

Introduction aux techniques audio-numériques

S. Natkin

Janvier 2008

Éléments d'acoustique

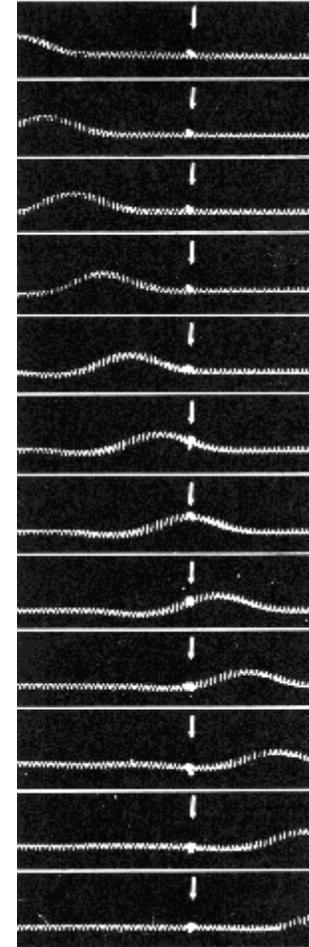
S. Natkin

Février 2004

Ondes (1)

LE SON EST LA PROPAGATION
D'UNE ÉNERGIE MÉCANIQUE
DANS UN MILIEU ÉLASTIQUE
(AIR, L'EAU,...)

LA LUMIÈRE EST LA PROPAGATION
D'UNE ÉNERGIE
ELECTRO-MAGNETIQUE

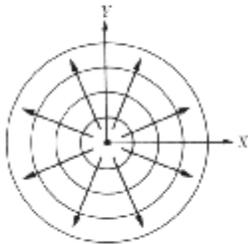


Déplacement d'une onde sur un ressort

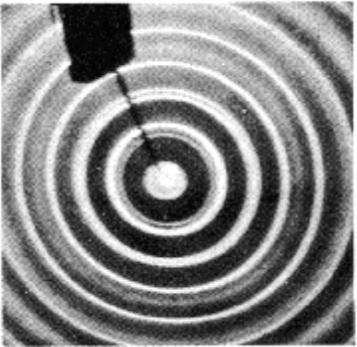
(AF)
RSX205 CNAM PARIS 2008

Ondes (2)

Ondes planes (AF)

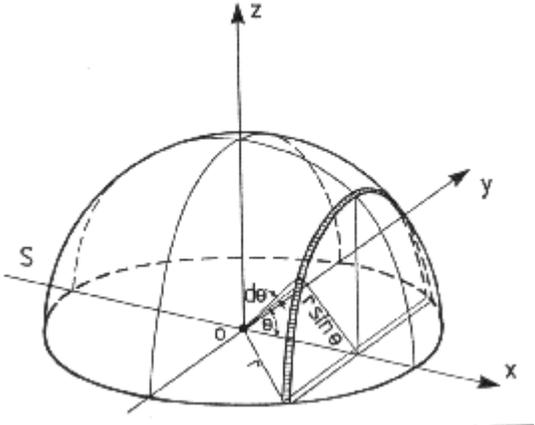


(a)



(b)

Ondes sphériques



Caractéristiques d'une onde

Période: T (s)

Fréquence fondamentale : $F=1/T$ (Hz)

Célérité C (m/s)

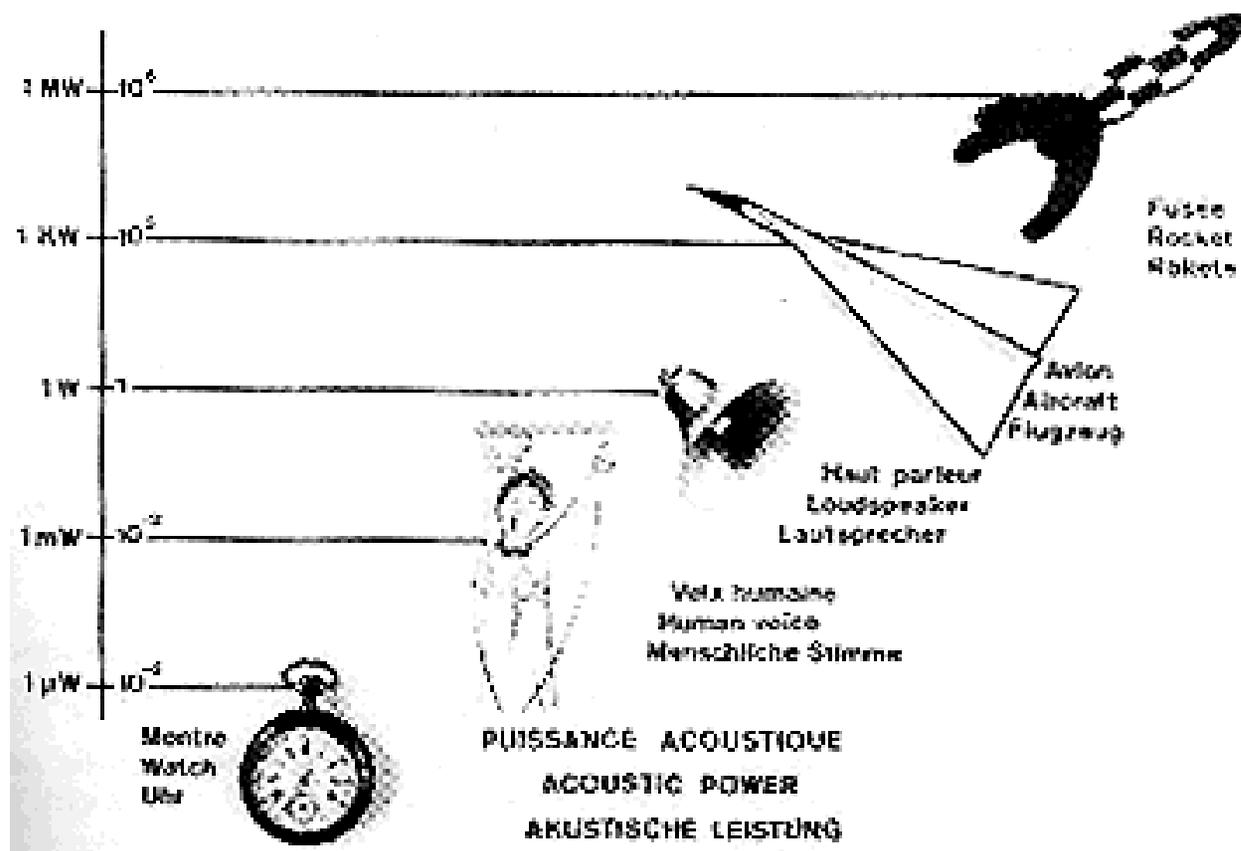
Longueur d 'onde: $L=CT$ (m)

Une onde sonore a une célérité de 330m/s A 16 ° C dans l'air

Une onde électromagnétique à une célérité de
300 000 km/s dans le vide

200 000 Km/s dans un conducteur comme le cuivre

Dynamique de la puissance sonore



Echelle logarithmique le Décibel

On mesure la puissance d'un son sur une échelle logarithmique de décibel

$$P=10.\log(S/N)$$

Ou N est la puissance d'un son de référence de 10^{-12} watts

On mesure selon le même principe d'autre rapports (rapport signal/bruit par exemple)

Ceci caractérise certains effets de perception acoustique

Ajouter 2 sons de même puissance p produit une augmentation de 3 dB

$$P=10 \log(2p)=10.\log(2)+10 \log(p)= 10 \log(p)+3dB$$

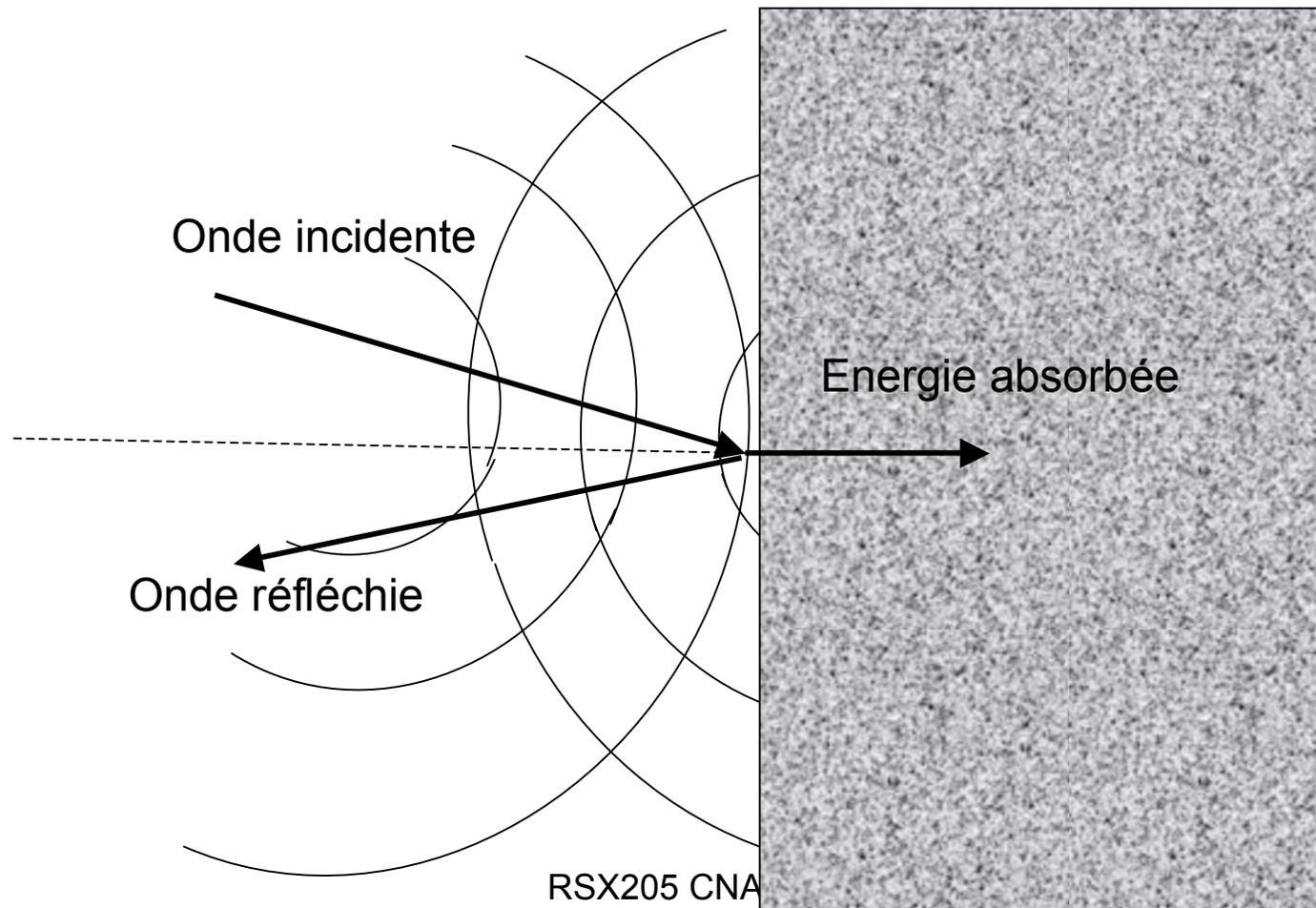
Ajouter un son de puissance p et un son plus faible ($p/10$)

$$P=10 \log(1,1p)=10.\log(1,1)+10 \log(p)= 10 \log(p)+0,4dB$$

Mesure des sons perçus

P Watt	P/Pr	DbA	Exemple	
1E+6	1E+17	170	Fusée	
1000	1E+14	140	Seuil de la douleur	
1	1E+11	110	Coup de marteau sur une plaque d'acier	Grosse caisse à 3m
0,001	1E+8	80	Usines et ateliers	Piano à 3m
1E-6	1E+6	50	Petit magasin	Clarinette à 3m
1E-08	1000	30	Auditorium	
1E-10	10	10	Chuchotement	

Propagation des ondes: modèle géométrique

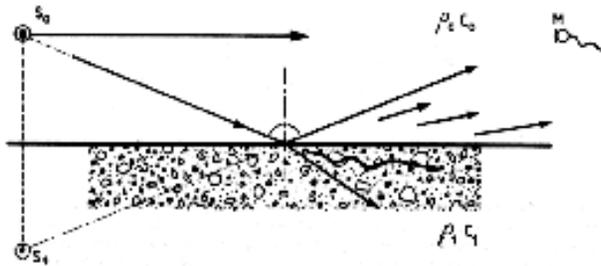


Spectre et longueur d'onde

- Spectre audible: 30Hz et 20 Khz
- Longueur d'onde comprise entre $330/30=11\text{m}$ et $330/20000=1,6\text{ cm}$

Ordre de grandeur de la perception physique

Acoustique géométrique: effets de diffusion et de diffraction des ondes sonores

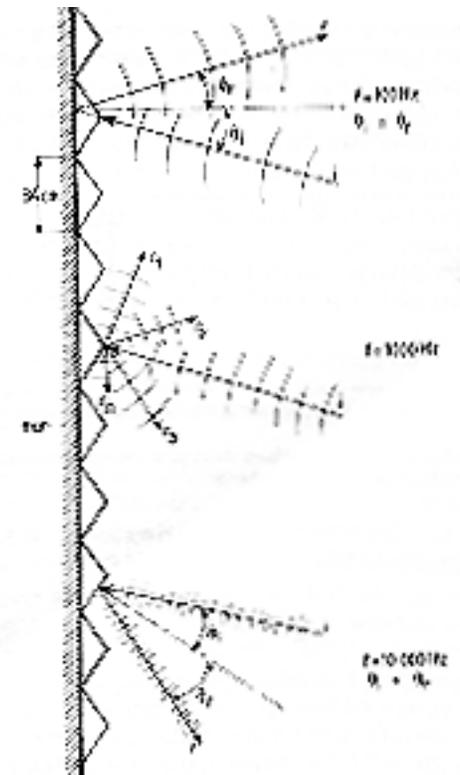


Réflexion et diffusion
Sur une paroi (TS)

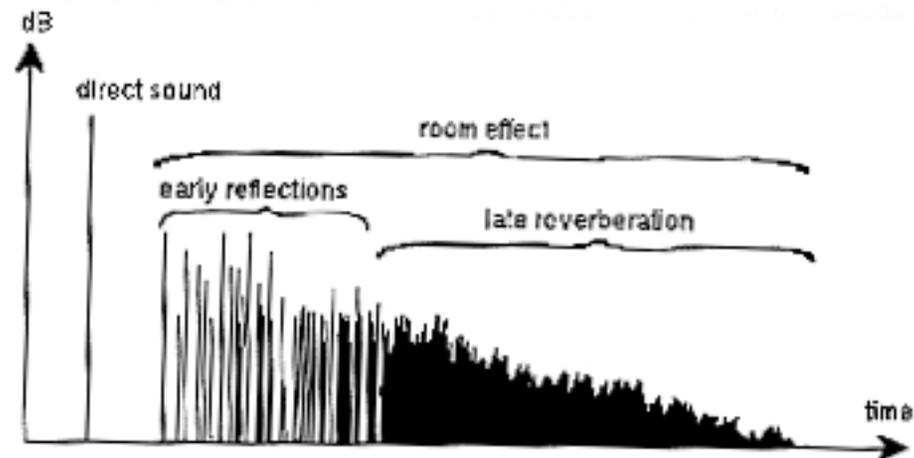
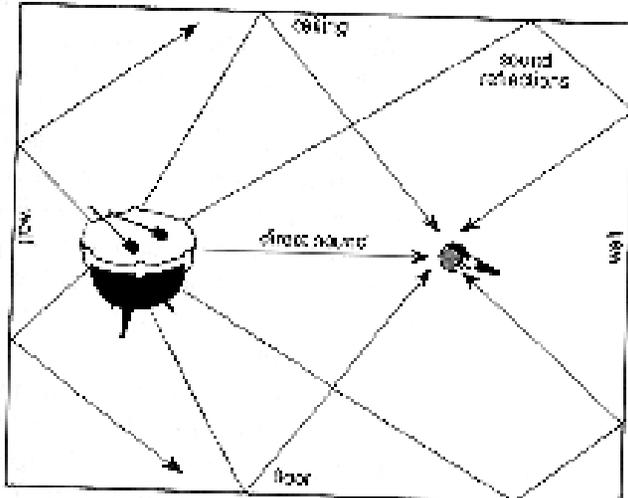
$\lambda \ll l = 100 \text{ Hz}$: réflexion sur le pan du mur.

$\lambda \approx l = 1000 \text{ Hz}$: réflexion diffuse.

$\lambda \gg l = 1000 \text{ Hz}$: réflexion sur la partie inclinée de l'accident de surface.



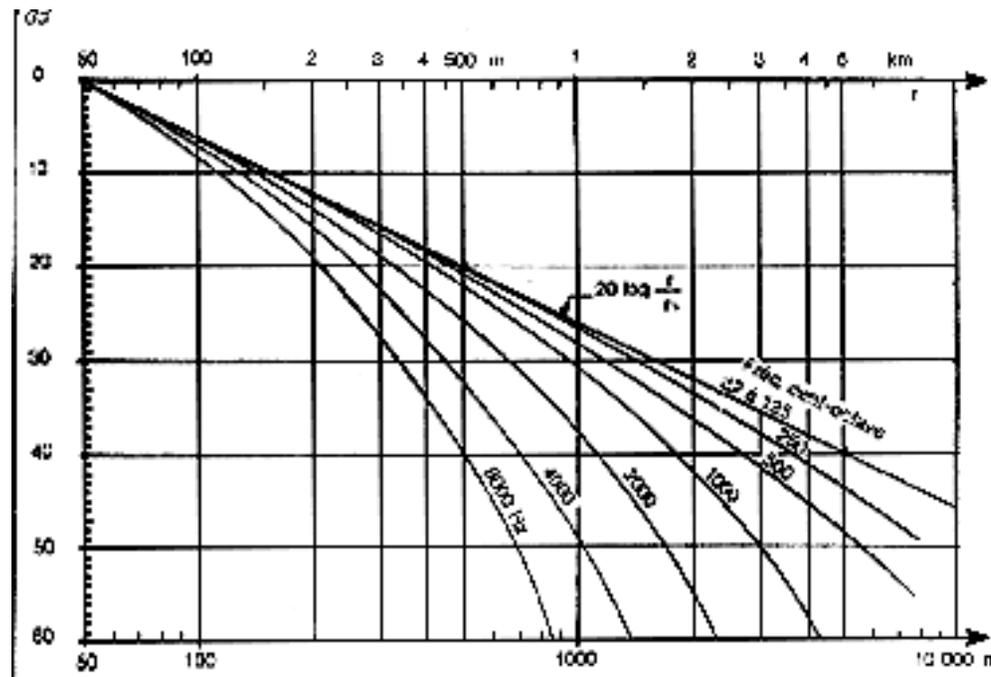
Effet de réverbération



Transformation physique du son

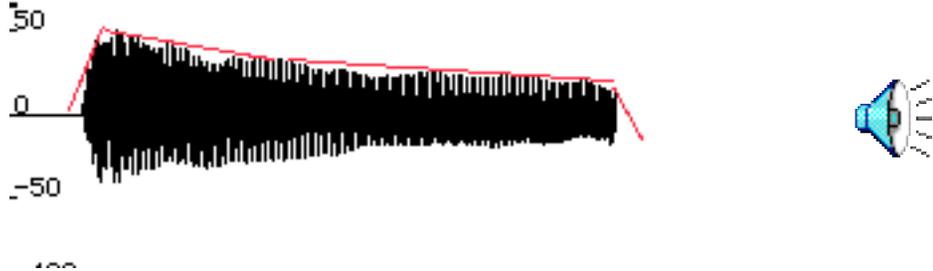
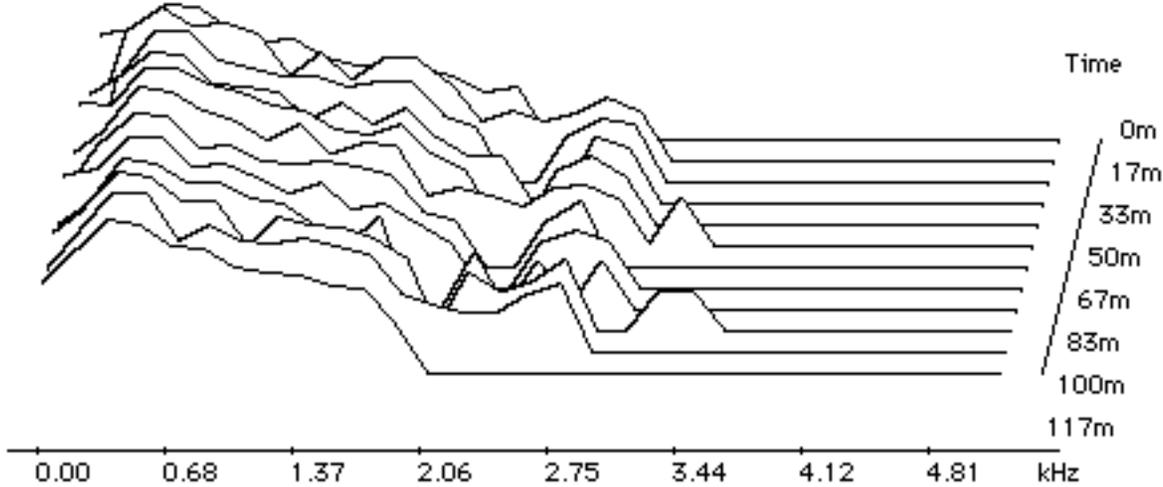
Une vibration initiale d'un objet est transformée par:

des phénomènes d'ondes stationnaires : relations entre le son initial et les fréquences propres de "la salle"
l'affaiblissement lie à la propagation dans l'air

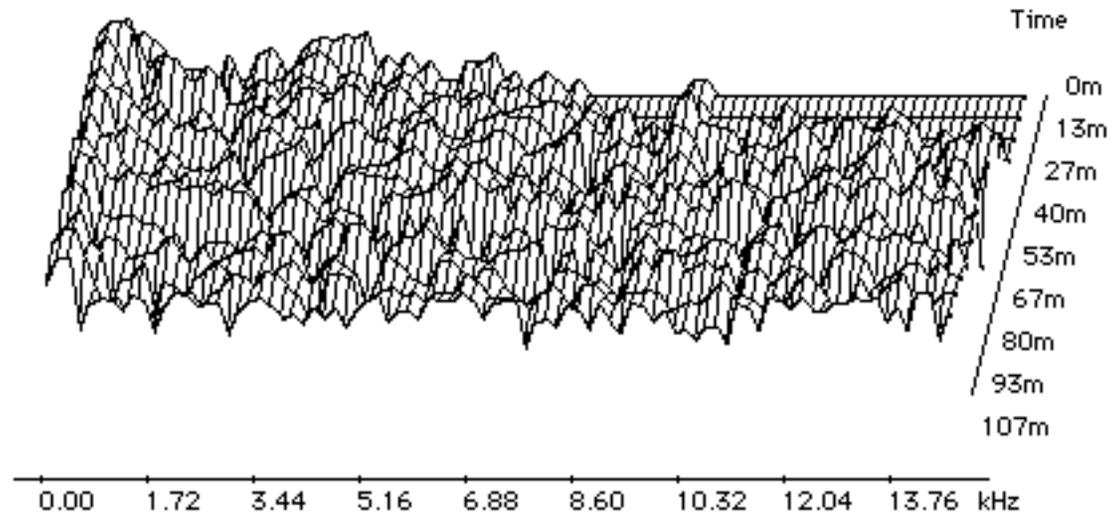
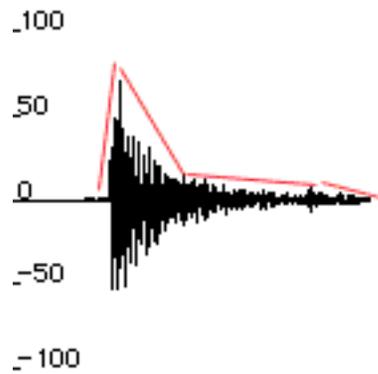


RSX205 CNAM PARIS 2008
Courbes d'atténuation de la puissance sonore en fonction de la distance (TS)

Enveloppe d'amplitude: piano



Enveloppe d'amplitude: percussion

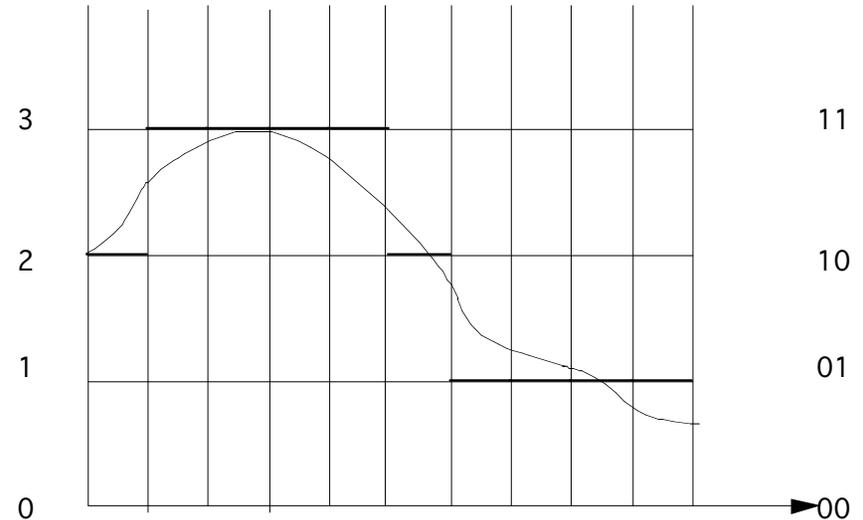


Introduction au traitement du signal

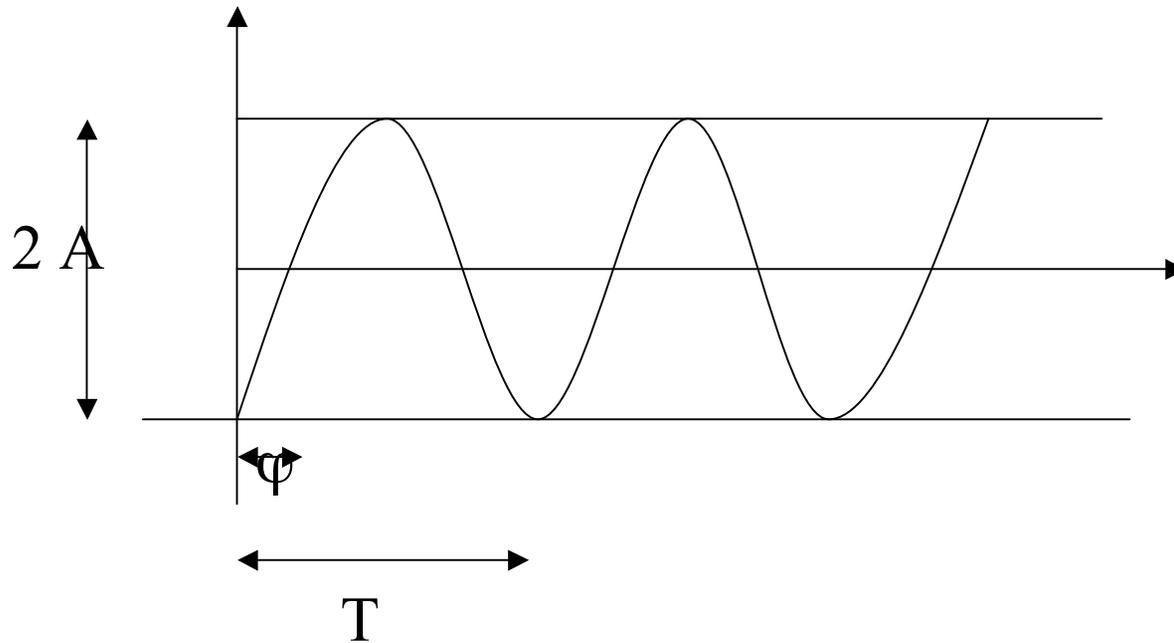
Signaux

Toute information physique est perçue comme une grandeur variant dans le temps (signal)

Numérisation \Leftrightarrow
échantillonnage dans le temps et l'espace:
10111111111001010101



Quelques types de signaux (1)



Sinusoidal

$$y = A \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

A amplitude

φ phase

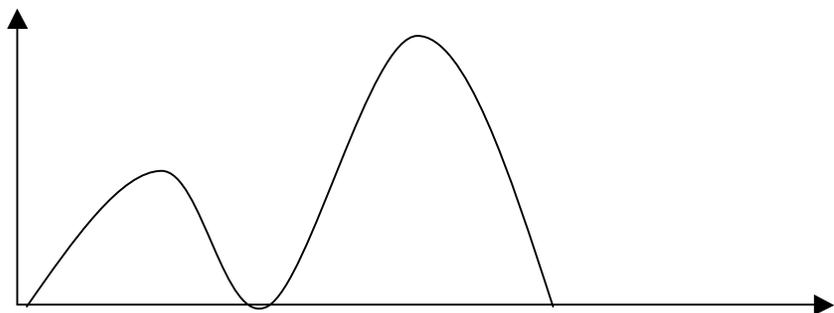
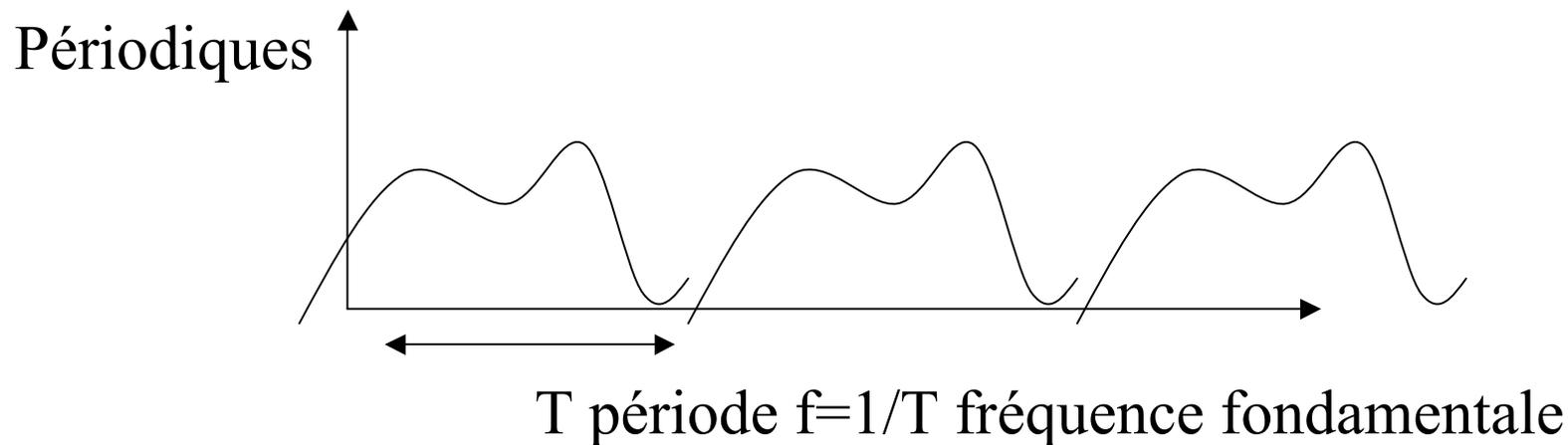
ω pulsation

T période (s)

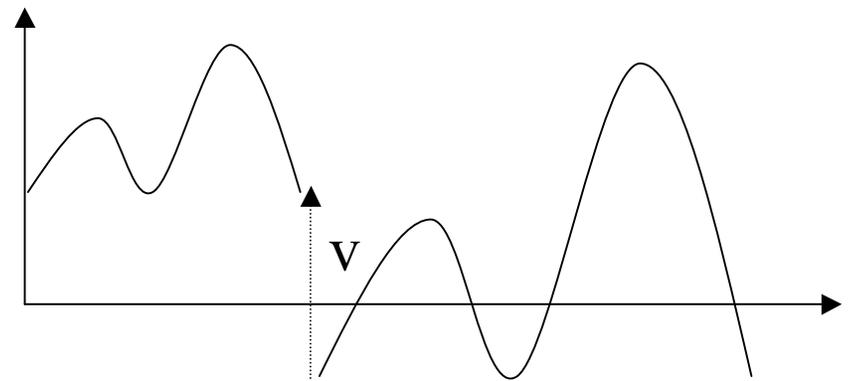
$f = 1/T$ fréquence fondamentale

$$\omega = 2\pi f = 2\pi/T$$

Quelques types de signaux (2)

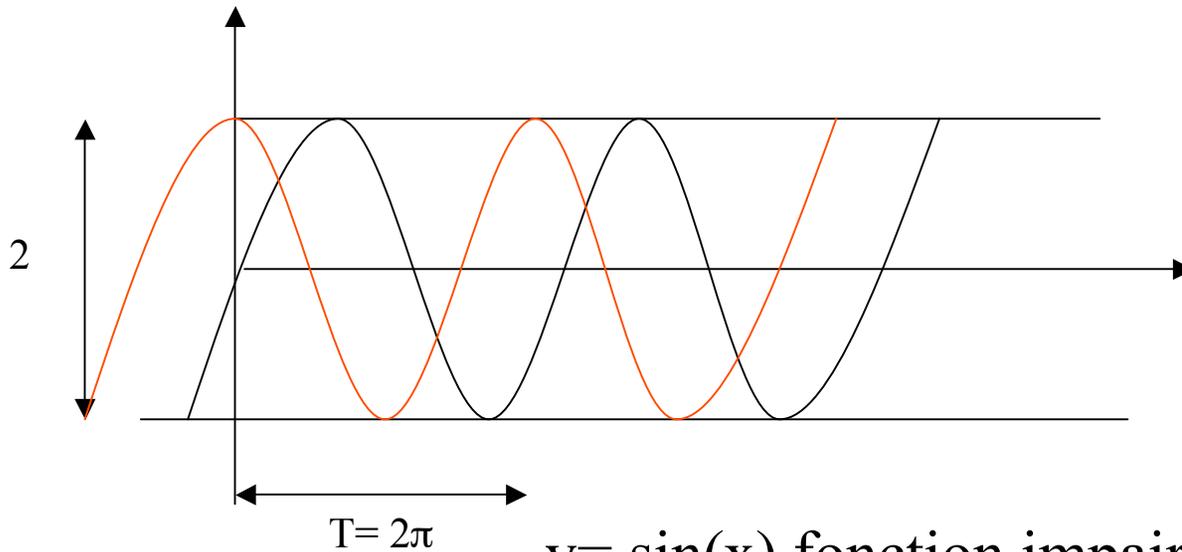


A support borné



A variation bornée ($v < B$)

Un peu de trigo de base



$y = \sin(x)$ fonction impaire ($f(-x) = -f(x)$)

$y = \cos(x)$ fonction paire ($f(-x) = f(x)$)

$\sin(x + \pi/2) = \cos(x)$

$\sin(a+b) = \sin(a)\cos(b) + \cos(a)\sin(b)$

$\cos(a+b) = \cos(a)\cos(b) - \sin(a)\sin(b)$

$A \cdot \sin(\omega t + \varphi) = A \sin(\omega t)\cos(\varphi) + A \cos(\omega t)\sin(\varphi)$



Représentation spectrale des signaux

Tout signal périodique borné et intégrable peut se représenter comme une série de fonctions sinusoïdales dont les fréquences sont des multiples de la fréquence fondamentale (série de Fourier).

Soit P l'intervalle d'amplitude T (une période)

$$\begin{aligned} f(t) &= \sum_{n=0, \infty} c_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \\ &= \sum_{n=0, \infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)) \end{aligned}$$

avec

$$\omega = 2\pi f = 2\pi / T$$

$$b_n = c_n \cos(\varphi_n)$$

$$a_n = c_n \sin(\varphi_n)$$

et

$$a_0 = 1/T \int_P f(t) dt$$

$$a_n = 2/T \int_P f(t) \cos(n\omega t) dt$$

$$b_n = 2/T \int_P f(t) \sin(n\omega t) dt$$

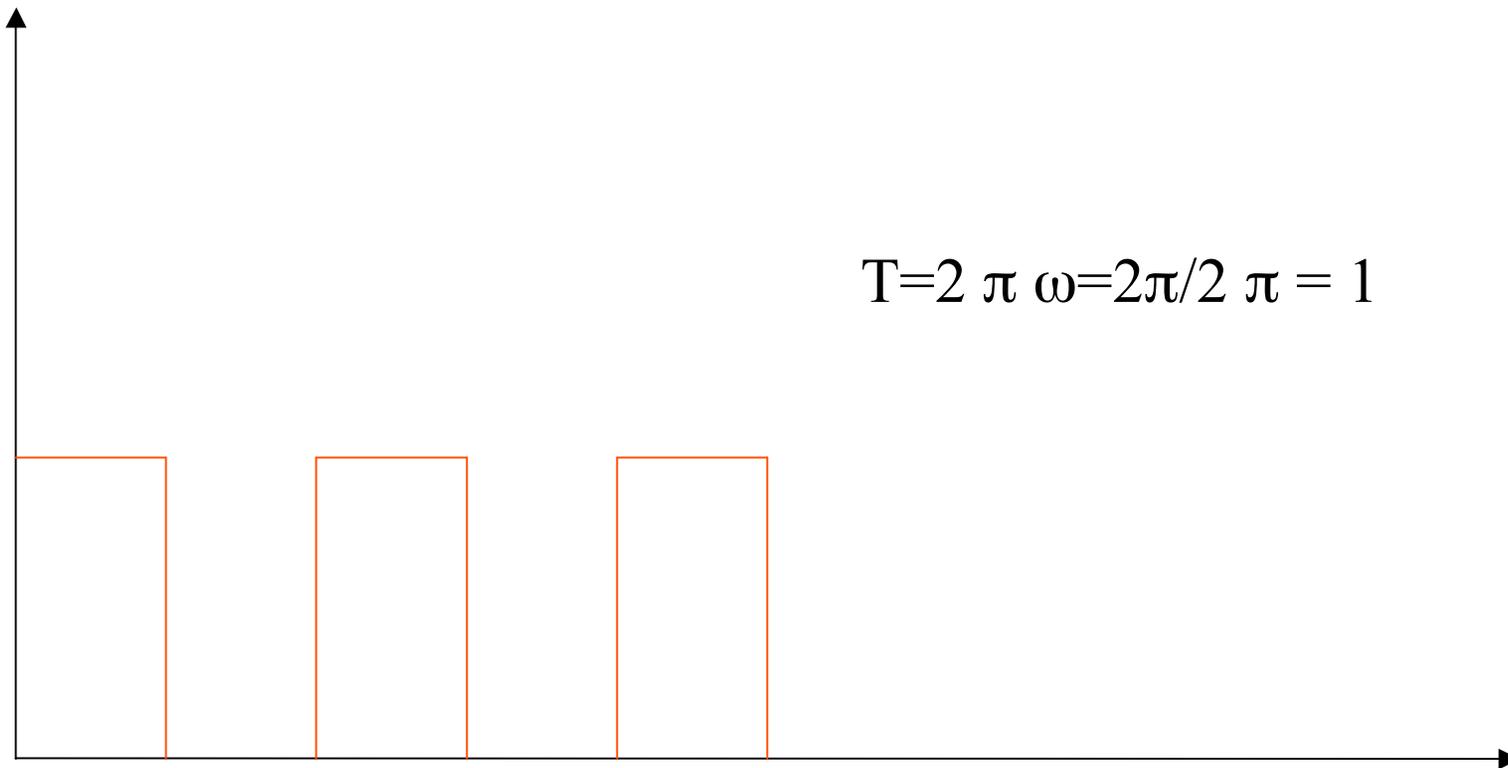
Représentation spectrale des signaux (2)

f est la fréquence fondamentale

$f_n = n/T = n.\omega/2\pi$ sont appelés les harmoniques

a_0 est la composante continue

Exemple signal d 'horloge



Signal d'horloge (2)

$$a_0 = 2 / 2\pi \int_0^\pi f(t) dt = 1$$

$$a_n = 0$$

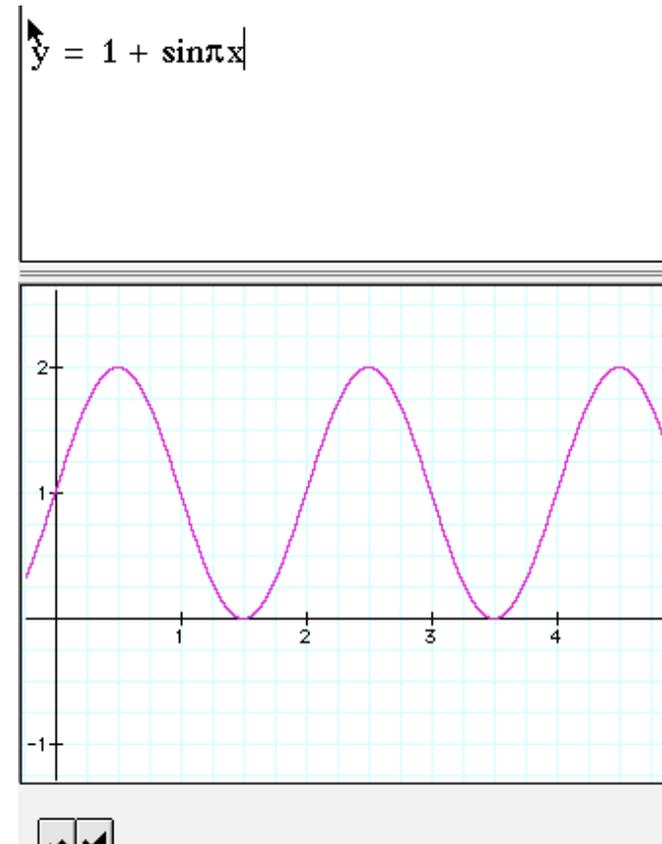
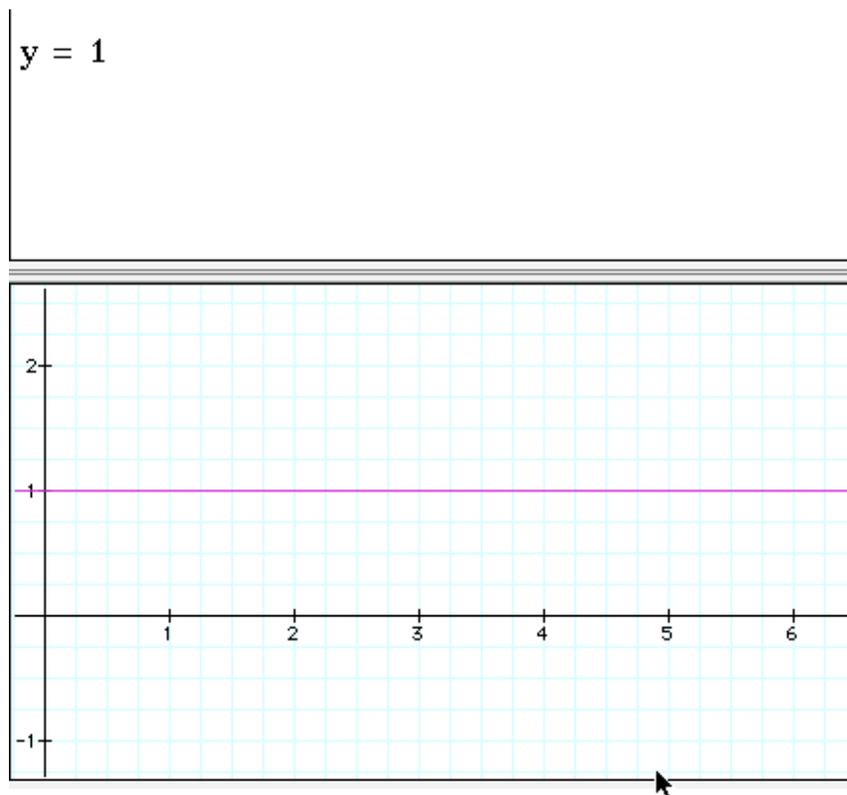
car la fonction est impaire

$$b_n = \int_0^{2\pi} \sin(nt) f(t) dt$$

$$= \int_0^\pi \sin(nt) 2 dt = 2 \left[-1/n \cos(nt) \right]$$

$$= 1/n \text{ pour } n \text{ impair}$$

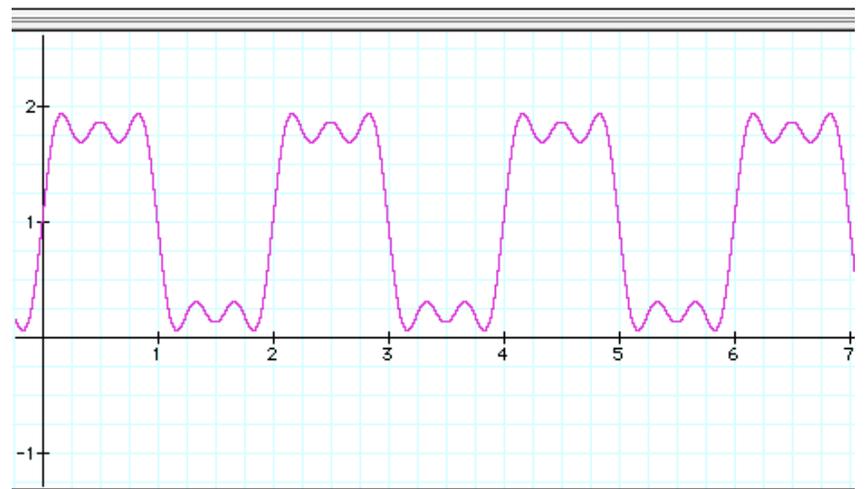
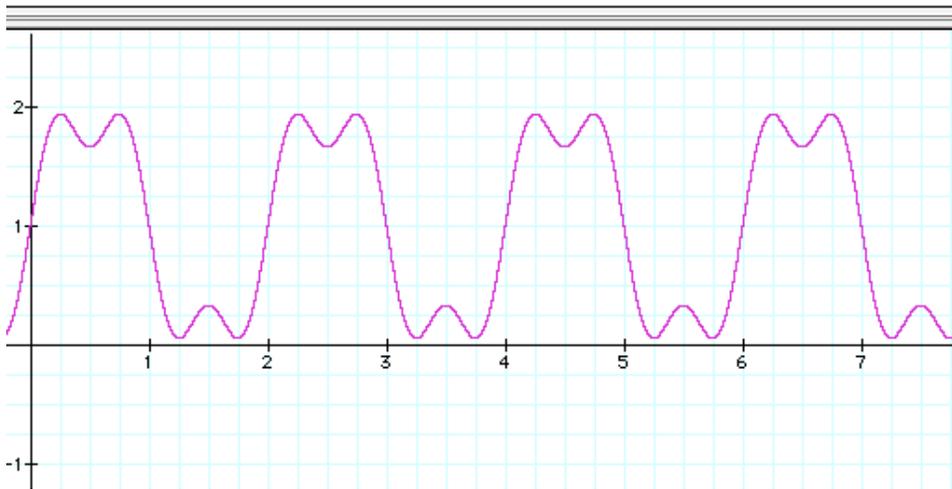
Spectre du signal d 'horloge (1)



Spectre du signal d 'horloge (3)

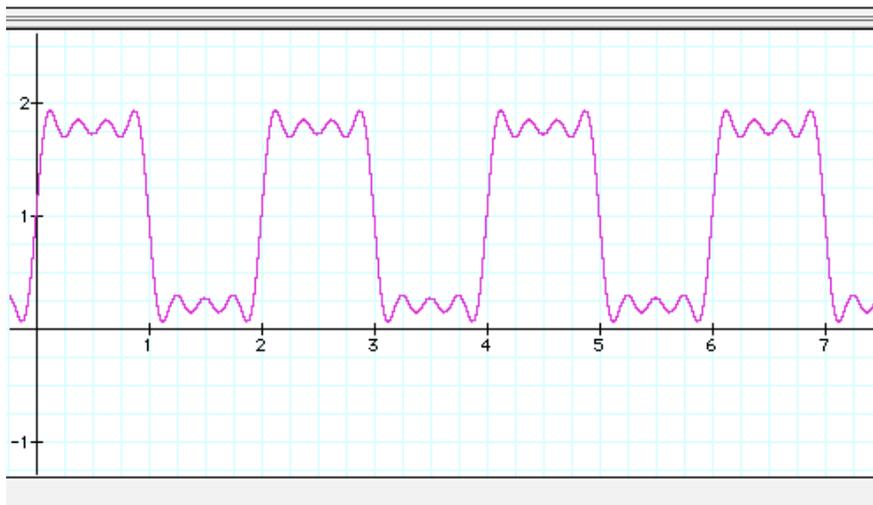
$$y = 1 + \sin\pi x + \frac{1}{3} \sin(3\pi x)$$

$$y = 1 + \sin\pi x + \frac{1}{3} \sin(3\pi x) + \frac{1}{5} \sin(5\pi x)$$

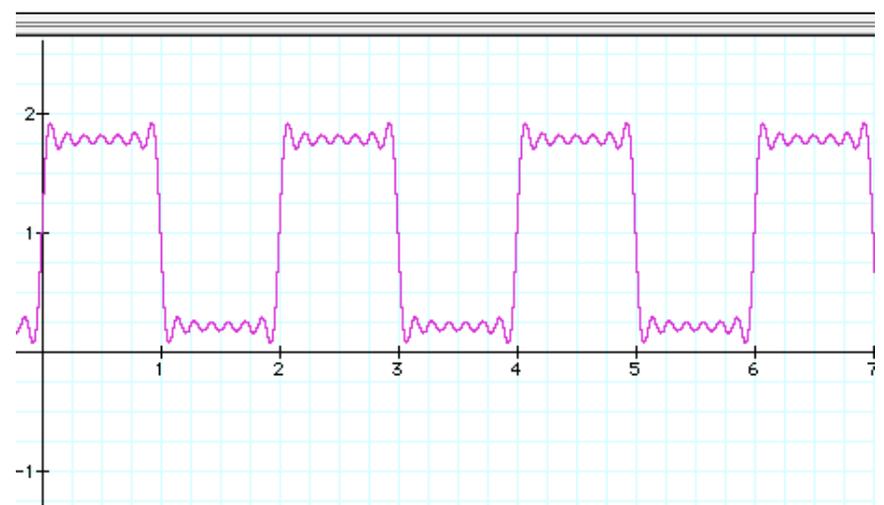


Spectre du signal d'horloge (4)

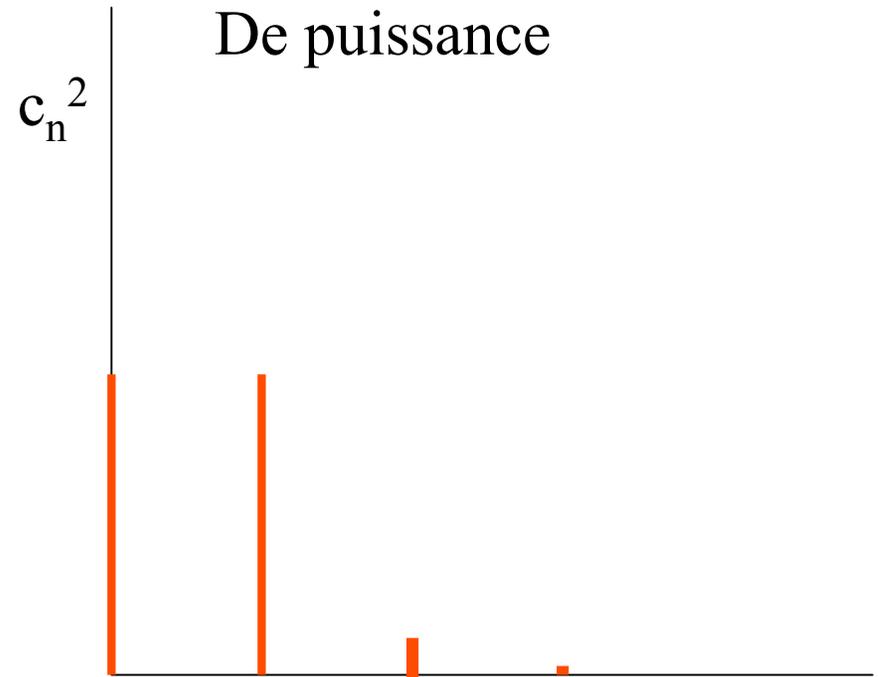
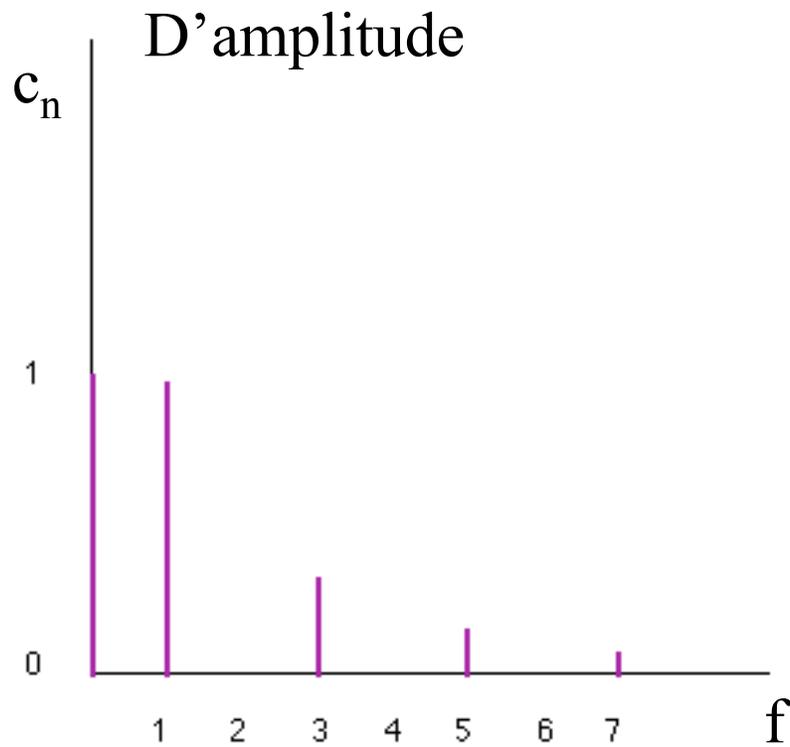
$$y = 1 + \sin \pi x + \frac{1}{3} \sin (3 \pi x) + \frac{1}{5} \sin (5 \pi x) + \frac{1}{7} \sin (7 \pi x)$$



$$y = 1 + \sin \pi x + \frac{1}{3} \sin (3 \pi x) + \frac{1}{5} \sin (5 \pi x) + \frac{1}{7} \sin (7 \pi x) + \frac{1}{9} \sin (9 \pi x) + \frac{1}{11} \sin (11 \pi x) + \frac{1}{13} \sin (13 \pi x)$$

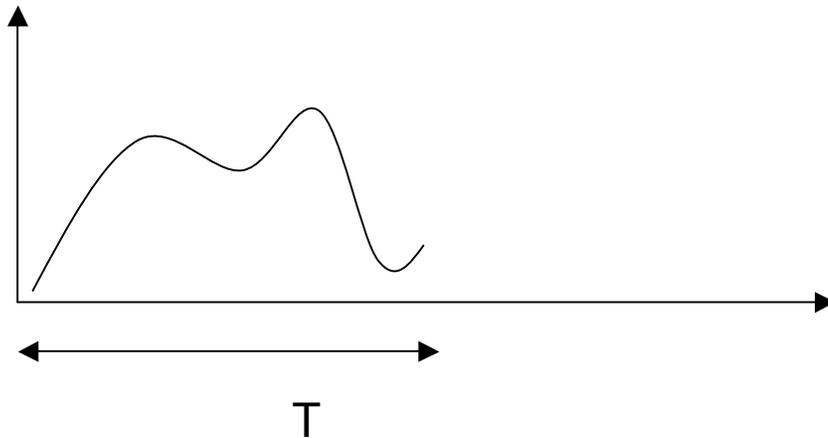


Spectres

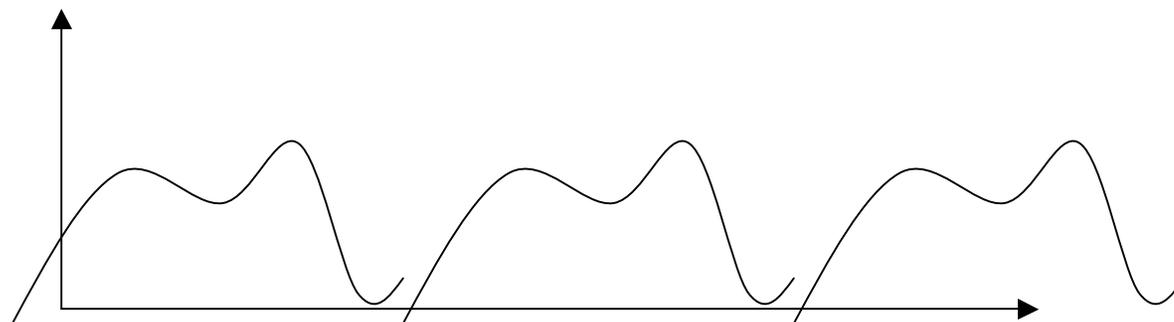


On représente aussi des spectres de phases
(Déphasage en radian ou en fraction de la période)

Spectre d'un signal à support borné



Construction d'un signal périodique

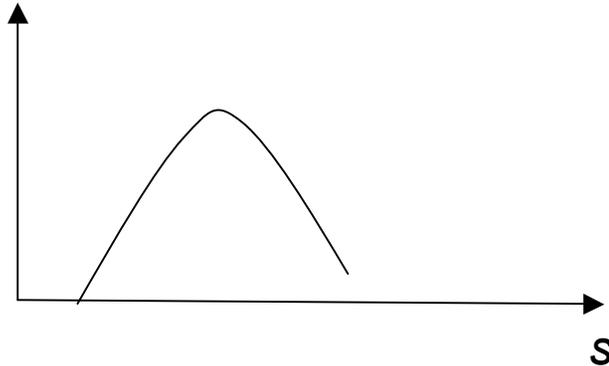


T période $f=1/T$ fréquence fondamentale

Transformée de Fourier d'un signal quelconque à variation bornée



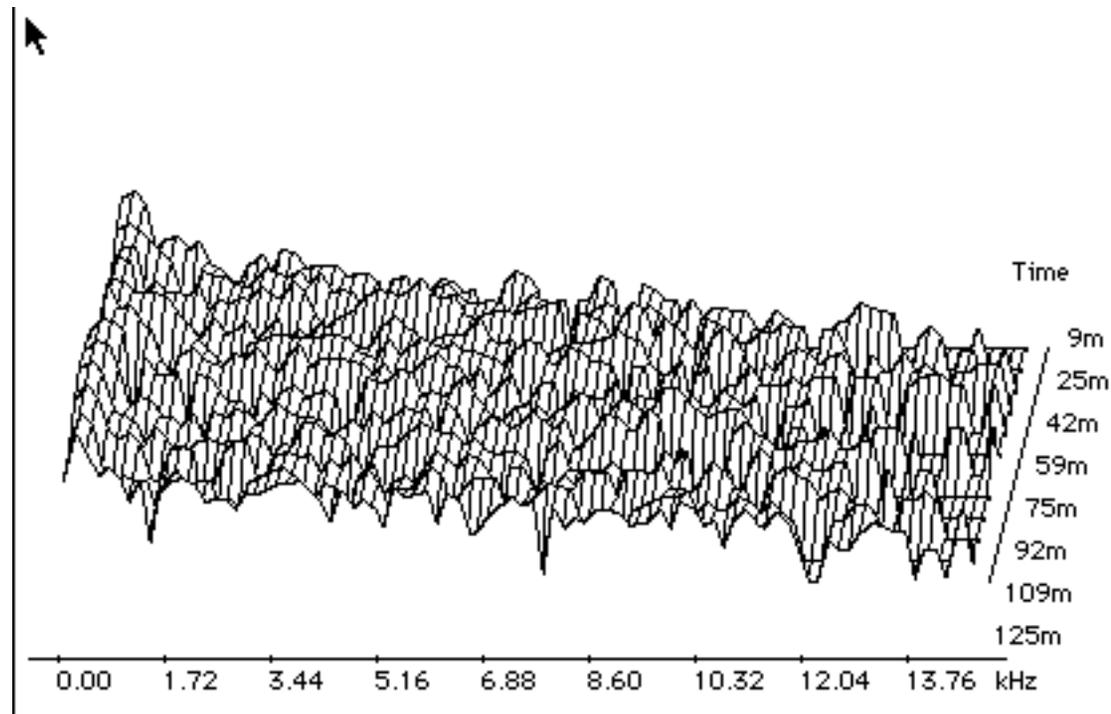
RSX205 CNAM PARIS 2006
Spectre d'amplitude



Spectre de phase

REPRESENTATION SPECTRE x TEMPS

En acoustique on utilise une représentation a deux échelles de temps:
Le signal est échantillonne selon une période T
On calcule le spectre de l'échantillon considère comme un signal
Périodique (série de fourrier)
On présente sur un axe temporel la suite des spectres ainsi construits



Déformation d 'un signal sur un canal

Tout dispositif physique (un H.P., Une oreille, une caisse de piano, une ligne de transmission)
Considère comme un canal de transmission déforme le signal transmis:

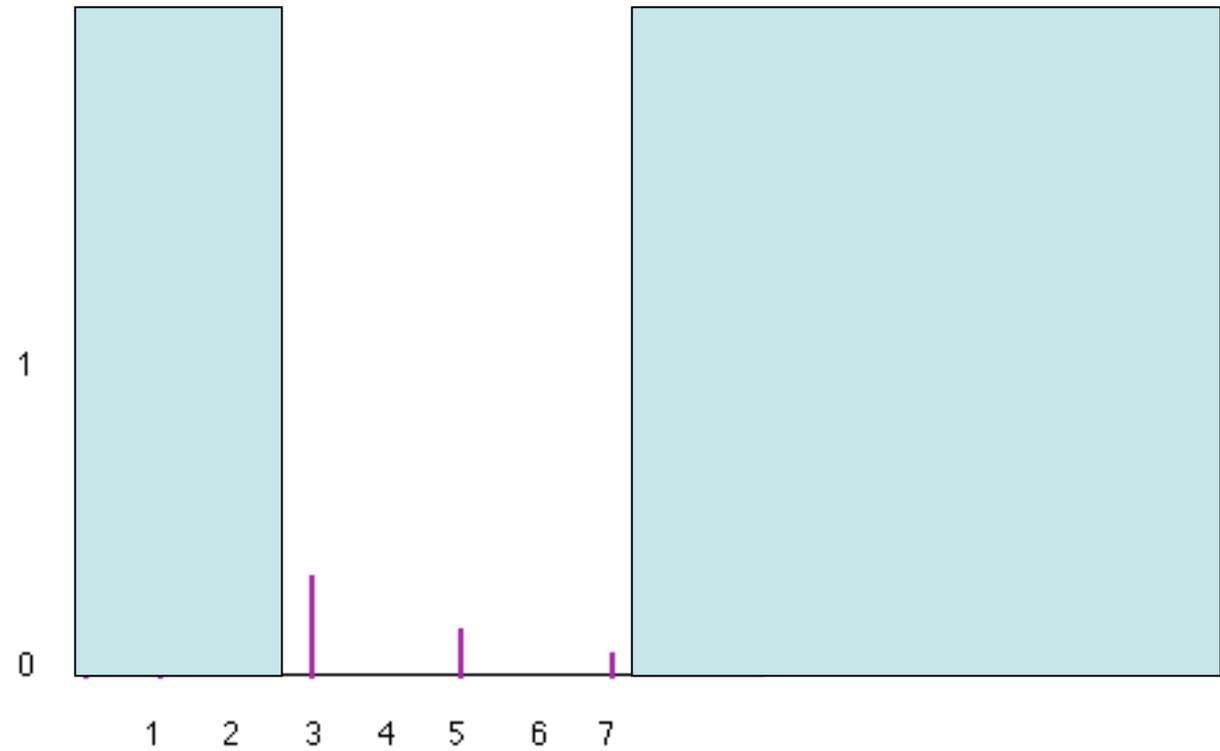
- Par filtrage (transformation du signal émis)
- Par addition de bruits (éléments exogènes)

Un effet de filtrage est souvent interprétable comme une transformation linéaire du spectre
(Convolution dans le domaine temporel)

Principaux types de filtres simples:

- Passe haut: coupe les fréquences basses,
- Passe bas: coupe les fréquences hautes
- Passe bande: ne laisse passer que dans une gamme de fréquence

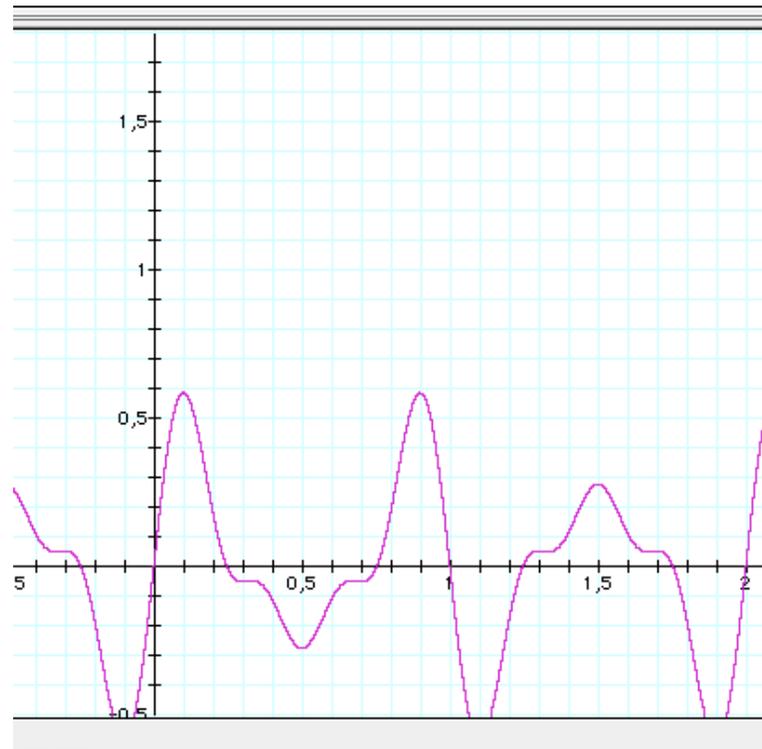
Exemple



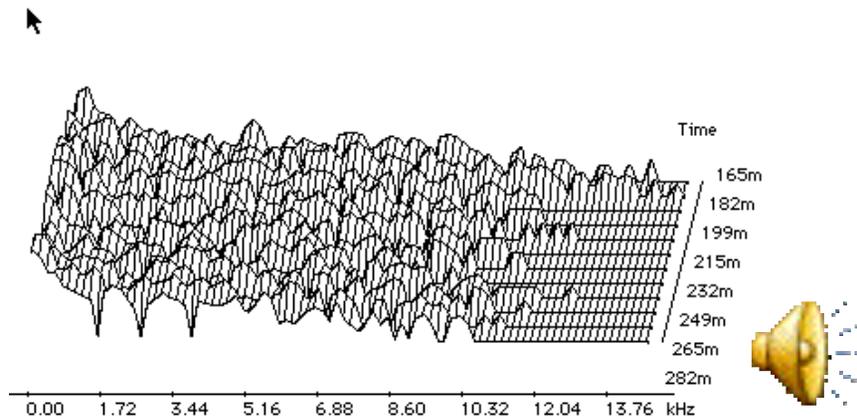
Exemple de filtre passe bande

filtre passe bande entre 3 et 7 fois la fondamentale du signal d'horloge

$$y = \frac{1}{3} \sin(3\pi x) + \frac{1}{5} \sin(5\pi x) + \frac{1}{7} \sin(7\pi x)$$



Filtrage numérique audio



Parametric EQ

Channel(s): Left Right Both

Soundfile:

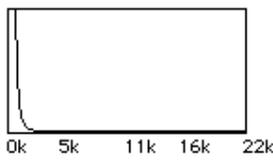
Filter Type:  **Low Shelf**

Sample Rate: 44100 Hz

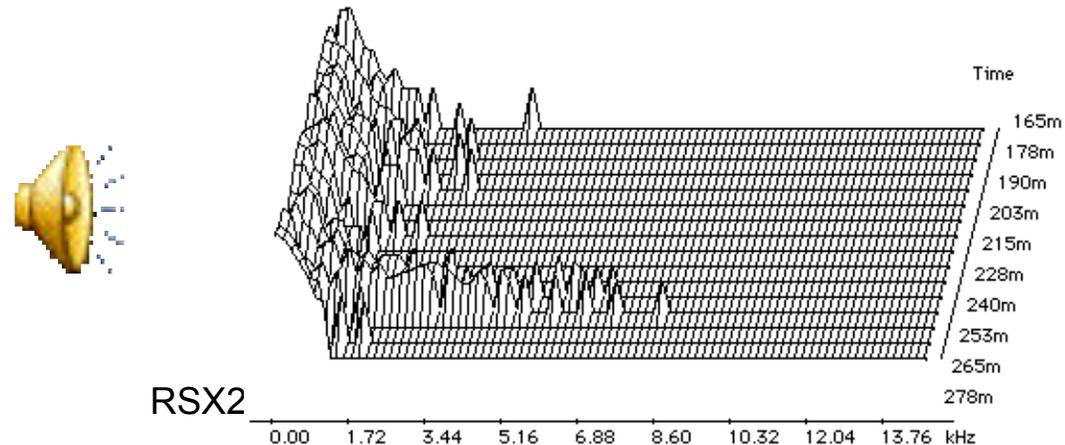
Corner Freq. Hz

Boost/Cut: dB

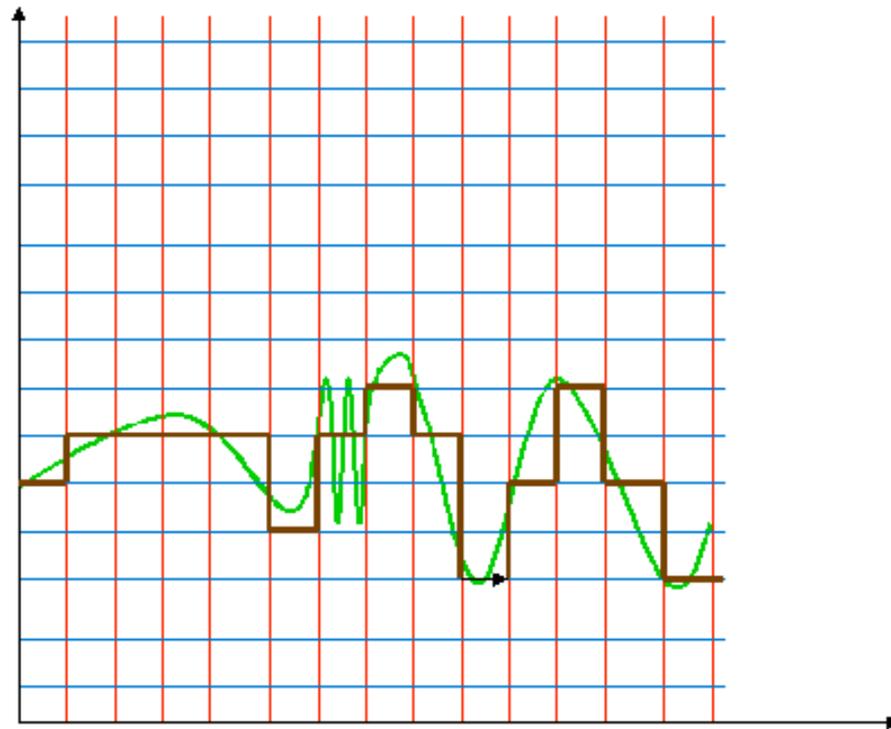
Use for playback Bypass



The Parametric EQ window displays a frequency response graph on the right side, showing the effect of the filter. The x-axis is labeled 'Uol' and ranges from 0k to 22k Hz. The graph shows a low shelf filter response, which is flat at high frequencies and has a boost or cut at low frequencies.



Erreurs de quantification et d'échantillonnage



THEOREMES DE NYQUIST

La largeur de bande d'un filtre en **hertz** au travers duquel on transmet un signal

R - La rapidité de modulation en "**bauds**" Le nombre d'intervalles élémentaires par unité de temps (secondes) qui permettent l'échange d'informations.

V - La valence d'un signal échantillonné: le nombre de niveaux différents qui peuvent être distingués par intervalle.

Q - La quantité d'information par intervalle $Q = \log_2 V$ en "**bits**"

C - Le débit maximum d'informations en **bit/seconde**

$$C = R \log_2 V = 2 B \log_2 V$$

Pour un signal à support de largeur de bande B il ne sert à rien d'échantillonner plus de

$$R = 2B \text{ fois par unité de temps.}$$

Pour améliorer le débit il faut pouvoir augmenter V le nombre de niveaux.

Autre interprétation du théorème de Nyquist

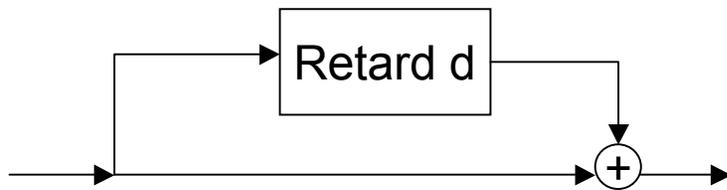
Soit un signal à bande limité dont la plus haute fréquence est f_n alors pour reconstituer le signal sans bruit d'échantillonnage il est nécessaire de l'échantillonner avec une fréquence d'au moins $2 * f_n$

Effets et transformations

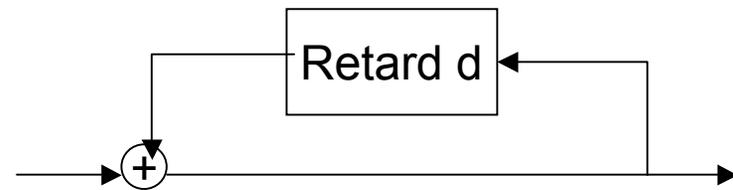
Filtrage numérique

Très nombreuses techniques de transformation portant soit sur le signal temporel soit sur le spectre

Principales transformations basées sur le filtrage numérique linéaire



$$y(n) = x(n) + x(n-d)$$

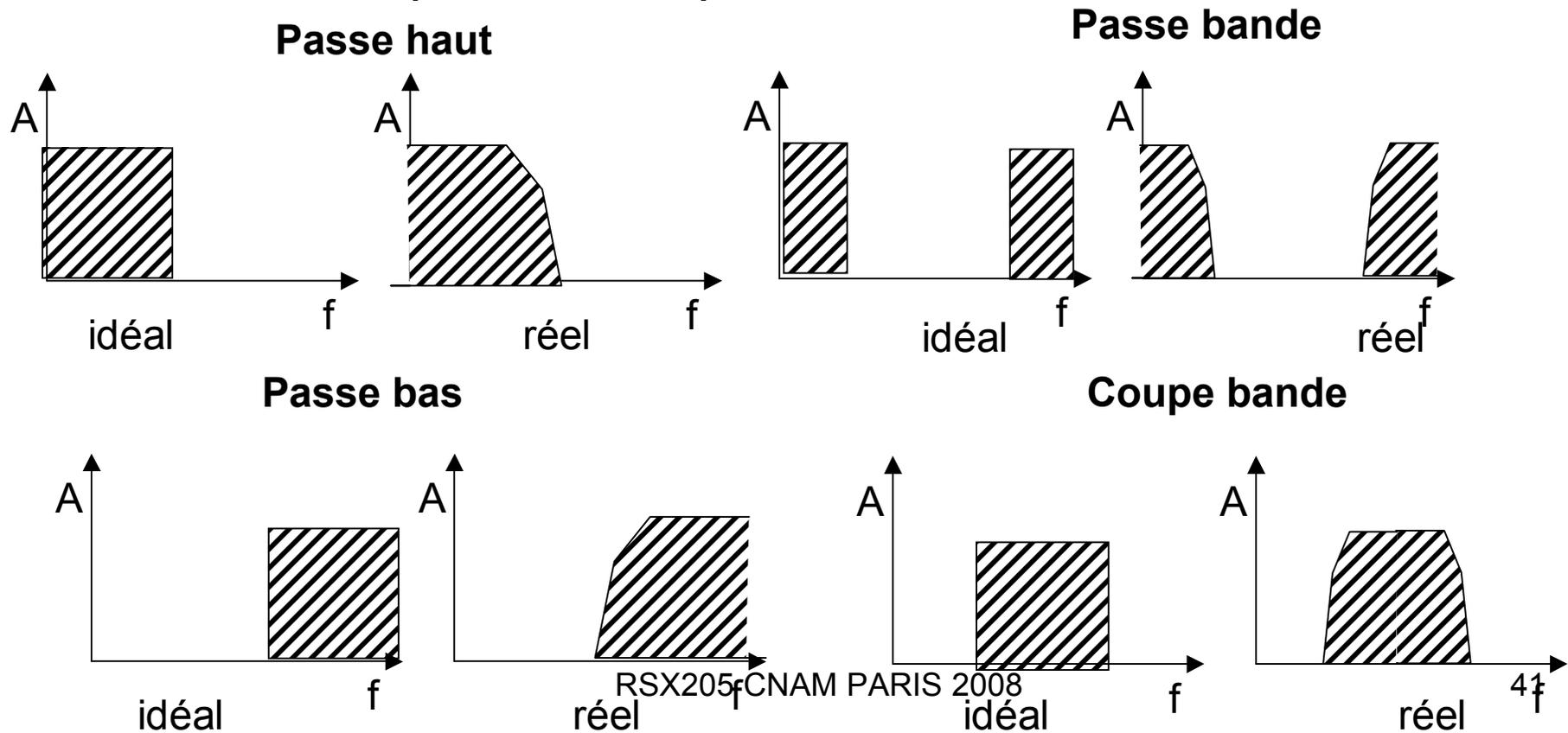


$$y(n) = x(n) + y(n-d)$$

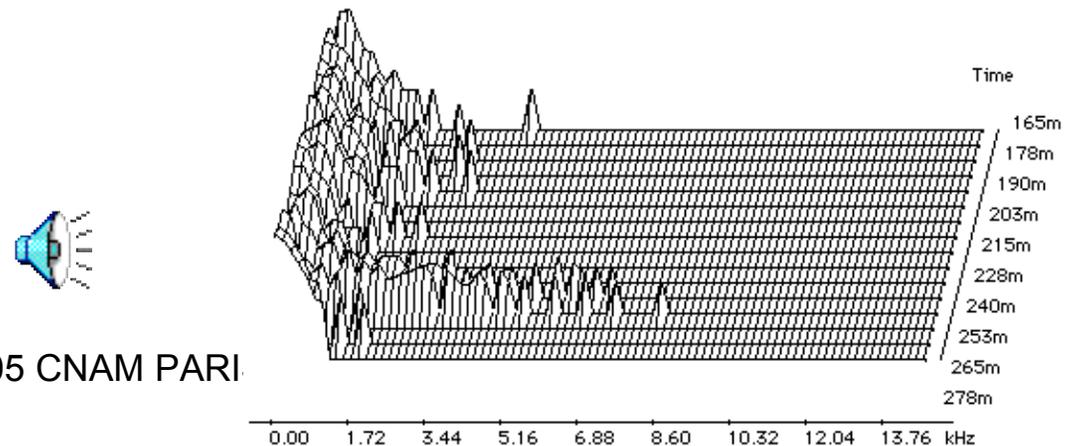
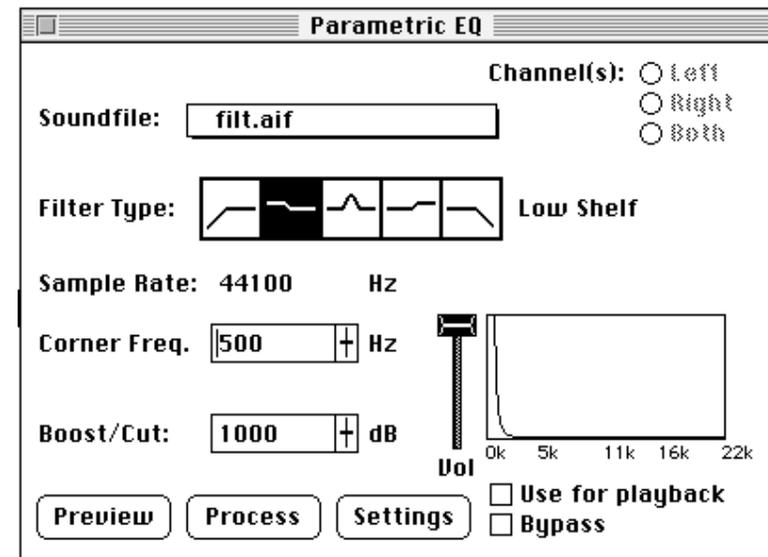
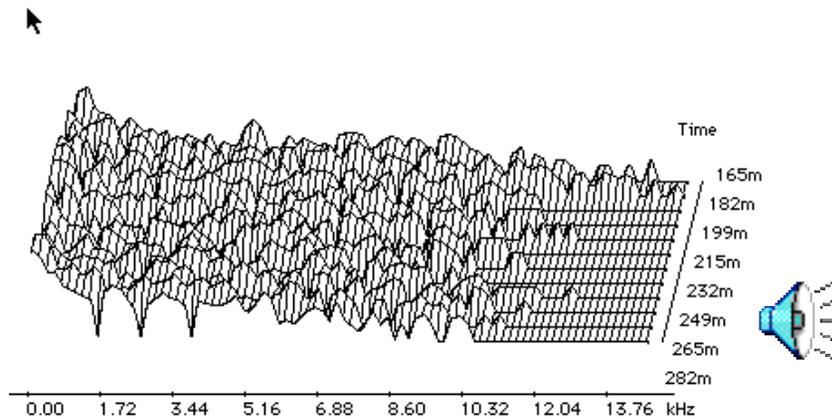
Exemples de base d'un filtre FIR et IIR

Effet d'un filtre sur le spectre d'un signal

- Modifie la phase (effet de retard)
- Modifie le spectre d'amplitude

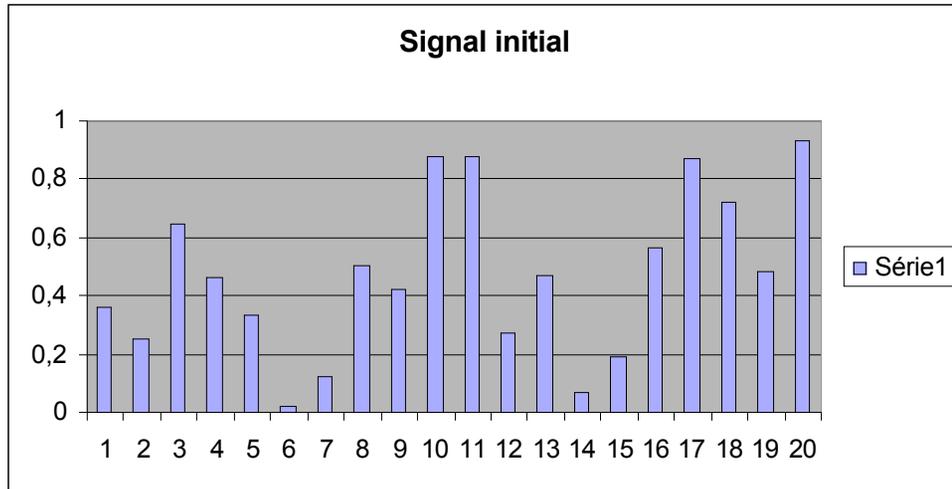


Filtrage numérique audio

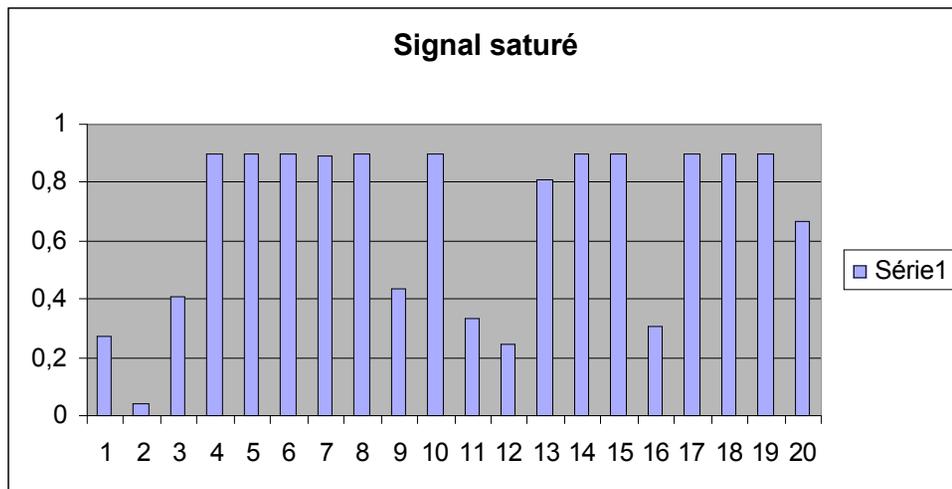


RSX205 CNAM PARI

Un filtre non linéaire: effet de saturation

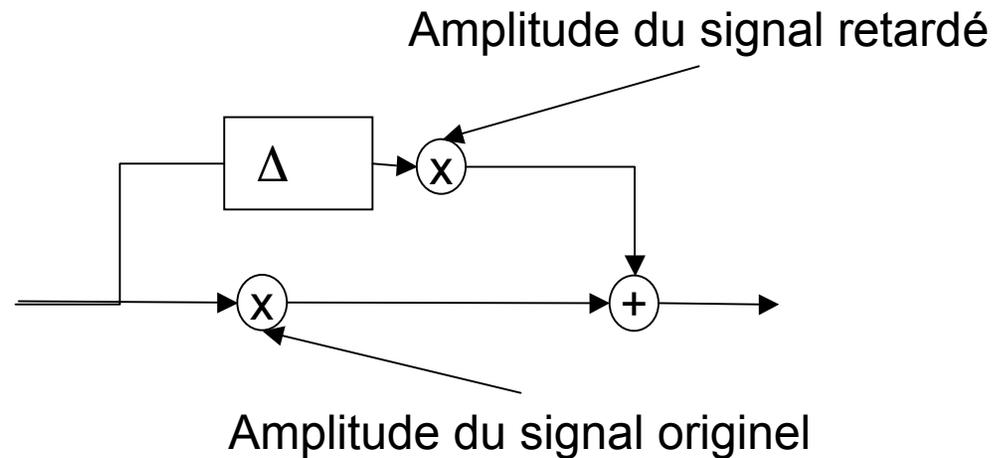


$$y(n) = \min(1,5 \cdot s(n), 0,9)$$



Les effets de retards

Schéma d'une ligne à retard simple



- Court < 10 ms modification du spectre (un ou deux échantillons passe bas FIR, plus long filtre en peigne)
- Moyen > 10 ms et < 50 ms effet d'ambiance, rehausse un signal mince
- Long > 50 ms effet d'écho

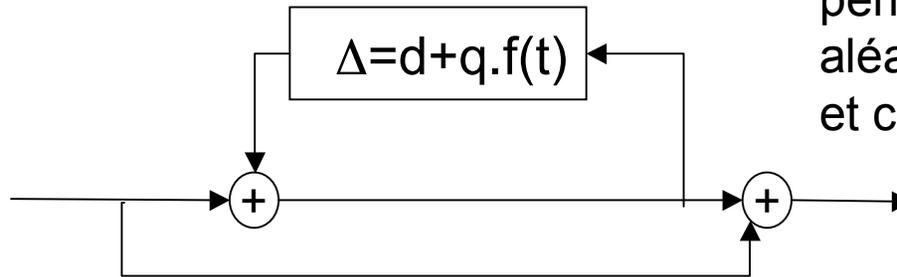


Utiliser aussi pour donner un effet de localisation dans l'espace



Flanger

$f(t)$ est une fonction périodique ou une fonction aléatoire de moyenne nulle et comprise entre -1 et +1



Rolling Stone

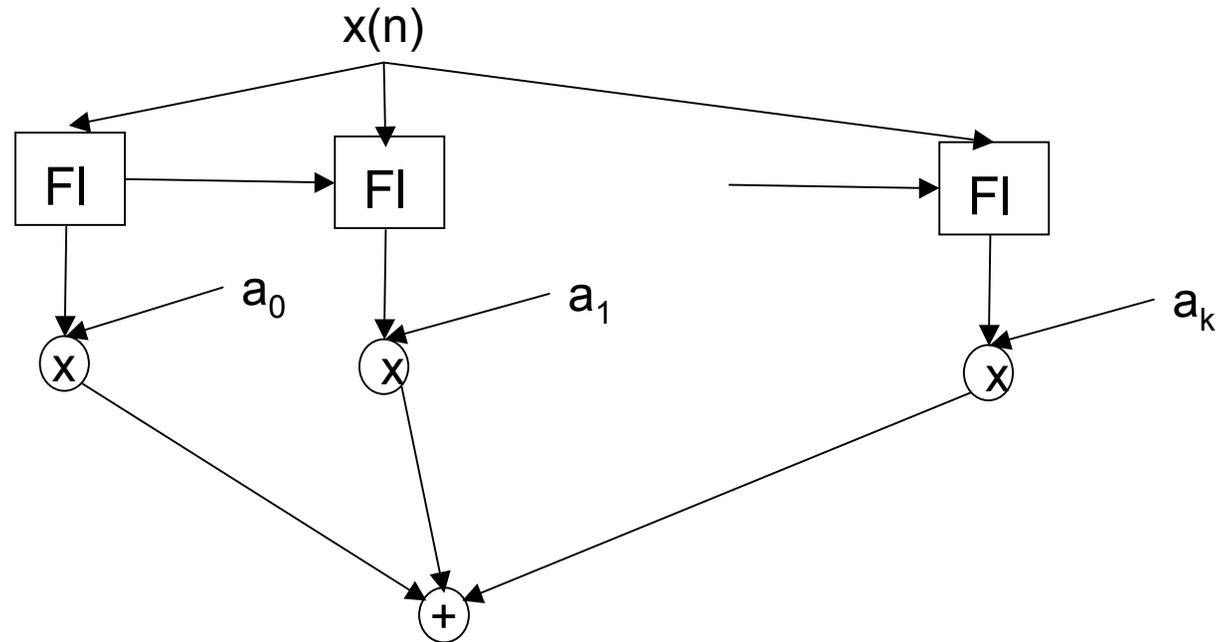


Rolling Stone Flangé

Version plus élaborée le phasing
RSX208 CNAM PARIS 2008

Effet Chorus

Une technique

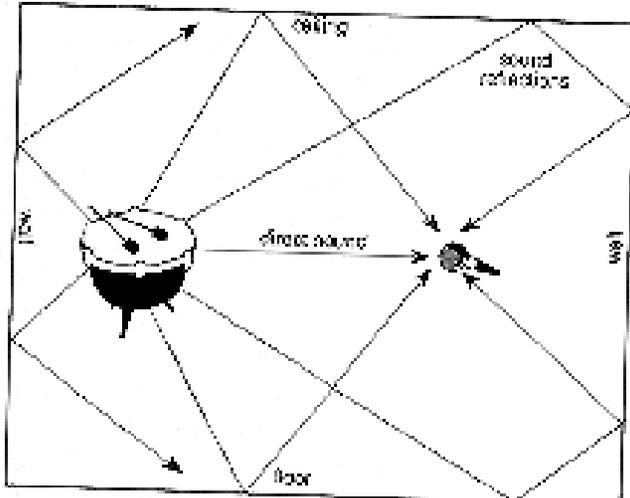


Sans

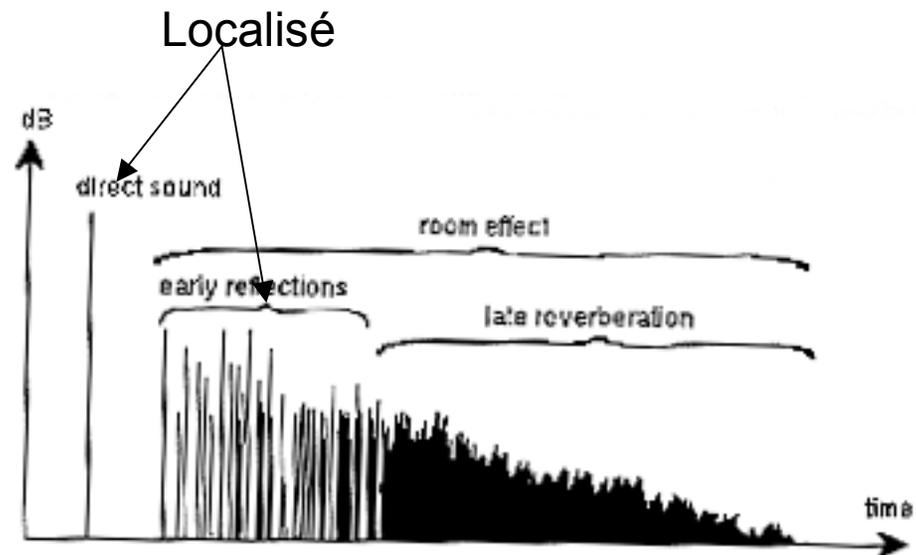


Avec

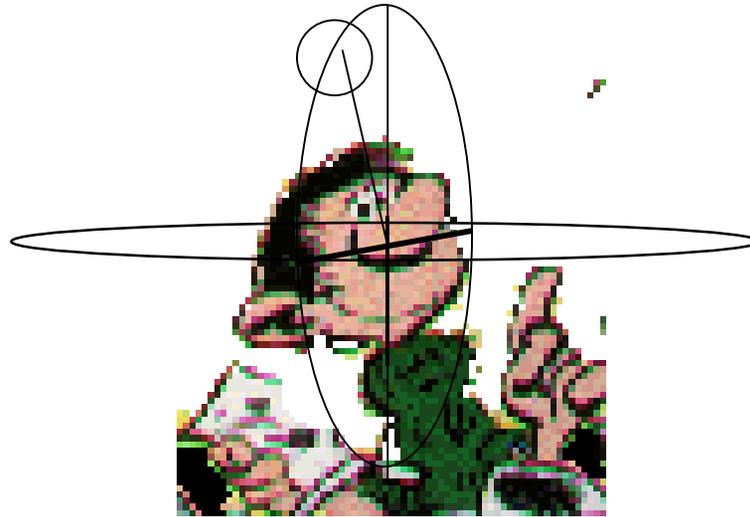
Spatialisation



Effet de réverbération
Effet de localisation



Détermination de la position d'un son dans l'espace



Détermination de l'azimut et zenith

- Différence de temps entre les deux oreilles
- Différence d'amplitude avant arrière (ombre de la tête)
- Différence spectrale liées aux réflexions asymétriques (pavillons, épaules, torses)

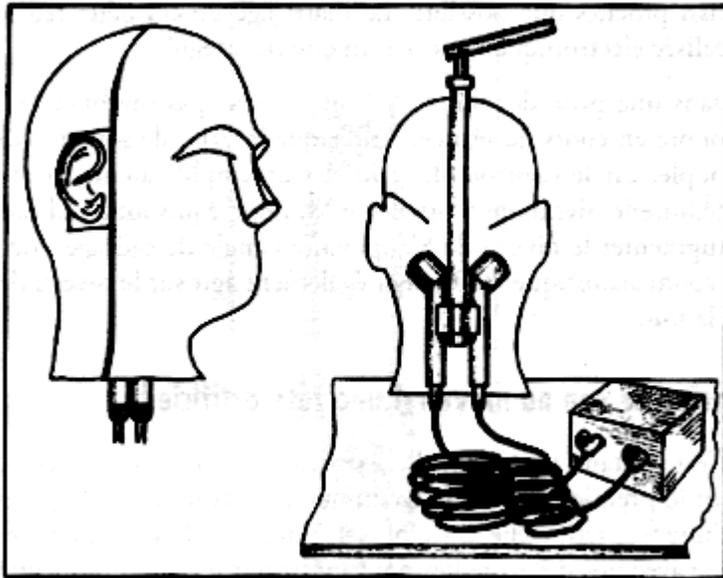
Détermination de la distance

- Rapport entre le signal direct et le signal réverbéré
- Pertes des composantes hautes fréquences
- Pertes des détails

Restitution

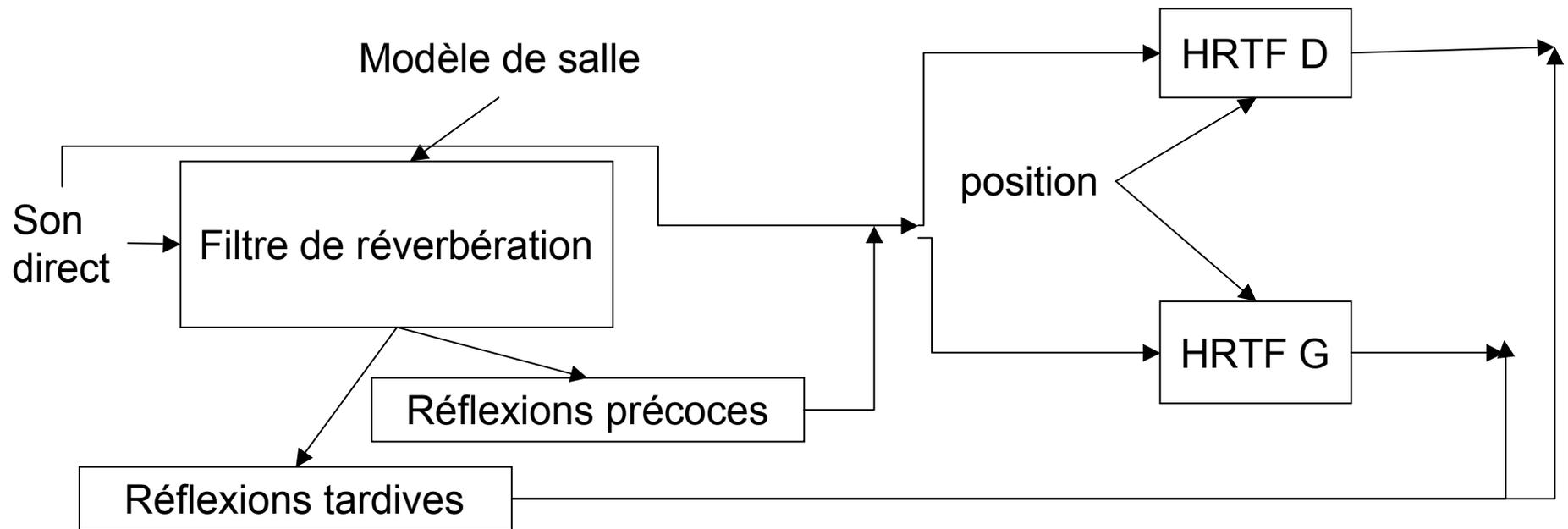
- Mono (distance)
- Stéréo (distance et localisation sur un plan)
- Spatial avec deux hauts parleurs (transaural)
- Spatial avec un casque (binaural)
- Spatial avec N haut parleurs

HRTF

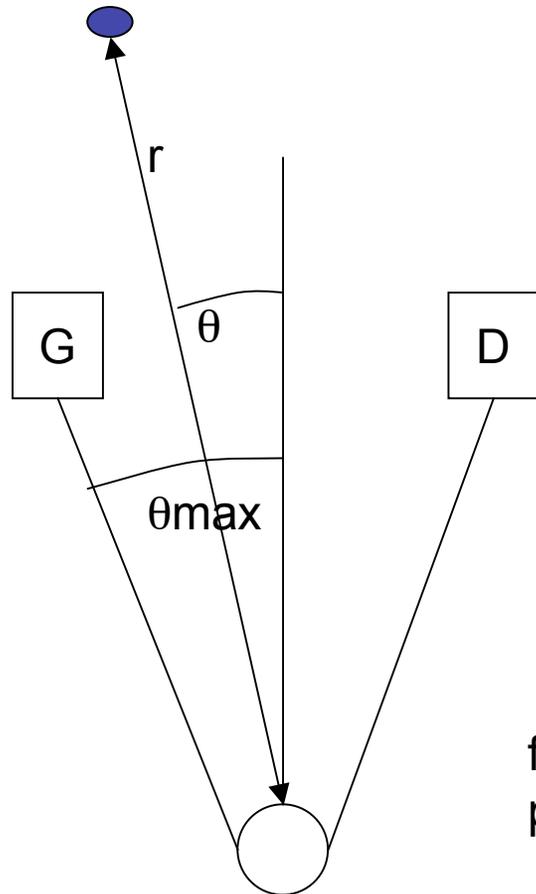


Détermination expérimentale des filtres définissant la différences de perception entre les deux oreilles pour une position d'un objet sonore.
Dépend de la tête...

Exemple de processus de spatialisation binaural



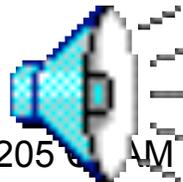
Pan Pot d'intensité (2D)



$$A_G = A \cdot f(r) \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} [\cos \theta + \sin \theta]$$

$$A_D = A \cdot f(r) \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} [\cos \theta - \sin \theta]$$

$f(r)$ décroît avec la distance. Peut être différente pour le son direct, les réflexions précoces et tardives



Bibliographie

- L'audio numérique, Curtis Raod, Dunod 1998
- The technology of video and audio streaming, David Auterberry, Focal Press, 2002
- Le son musical, John Pierce, Pour la Science, Belin 1984