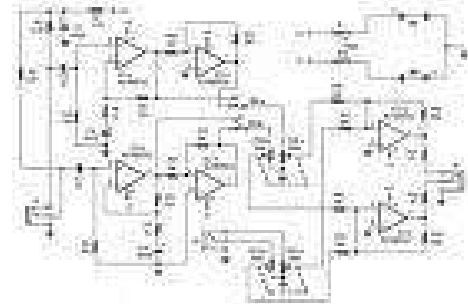
perceptivement



⇒ **Interférences** : lorsque deux ondes de même type et de même fréquence se rencontrent et interagissent l'une avec l'autre.



Casque anti
bruit



e) Atténuation

⇒ **Diminution de l'amplitude / l'intensité d'un son lors de sa propagation**

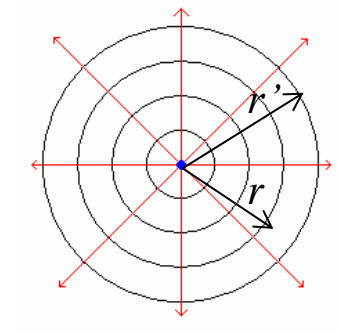
⇒ **Atténuation géométrique** : puissance totale conservée, augmentation de la surface des fronts d'ondes

⇒ Onde sphérique :

$$P_S = I(r) \cdot S(r) = I(r) \cdot 4\pi r^2$$

$$I(r) = \frac{P_S}{4\pi r^2} \Rightarrow I(r) \propto \frac{1}{r^2}$$

$$L(r) = L_1 - 20 \log r$$



⇒ **Atténuation physique** : interactions entre l'onde et le milieu dans lequel elle se propage

⇒ Frottements de type visqueux : $\vec{f} = -k \cdot \vec{v}$

⇒ Puissance dissipée : $\mathcal{P} = \langle \vec{f} \cdot \vec{v} \rangle = \langle -k \cdot v^2 \rangle \Rightarrow \mathcal{P} \propto \langle v^2 \rangle \propto \langle p^2 \rangle \propto I$

⇒ Variation d'intensité :

$$I(x + dx) - I(x) = \mathcal{P}(x)dx = -\mu \cdot I(x)dx \Rightarrow \frac{dI(x)}{dx} = -\mu I(x)$$

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\mu x}$$

$$L(x) = L_0 - \alpha x \quad (\text{avec } \alpha = 10 \frac{\mu}{\ln 10})$$

α en dB/m

⇒ En général : α dépend

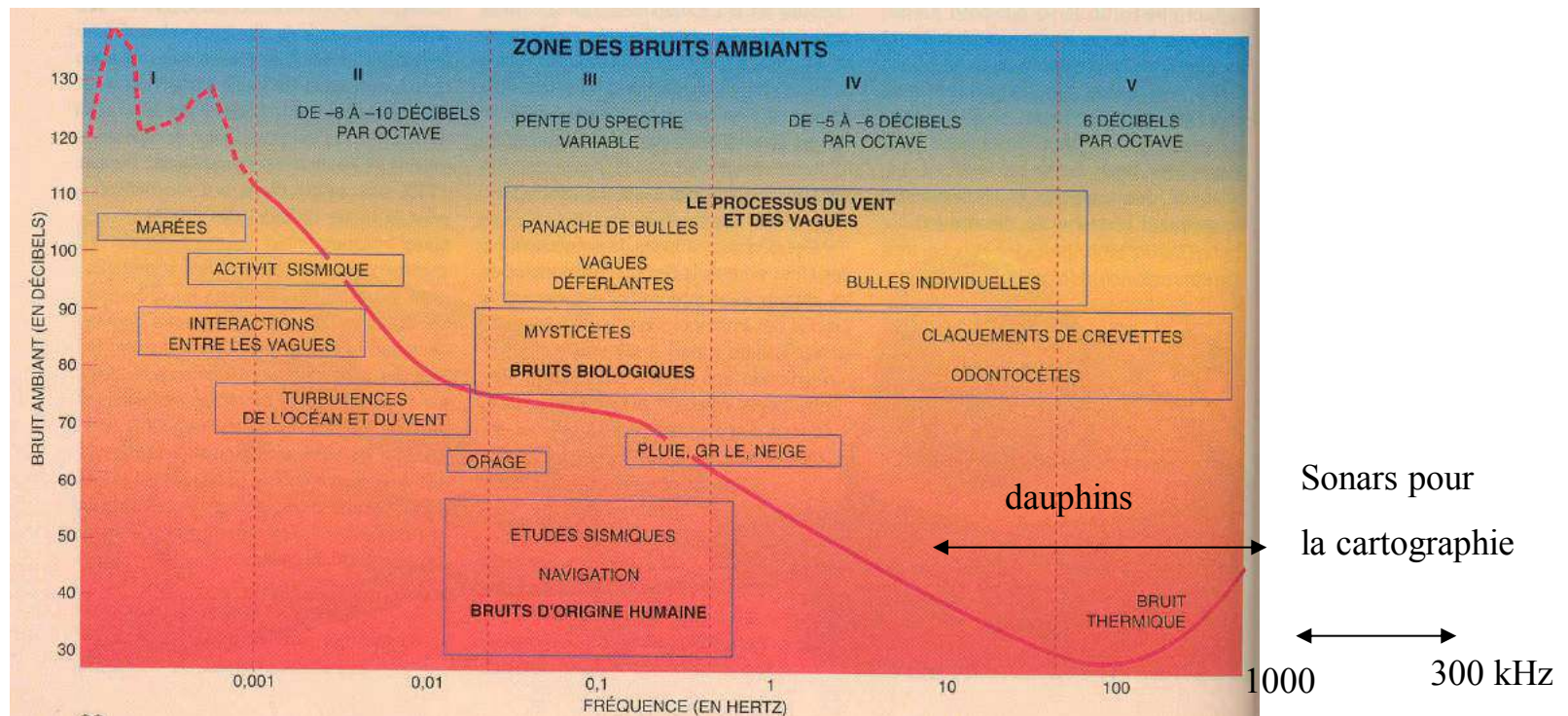
- du milieu
- de la fréquence f

Fréquence des ultrasons	Profondeur d'exploration maximale
2,5 - 3,5 MHz	> 15 cm
5 MHz	10 cm
7,5 MHz	5-6 cm
10 - 12 MHz	2-3 cm

	Sang	Graisse	Muscle	Os
α/f (dB.m ⁻¹ .MHz ⁻¹)	0,1	0,5	1,5	10

7. Les ondes acoustiques comme véhicule de l'information

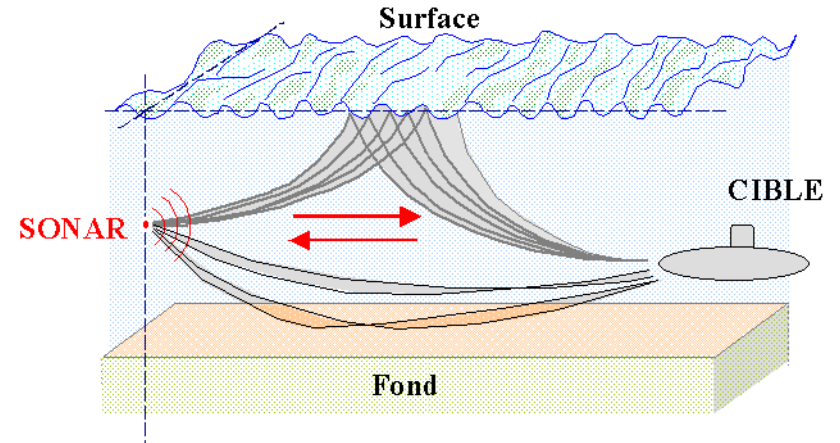
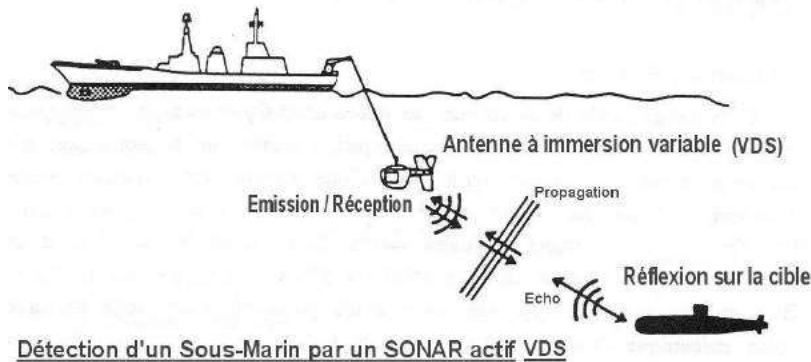
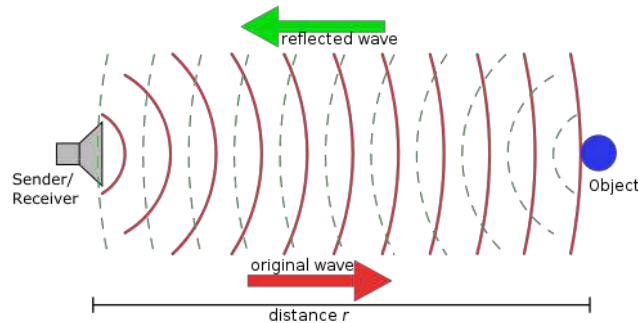
a) À l'écoute de la mer (acoustique sous-marine)





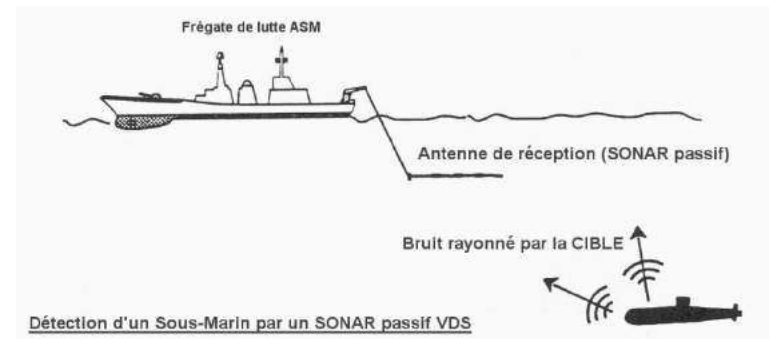
La crevette «claquante», qui aime les eaux chaudes peu profondes, emplît l'océan d'un son caractéristique dû à sa pince surdimensionnée : en refermant sa pince très rapidement (en haut), la crevette crée une bulle de cavitation qui, en disparaissant, engendre un claquement.

⇒ Le sonar



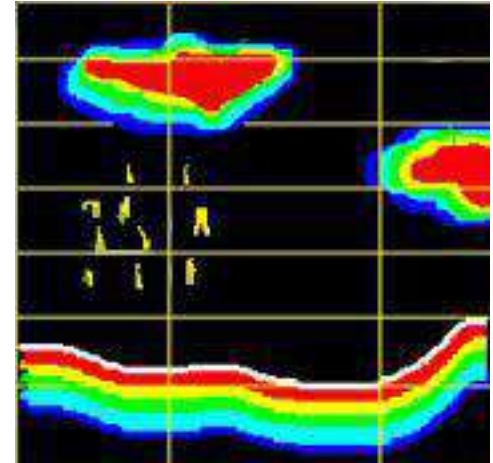
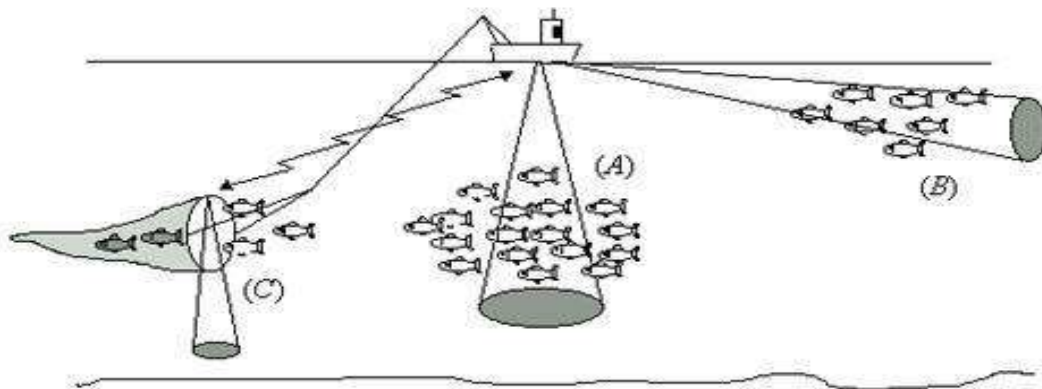
⇒ Militaire :

- ⇒ **Actif** : Emission d'ondes de fréquence plus ou moins hautes selon la distance.
- ⇒ **Passif** : Capte tous les bruits environnants.



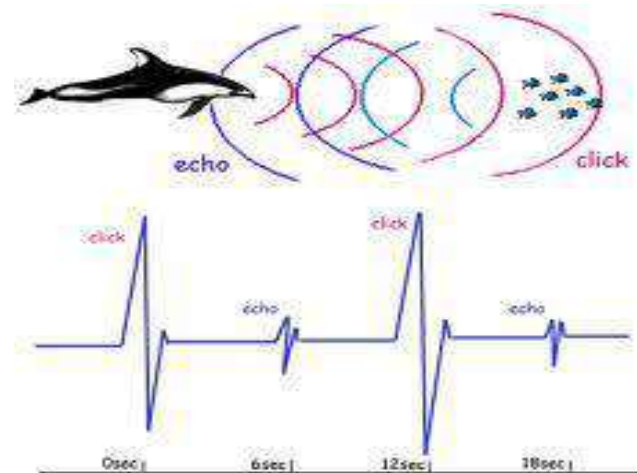
↪ Civil :

- ⇒ Cartographie
- ⇒ Détection de poissons
- ⇒ Navigation

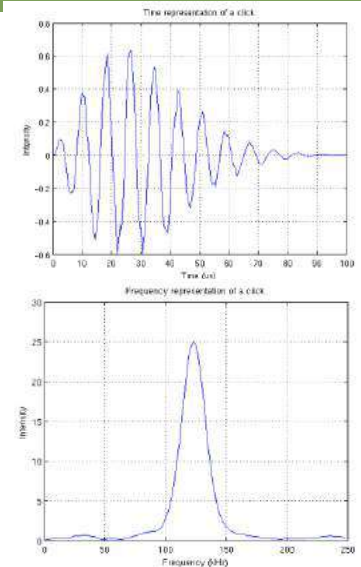
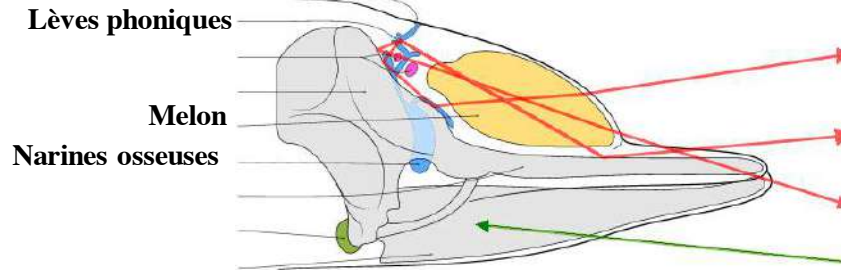


↪ Naturel :

- ⇒ Echolocation des dauphins



Echolocation des dauphins



L'émission

Le dauphin est capable d'émettre différents types de son, de fréquences variables, certains servant à communiquer, d'autres à se repérer dans l'espace. Chez le dauphin, une mécanique vibratoire explique aussi la production du son. Le principe est relativement simple, même si encore sujet à controverses. Il s'agit du principe des cavités de Helmholtz. Le dauphin possède des sacs d'air dont il peut ajuster la taille, afin d'émettre des sons à des fréquences de résonances variées. C'est le même principe qui permet d'émettre des sons lorsqu'on souffle à la perpendiculaire d'un goulot de bouteille. Selon la quantité de liquide dans la bouteille, on pourra émettre des sons plus ou moins aigus.

Lorsque le dauphin est en plongée, il emmagasine un certain volume d'air dans ses poumons, et il n'en relâche pas. Comme l'homme et ses deux narines, il possède deux conduits aériens parallèles, auxquels sont fixés des petits sacs d'air de taille variable, ce sont des cavités résonantes. Pour produire les sifflements, le dauphin utilise son larynx, comme l'homme. D'ailleurs, les sifflements sont généralement émis dans la gamme de fréquences audibles. Cependant, la mécanique vibratoire classique ne permet pas d'expliquer les capacités d'émissions à une centaine de kHz. En effet, les tissus du larynx ne peuvent pas vibrer à une fréquence si élevée. Ce sont des tissus contenant un liquide cristallin, les lèvres phoniques, qui génèrent ces fréquences élevées. Ce liquide cristallin a des propriétés de résonance à des fréquences beaucoup plus élevées que les tissus normaux. Les sons émis se propagent ensuite dans ce qu'on appelle le melon, la bosse cachée sous le front. Il s'agit d'une boule graisseuse qui joue le rôle d'une lentille acoustique focalisante. Elle permet de diriger une onde acoustique cohérente vers la zone spatiale située devant le dauphin.

b) À l'écoute du corps humain (imagerie acoustique)

⇒ Échographie médicale



- Modalité d'imagerie relativement peu coûteuse
- Temps réel
- "Non-invasive"
- Bien adaptée pour les tissus mous
- Rendue inefficace par les os, les gaz..
- Peut se miniaturiser

Echographie médicale



Affichage
et
Traitement
de l'image

Traitement
du signal

Electronique
de commande

Sonde

Principe de base

Utiliser le fait que, lors de l'émission d'une vibration mécanique dans un milieu, une partie de l'énergie revient vers "l'envoyeur" en fonction de la nature locale du milieu traversé

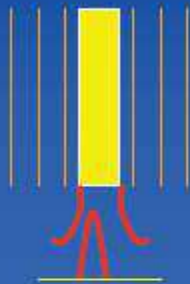


- Créer une impulsion mécanique (acoustique) la plus brève possible
- La confiner dans un faisceau étroit
- Déplacer et orienter ce faisceau
- Créer une image avec ce qui « revient » après chaque émission d'impulsion à l'intérieur de chacun des faisceaux
- Exploiter l'information contenue dans cette image.

Elément acoustique

création d'une impulsion mécanique

Elément piézo-électrique



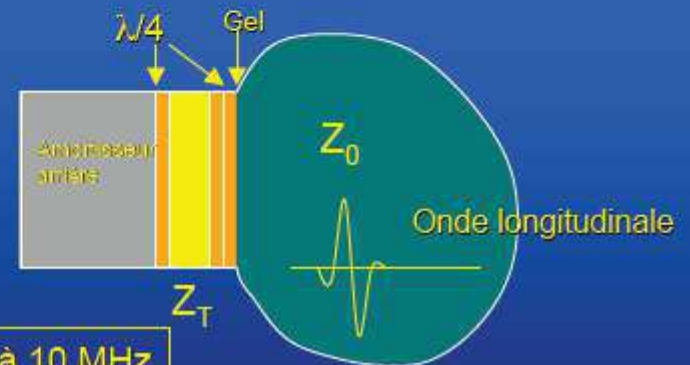
Génération d'ondes mécaniques



Réception d'ondes mécaniques

Chaque milieu a une caractéristique de propagation particulière : son impédance acoustique (ρc).
→ réflexions aux interfaces!

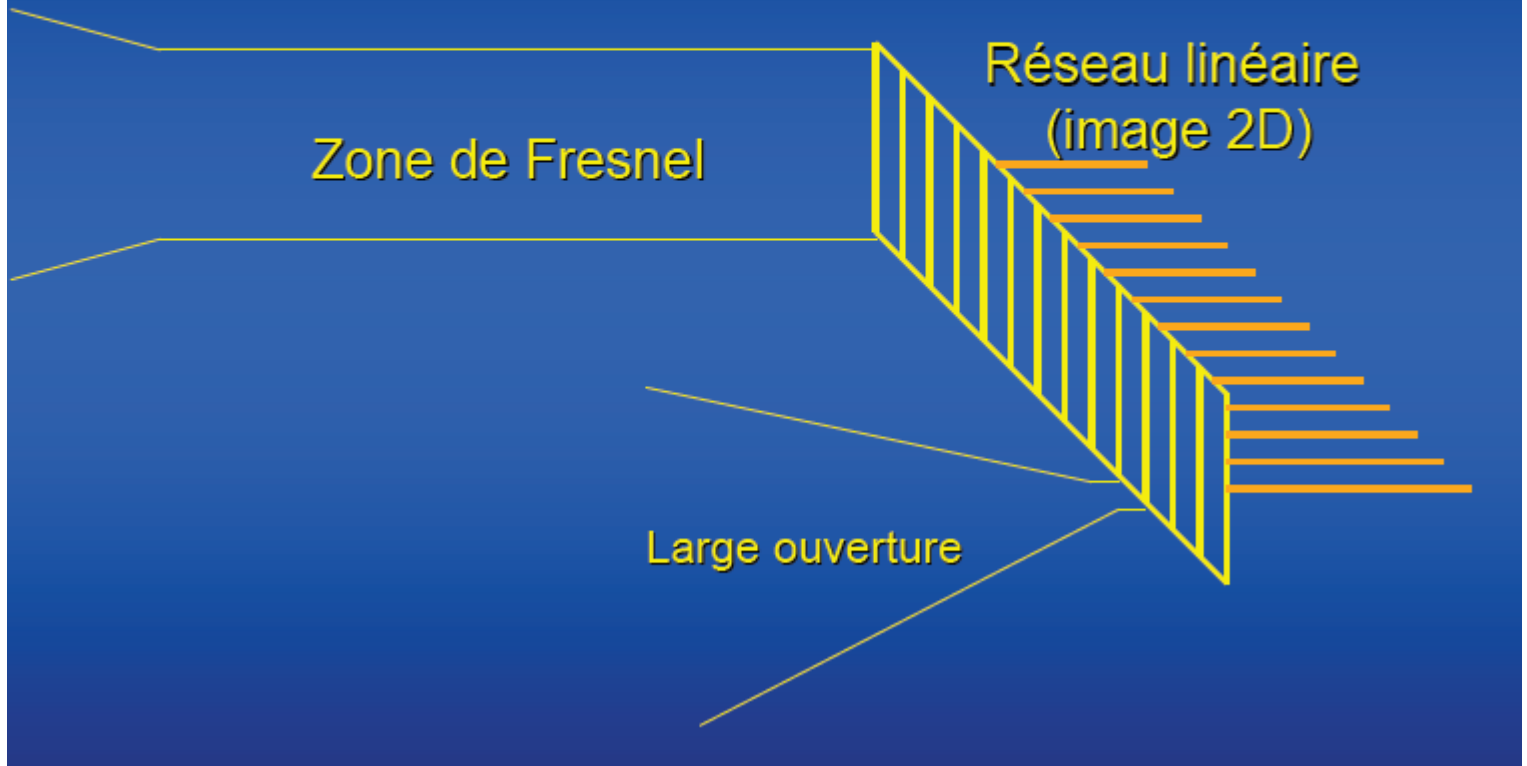
Nécessité de générer une impulsion brève
→ structure acoustique



Ordre de grandeur des fréquences utilisées: 3 à 10 MHz

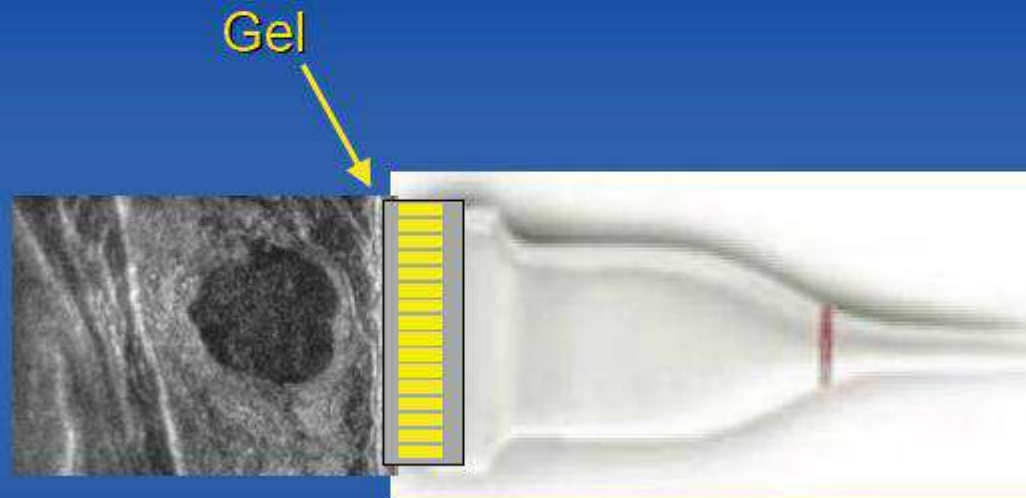
Elément acoustique:

Génération d'un faisceau acoustique

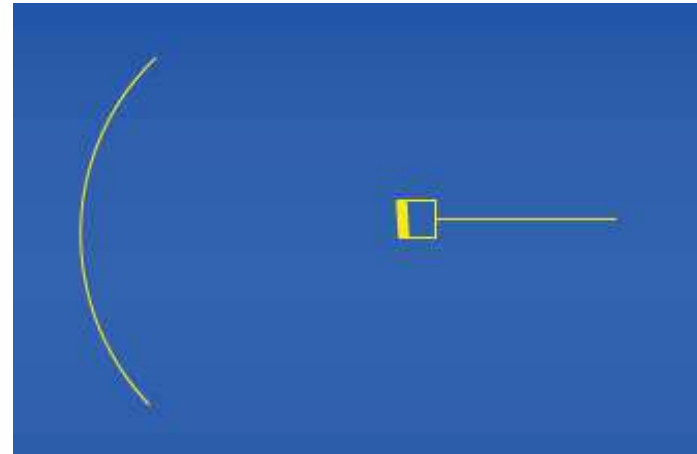
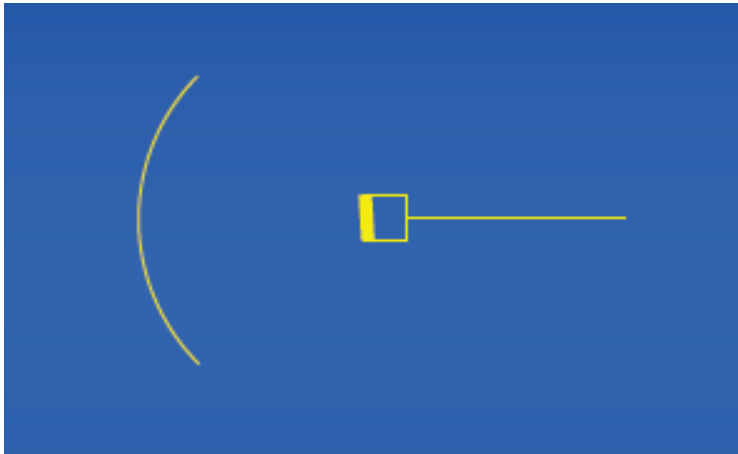
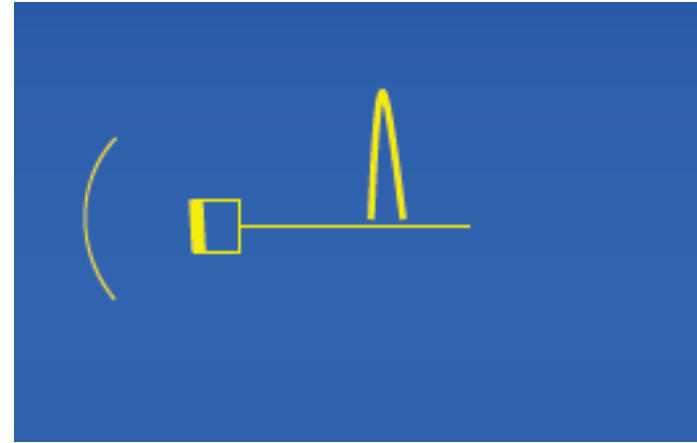


Formation d'images, principe

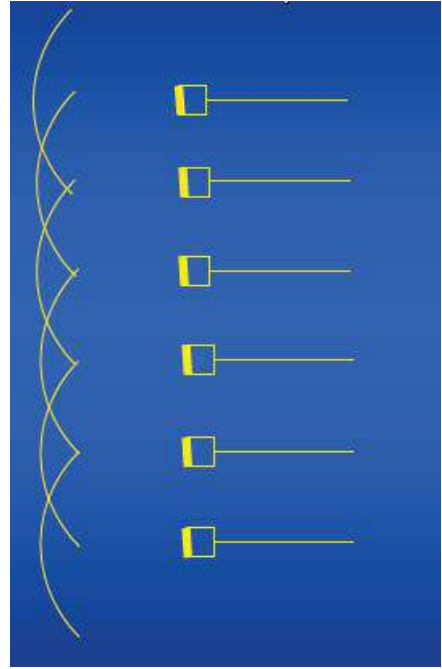
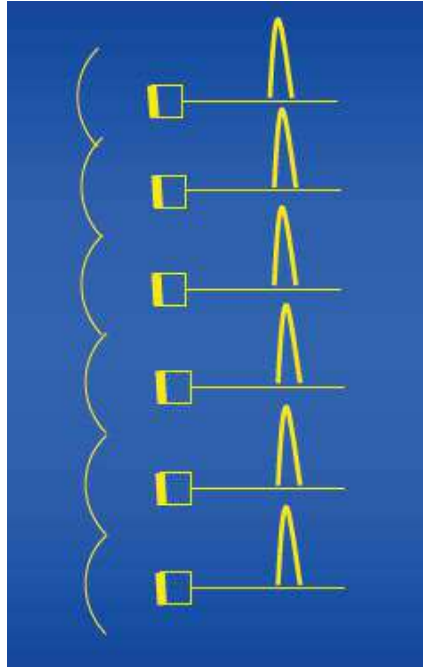
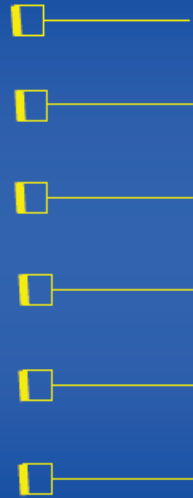
Génération d'un faisceau acoustique

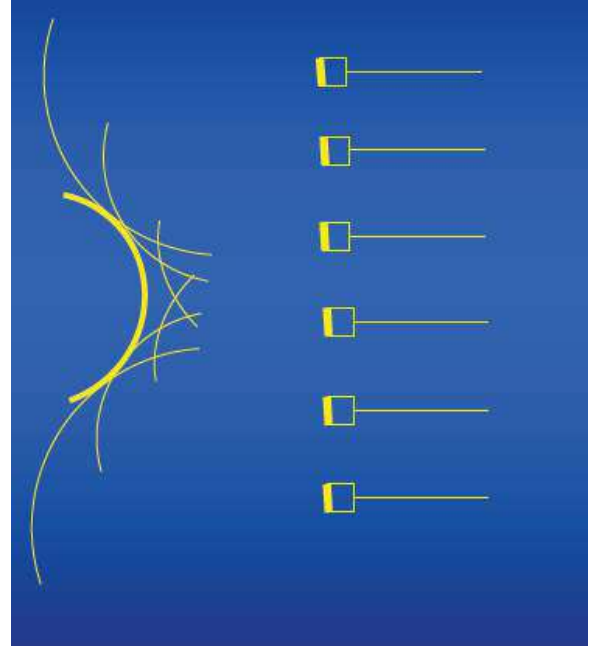
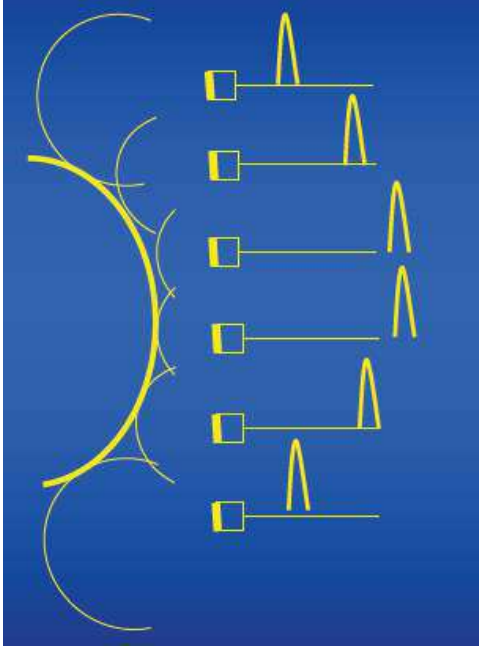
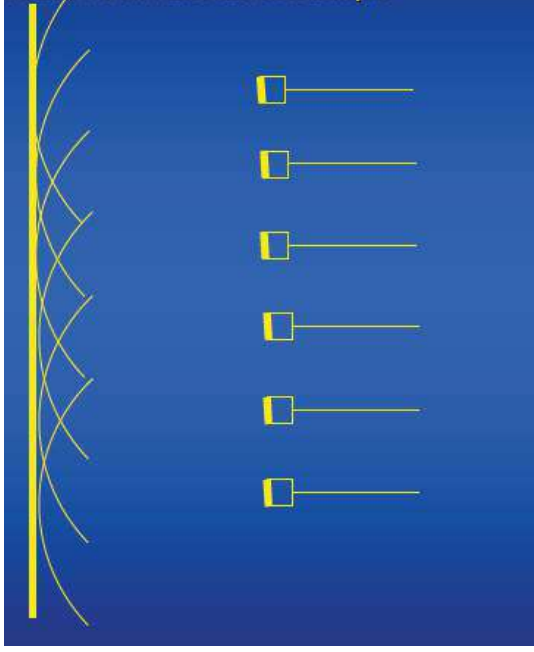


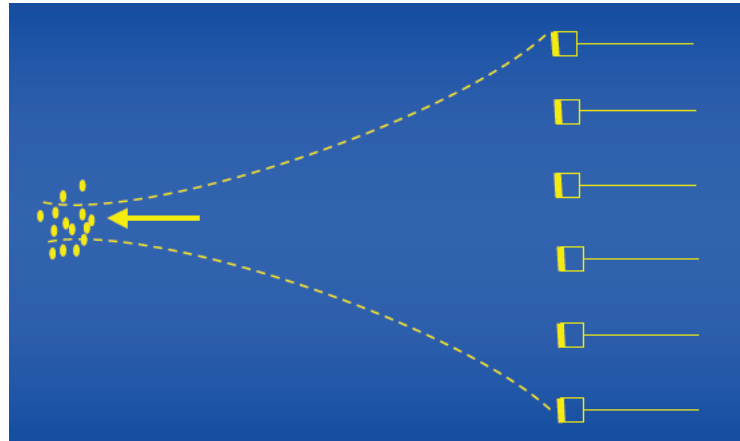
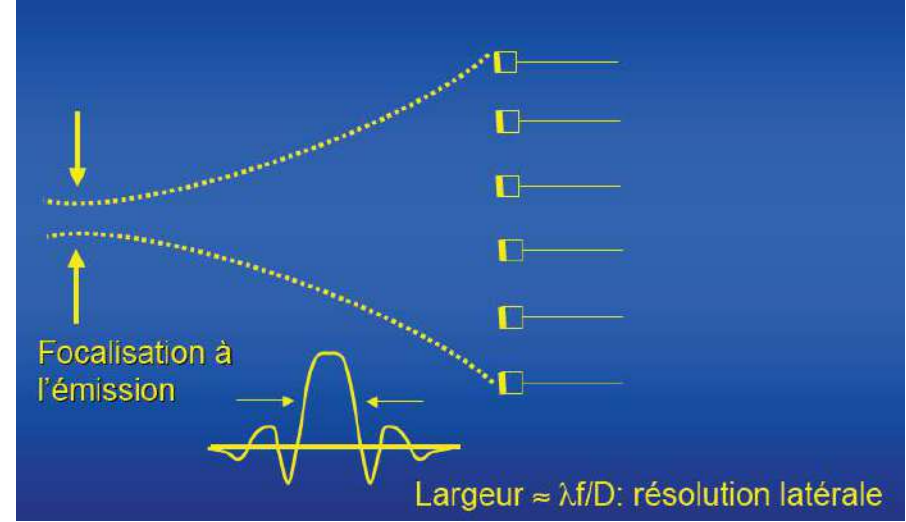
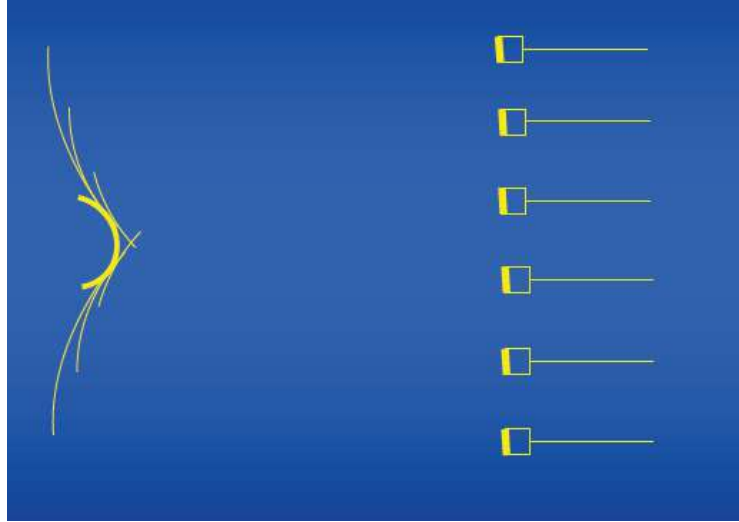
Génération d'un faisceau acoustique

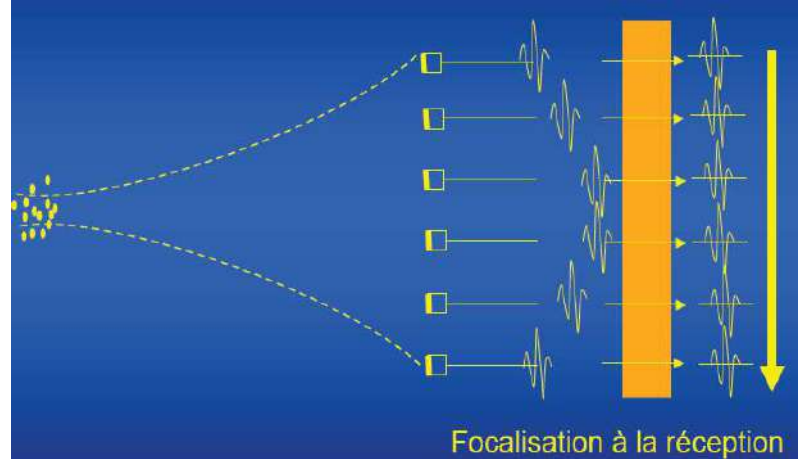
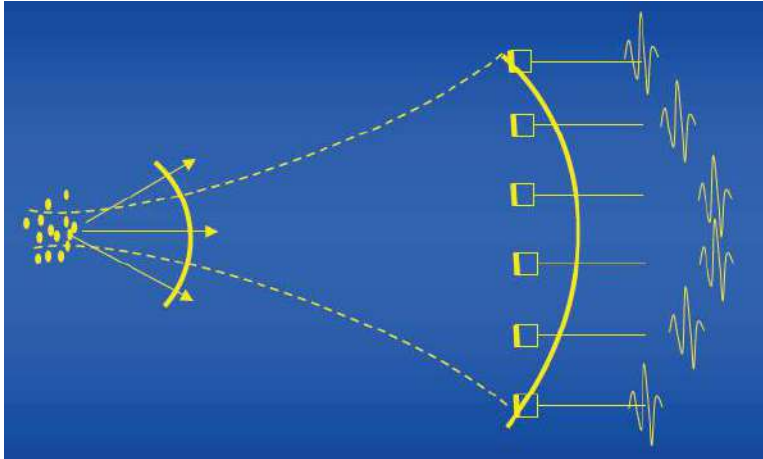
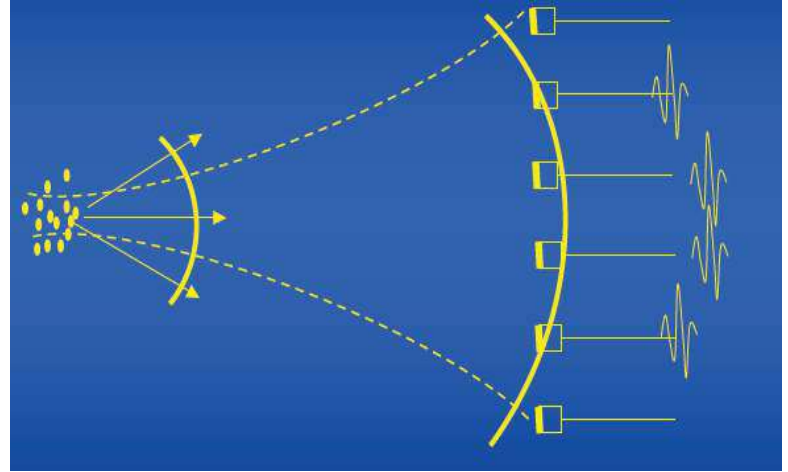
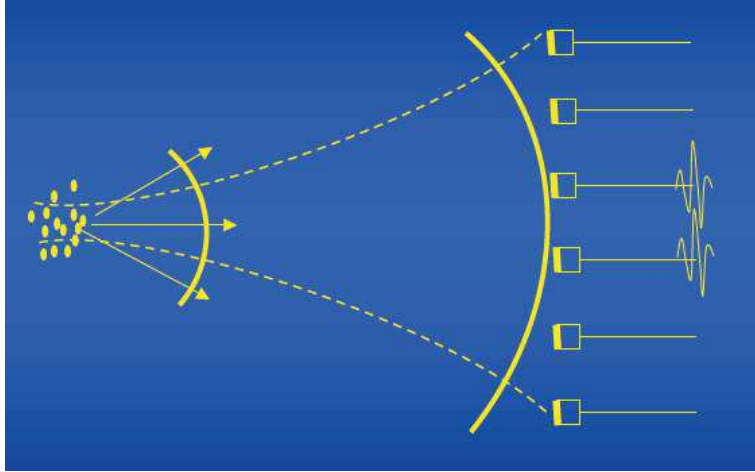


Génération d'un faisceau acoustique

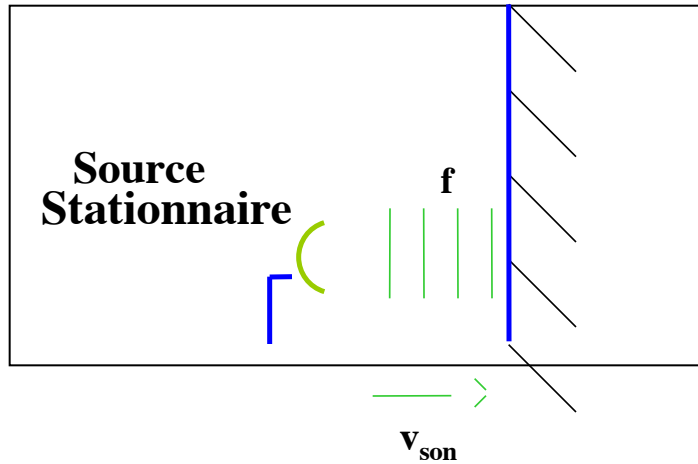




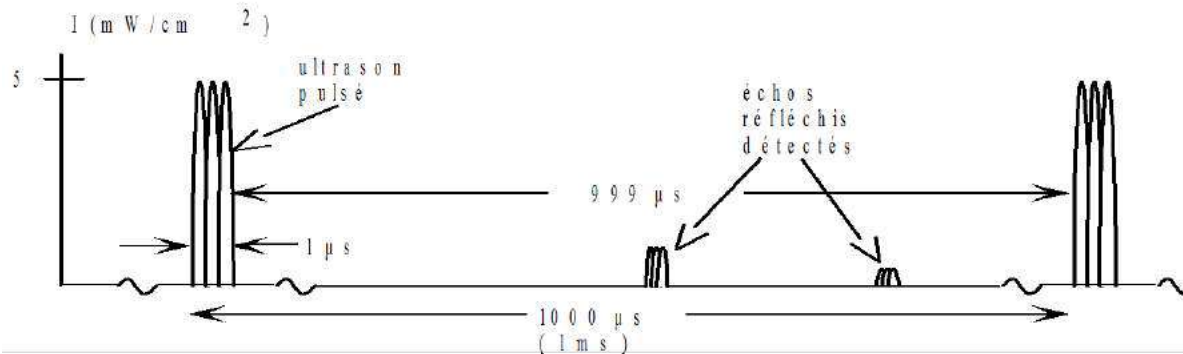
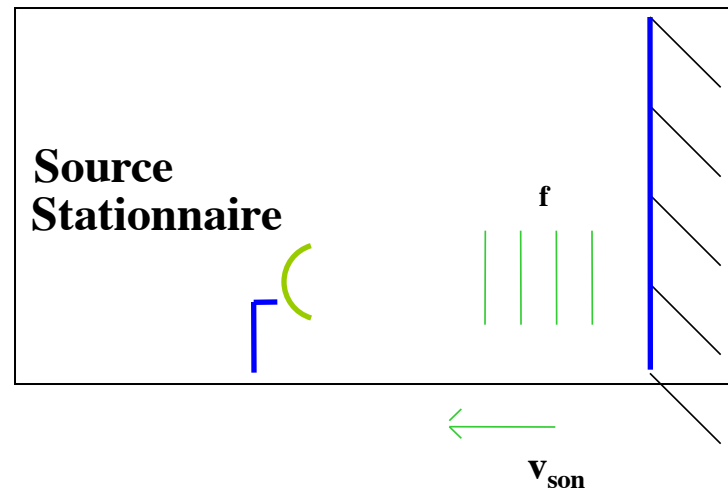




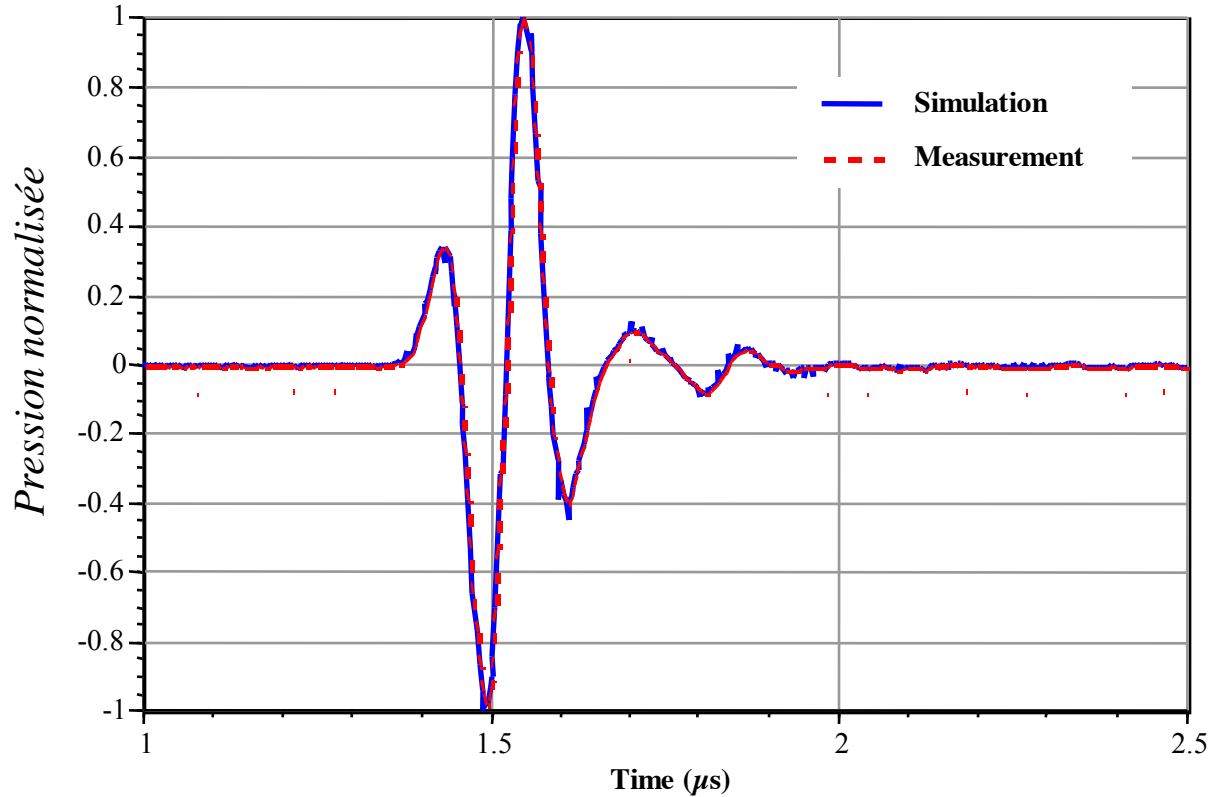
⇒ Mesure de distance

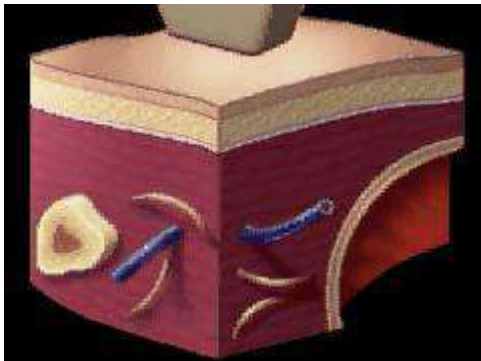


$$d = \frac{c\Delta t}{2}$$



Forme d'onde classique émise par un élément de réseau piezo-électrique





Génération et réception d 'ondes ultrasonores

- Réseaux de transducteurs piézoélectriques réversibles
- réseaux 1D de 128 à 512 transducteurs (1.5 D et 2D), pas d'échantillonnage $\lambda/2$
- Emission de pulses formés d'une oscillation de sinusoïde.
- Très bonne résolution axiale (correspondance temps/profondeur)
- Focalisation électronique pour la résolution latérale.
- Synthèse de lentilles acoustiques
- Imagerie de réflectivité : $Z = \rho_0 c_0$
- Milieu **faiblement** hétérogène

Milieu	c_0 (m.s ⁻¹)	ρ_0 (kg.m ⁻³)
Sang	1566	1060
Graisse	1446	960
Muscle	1542	1070
Foie	1566	1060

- Longueur d'onde typique : à 5 MHz, $\lambda = c_0/f = 0.3$ mm

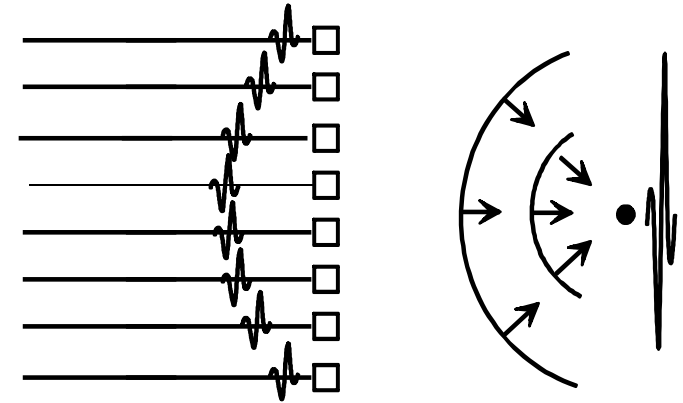
Focalisation électronique en milieu homogène : formation de l'image



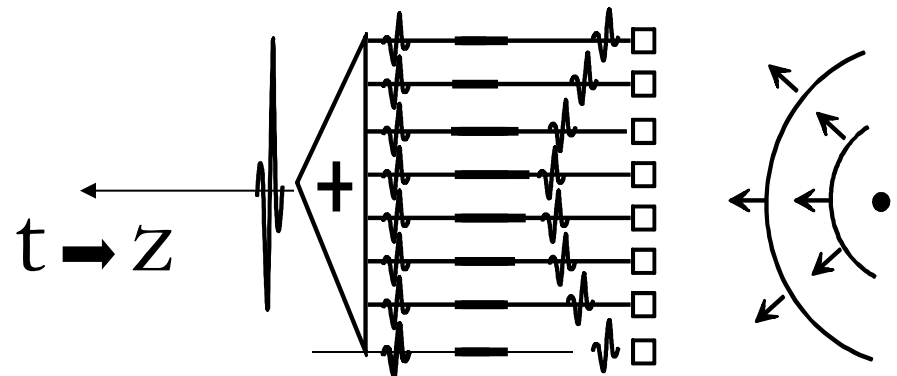
*Modélisation
par différences finies*

Maillage : 500 x 500 points
taille de la grille : 50 x 50 mm²
Codes Couleur : -40 à 0 db

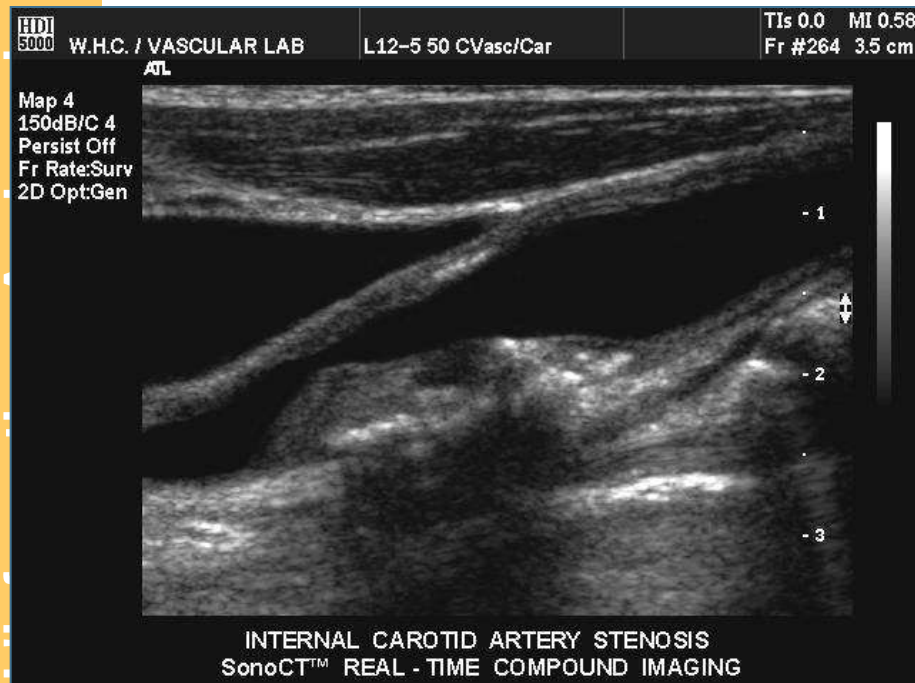
Focalisation à l'émission



Focalisation à la réception



- Approximation de la diffusion simple
- Diffuseurs de rayleigh répartis aléatoirement : bruit de “speckle”

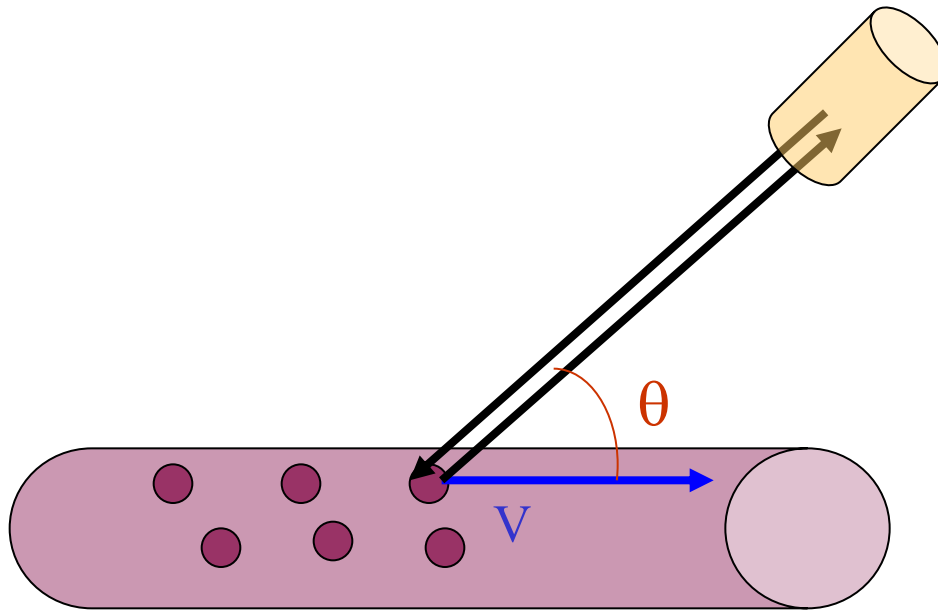


Avantages et inconvénients de l'échographie : exemples



- *Bruit de Speckle*
Difficulté d'analyse
- *Cadence d'images*
Imagerie fonctionnelle
incomparable

⇒ Échographie par effet Doppler



$$\Delta f = \frac{2 f v_s \cos \theta}{v}$$

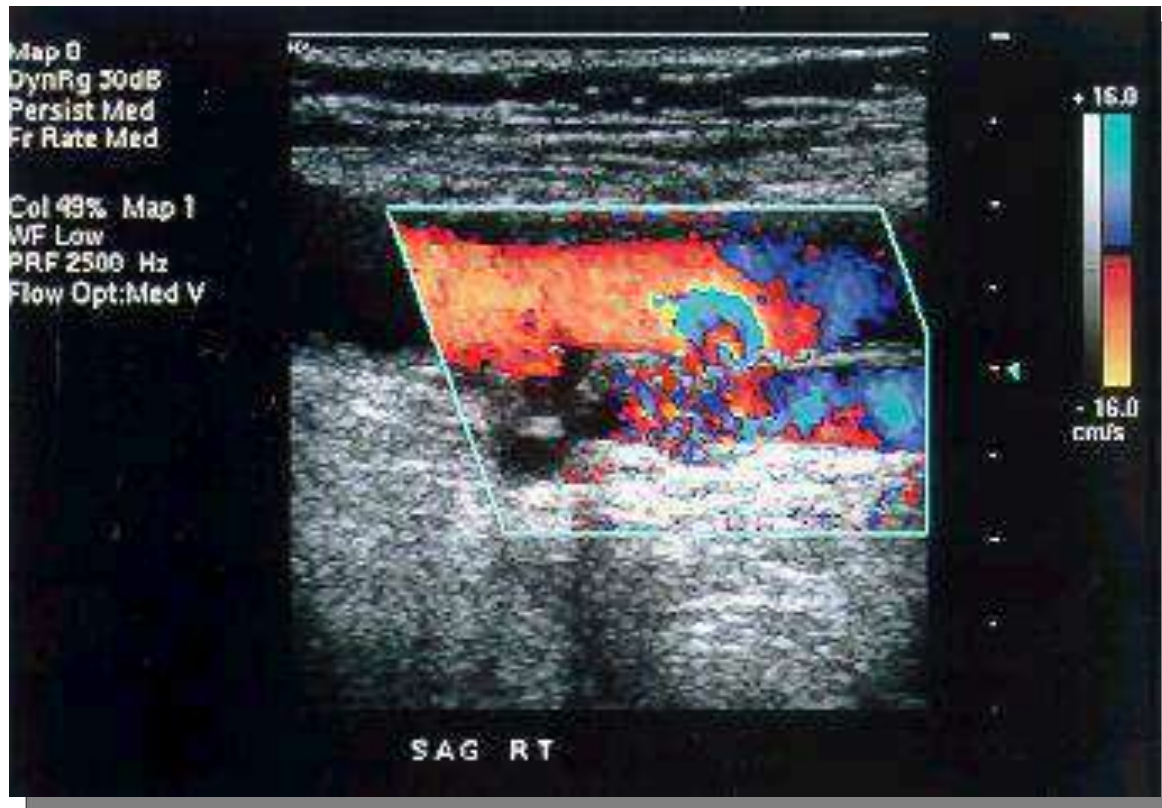
$$v_s = \frac{\Delta f}{2 f \cos \theta} v$$

f = fréquence de l'onde émise

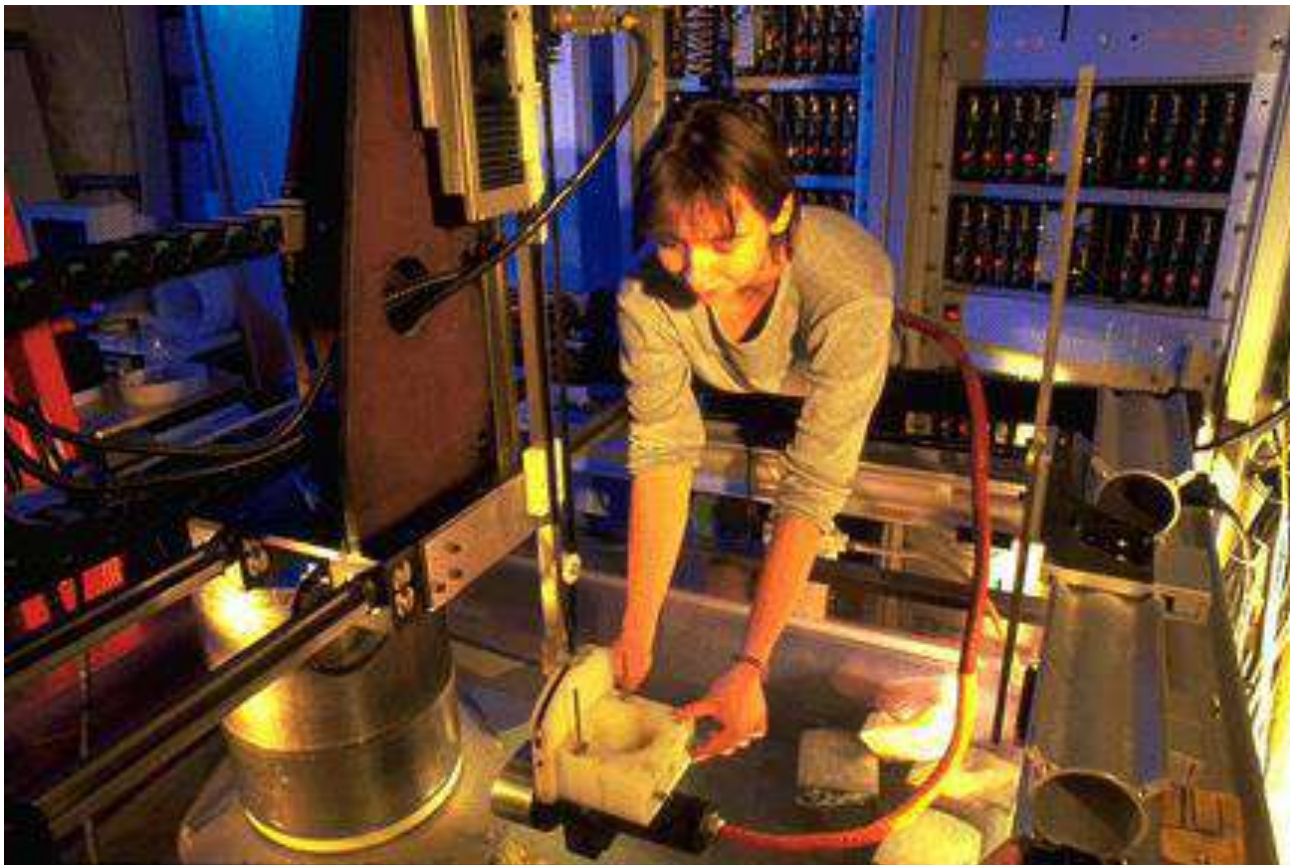
v_s = vitesse de la source

v = vitesse de l'onde sonore dans le milieu

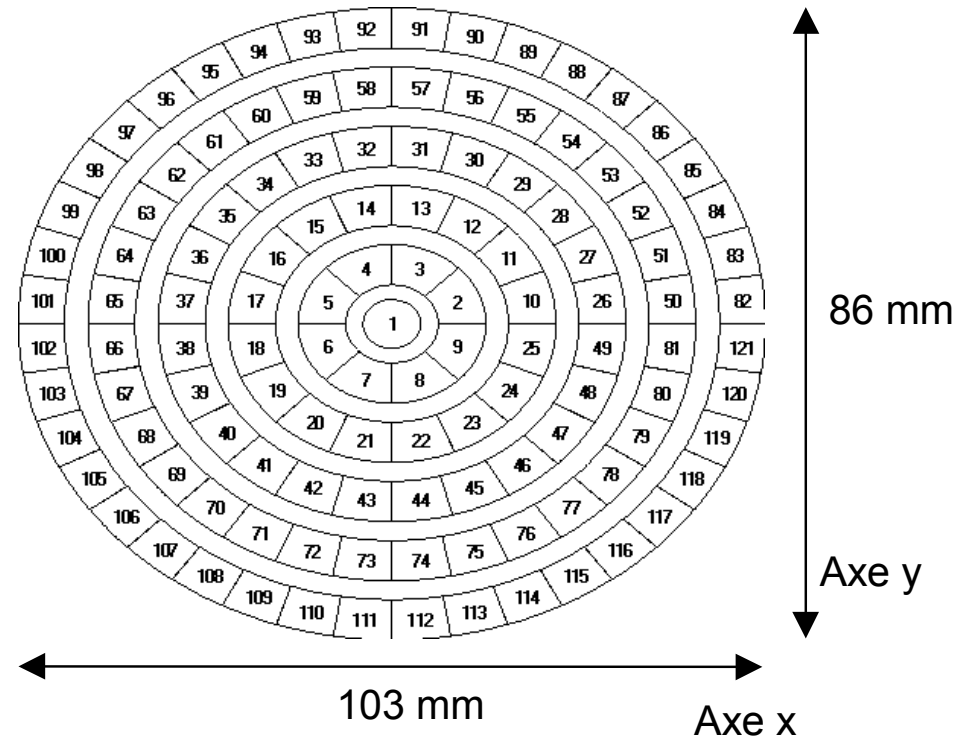
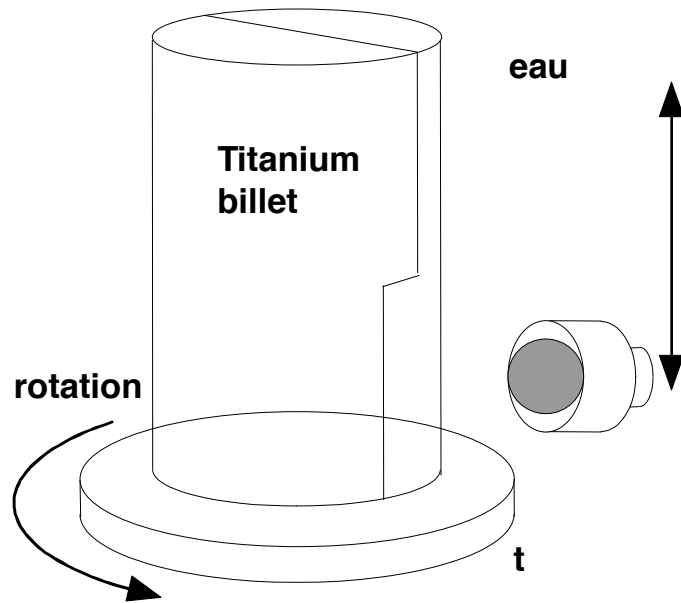
θ = angle entre la ligne de “visée” et la direction du mouvement.



c) À l'écoute des matériaux (contrôle non destructif par ultrasons)

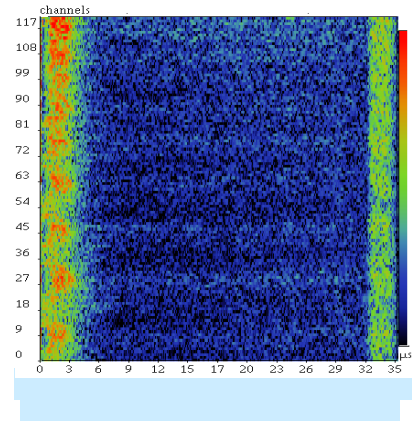
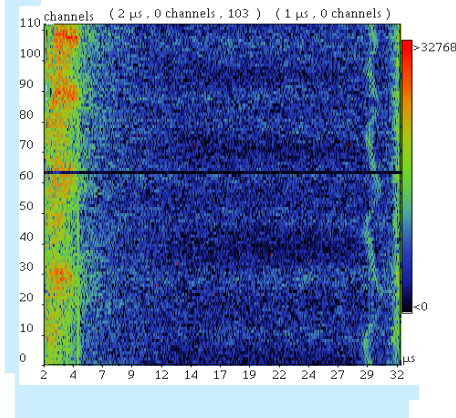


Array of 128 transducers 5 MHz central frequency

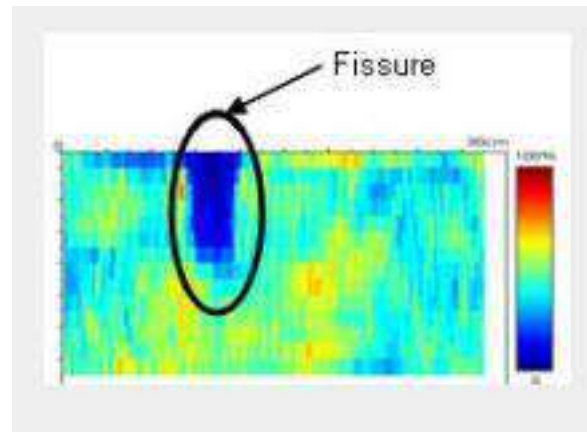


L'information : A – La voix

Zone with
a flat
bottom
hole at
140mm
depth



Zone
without
defect
(speckle)



d) À l'écoute de la terre (sismologie)

