US332S Conception sonore

Audio numérique

Cours 1 Vibrations et signaux

Matthias Puech
matthias.puech@lecnam.net

Master 1 JMIN — Cnam ENJMIN, Angoulême

19 mars 2019

But de ce cours

- Introduction au traitement du signal numérique (DSP) audio
  - comment le son est-il numérisé ? stocké ? traité ? restitué ?
  - comment encoder le son, selon quels paramètres ?
  - qu'est-ce que cela implique pour le sound designer ?

But de ce cours

- Introduction au traitement du signal numérique (DSP) audio
  - comment le son est-il numérisé ? stocké ? traité ? restitué ?
  - comment encoder le son, selon quels paramètres ?
  - qu'est-ce que cela implique pour le sound designer ?
- Déconstruction des traitements usuels
  - comment est conçu un compresseur ? un filtre ? une réverb ?
  - quelles sont leur propriétés formelles ?
  - quelles sont les briques de base du DSP audio ?
  - comment créer ses propres traitements ?

But de ce cours

- Introduction au traitement du signal numérique (DSP) audio
  - comment le son est-il numérisé ? stocké ? traité ? restitué ?
  - comment encoder le son, selon quels paramètres ?
  - qu'est-ce que cela implique pour le sound designer ?
- Déconstruction des traitements usuels
  - comment est conçu un compresseur ? un filtre ? une réverb ?
  - quelles sont leur propriétés formelles ?
  - quelles sont les briques de base du DSP audio ?
  - comment créer ses propres traitements ?

Le message

Mieux comprendre les traitements audio pour :

- élargir sa boîte à outil, et
- utiliser plus efficacement les outils existants.

Aspects pratiques

`http://cedric.cnam.fr/~puechm/ens/us332s/`

Aspects pratiques

`http://cedric.cnam.fr/~puechm/ens/us332s/`

Cours

En 3 séances :

Cours 1 (2h) Vibrations et signaux ; dynamique et distortion

Cours 2 (2h) Filtrage, réverbération, modulation

Aspects pratiques

`http://cedric.cnam.fr/~puechm/ens/us332s/`

Cours

En 3 séances :

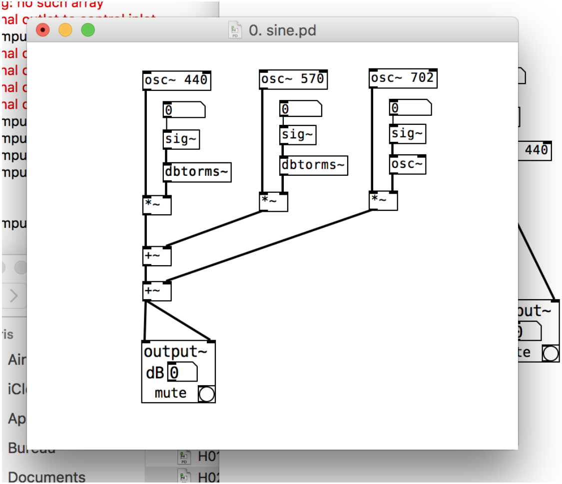
Cours 1 (2h) Vibrations et signaux ; dynamique et distortion

Cours 2 (2h) Filtrage, réverbération, modulation

- \+ ED à la fin de chaque séance
  (sujets sur la page du cours)
- \+ programmes d'accompagnement (`pd.zip`)
- \+ examen (QCM)

Outils de démonstration

Pure Data



Miller Puckette (1996)

Outils de démonstration

Pure Data

- langage de programmation graphique / data flow
  (programme = réseau de boîtes)
- multi-plateforme
  (GNU/Linux, Mac OS X, iOS, Android, Windows)
- manipule des flux audio et de contrôle en temps réel
- libre et gratuit
- interaction hardware et software
  (UI, OSC, MIDI…)
- possibilité de manipuler des flux vidéo
  (librairie GEM)

Outils de démonstration

Ableton Live

- DAW (Digital Audio Workstation) grand public
- payant (cher)
- inclut une panoplie d'effets “standards”
  (qui nous serviront de référence)

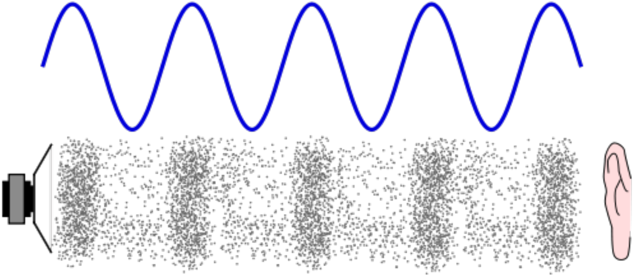
Bibliographie

- *Le son musical*, John Pierce
- *The Computer Music Tutorial*, Curtis Roads
- *DAFX : Digital Audio Effects*, Udo Zölzer et. al.
- *The Theory and Technique of Electronic Music*, Miller Puckette
  `http://msp.ucsd.edu/techniques.htm`
- *Music : a mathematical offering*, Dave Benson

Audio Numérique

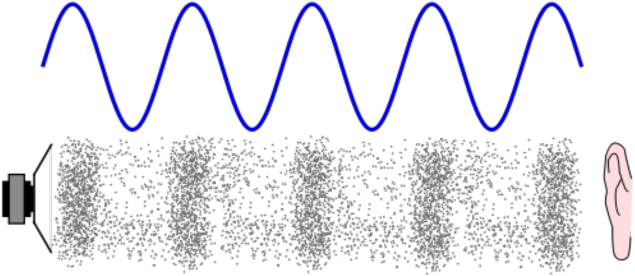
Qu’est-ce qu’un son ?

Un *son* est la propagation une onde *audible* de pression dans l’air



Qu'est-ce qu'un son ?

Un *son* est la propagation une onde *audible* de pression dans l'air

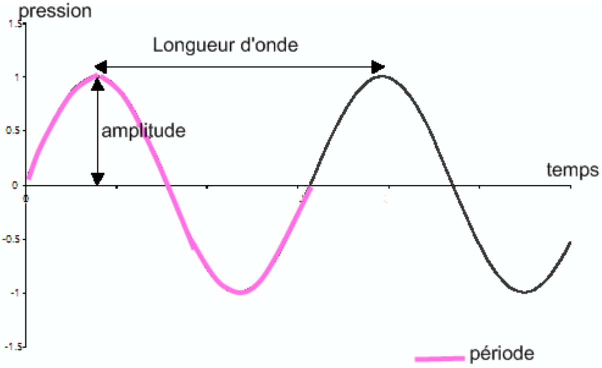


Remarques

- *audible* = 20Hz – 20kHz
- … ou dans un autre milieu (liquide, gaz, solide)

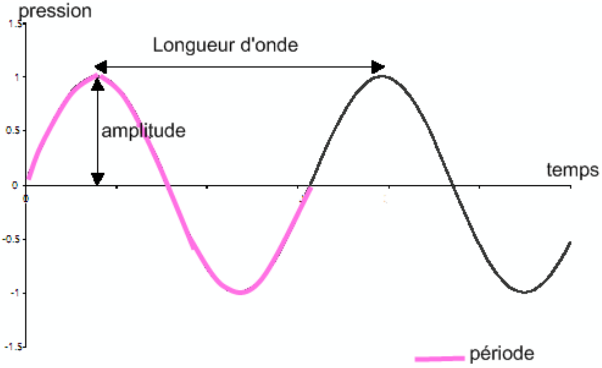
Qu'est-ce qu'un son ?

L'onde de pression se déplace dans l'air à $340 m.s^{-1}$.
On peut tracer son évolution en un point au cours du temps (**forme d'onde**) :



Qu'est-ce qu'un son ?

L'onde de pression se déplace dans l'air à 340m.s^{-1}.
On peut tracer son évolution en un point au cours du temps (**forme d'onde**) :

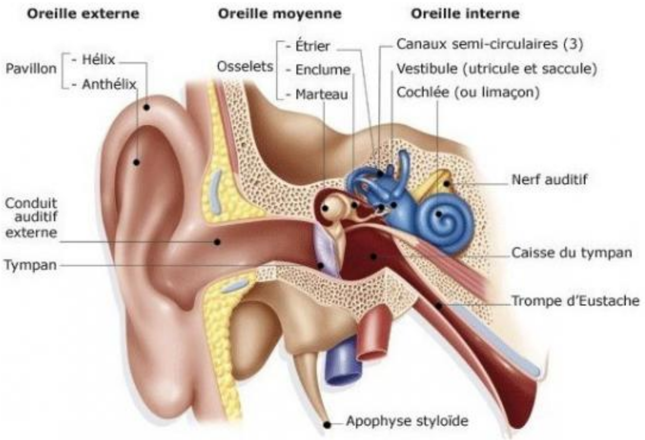


représentation d'une valeur dans le temps = **signal**

Anatomie

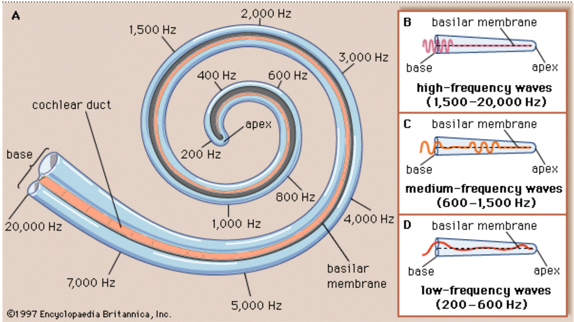
L'oreille humaine

Convertit les *variations de pression* en une information électrique transmise au cerveau (nerf auditif)



Anatomie

La cochlée



- différentes fréquences résonnent à différentes “profondeurs” (base=20kHz, apex=20Hz)
- tout son long, des *cils vibratils* créent du courant électrique
- le cerveau reçoit l’intensité des vibrations de pour chaque profondeur, à une fréquence ≈50 Hz

Anatomie

Question

Quelle onde sonore excite exactement 1 endroit de la cochlée ?

Anatomie

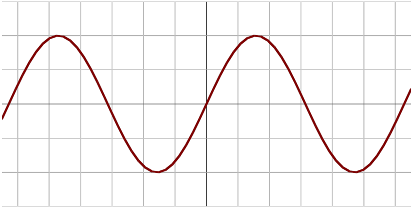
Question

Quelle onde sonore excite exactement 1 endroit de la cochlée ?

Réponse

La sinusoïde :

$$s(t) = A\cos(2\pi f t + \phi)$$

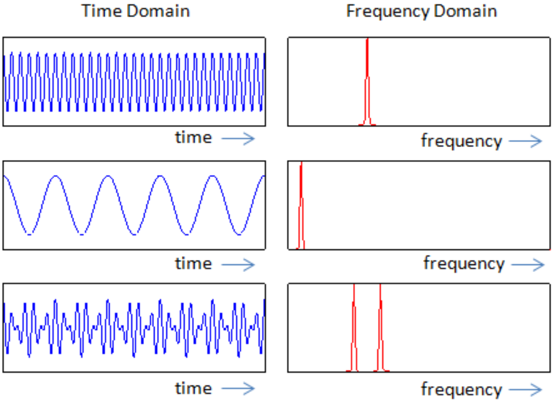


https://www.desmos.com/calculator/tlnztjjhjm

- A amplitude (Pa)
- f fréquence (Hz)
- ϕ phase (rad)

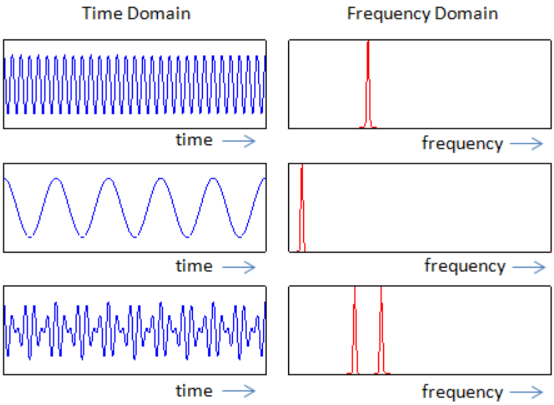
Domaines fréquentiel et temporel [00.domains.pd]

Il y a donc deux façons de représenter les sons :



Domaines fréquentiel et temporel [00.domains.pd]

Il y a donc deux façons de représenter les sons :



"on entend dans le domaine fréquentiel"

- les évenements $f < 50$Hz sont distinguables dans le temps
- les évenements 20Hz $< f <$ 20kHz sont continus et ont une hauteur

Réponse en fréquence & amplitude

Réponse en fréquence

La cochlée distingue plus de fréquences à son apex (grave) qu'à sa base (aigues)

Exemple à la base, 1mm = 1000 Hz, à l'apex, 1mm = 10 Hz [1]

1. les quantités sont arbitraires, pour illustration

Réponse en fréquence & amplitude

Réponse en fréquence

La cochlée distingue plus de fréquences à son apex (grave) qu'à sa base (aigues)

Exemple à la base, 1mm = 1000 Hz, à l'apex, 1mm = 10 Hz [1]

$\rightsquigarrow$ *réponse en fréquence exponentielle*

Unité relative 1 octave = rapport de fréquence de 2
1 demi-ton = rapport de fréquence de $\sqrt[12]{2}$

Unité absolue la *note MIDI* : nombre de demi-tons au dessus de 8.1757989156Hz ("do 0")

Exemple la note MIDI 69 a la fréquence $8.1757989156 * (\sqrt[12]{2})^{69} = 440Hz$

1. les quantités sont arbitraires, pour illustration

Réponse en fréquence & amplitude

Réponse en fréquence

La cochlée distingue plus de fréquences à son apex (grave) qu'à sa base (aigues)

Exemple à la base, 1mm = 1000 Hz, à l'apex, 1mm = 10 Hz [1]

⇝ *réponse en fréquence exponentielle*

Unité relative 1 octave = rapport de fréquence de 2
1 demi-ton = rapport de fréquence de $\sqrt[12]{2}$

Unité absolue la *note MIDI* : nombre de demi-tons au dessus de 8.1757989156Hz ("do 0")

Exemple la note MIDI 69 a la fréquence $8.1757989156 * (\sqrt[12]{2})^{69} = 440Hz$

Monter une note d'une octave, c'est doubler sa fréquence

1. les quantités sont arbitraires, pour illustration

Réponse en fréquence & amplitude

Réponse en amplitude

Les cils vibratiles produisent proportionnellement plus de courant avec des petites amplitudes qu'avec des grandes

Exemple pour 1nPa.s^{-1} de différence de pression, $1\mu V$;
pour 10nPa.s^{-1}, seulement $2\mu V$

1. les quantités sont arbitraires, pour illustration

Réponse en fréquence & amplitude

Réponse en amplitude

Les cils vibratiles produisent proportionnellement plus de courant avec des petites amplitudes qu'avec des grandes

Exemple pour 1nPa.s^{-1} de différence de pression, 1μV ;
pour 10nPa.s^{-1}, seulement 2μV

⇝ *réponse en amplitude exponentielle*

Unité relative 1 dB = rapport d'amplitude de 1,122
6 dB = rapport d'amplitude de ≈2

Unité absolue n dB SPL = n dB au dessus de la pression la plus faible perceptible par l'oreille humaine : 20μPa

Exemple 50 dB SPL = voix humaine ;
120 db SPL = seuil de douleur

1. les quantités sont arbitraires, pour illustration

Réponse en fréquence & amplitude

Réponse en amplitude

Les cils vibratiles produisent proportionnellement plus de courant avec des petites amplitudes qu'avec des grandes

Exemple pour 1nPa.s^{-1} de différence de pression, $1\mu V$; pour 10nPa.s^{-1}, seulement $2\mu V$

⇝ *réponse en amplitude exponentielle*

Unité relative 1 dB = rapport d'amplitude de 1,122
6 dB = rapport d'amplitude de ≈2

Unité absolue n dB SPL = n dB au dessus de la pression la plus faible perceptible par l'oreille humaine : $20\mu Pa$

Exemple 50 dB SPL = voix humaine ;
120 db SPL = seuil de douleur

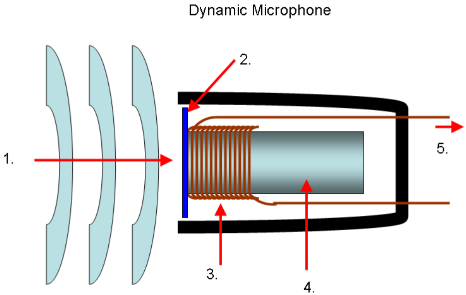
Augmenter le volume de 6 dB c'est doubler l'amplitude de ses variations de pression.

1. les quantités sont arbitraires, pour illustration

Les transducteurs artificiels

Microphone

Transforme le signal acoustique (Pa) en signal électrique (V).

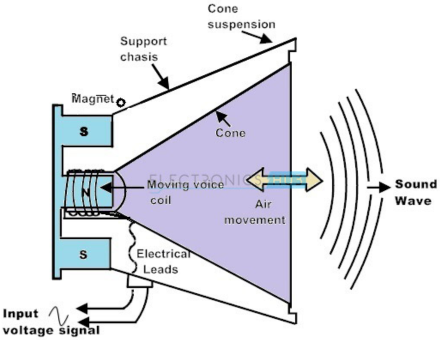


- l'air fait vibrer une membrane reliée à une bobine
- la bobine crée un courant électrique induit
- transformation *analogique*
  (variation de pression proportionnelle au courant)

Les transducteurs artificiels

Haut-parleur

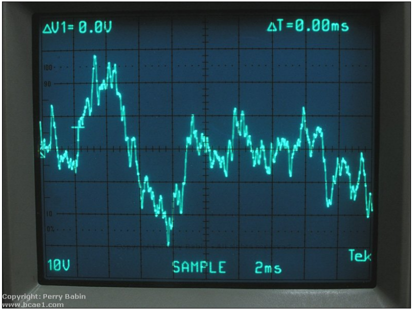
Transforme le signal électrique (V) en signal acoustique (Pa).



- le courant crée un champ magnétique dans la bobine
- la bobine se déplace, et déplace le cône
- le cône déplace l'air, qui crée une différence de pression

Le signal audio analogique

Mesure de pression/voltage au cours du temps



- centré autour de 0
  (pas de composante continue dans la mesure)
- précision infinie en temps et en amplitude
  (fonction de $\mathbb{R}$ dans $\mathbb{R}$)
- en pratique, borné par les limites du capteur
  (par convention, appelons -1 le min et 1 le max)

Amplification et atténuation d'un signal [01.freq-amp.pd]

Un signal sonore est représenté par une fonction :

$$s : \mathbb{R} \to \mathbb{R}$$

qui associe à un instant t la valeur de pression $s(t)$.

Amplification et atténuation d'un signal `[01.freq-amp.pd]`

Un signal sonore est représenté par une fonction :

$$s : \mathbb{R} \to \mathbb{R}$$

qui associe à un instant t la valeur de pression $s(t)$.

Quiz

Comment modifier le signal $s(t)$ pour qu'il nous parvienne

- plus fort ?
- moins fort ?

Amplification et atténuation d'un signal `[01.freq-amp.pd]`

Un signal sonore est représenté par une fonction :

$$s : \mathbb{R} \to \mathbb{R}$$

qui associe à un instant t la valeur de pression $s(t)$.

Quiz

Comment modifier le signal $s(t)$ pour qu'il nous parvienne

- plus fort ?
- moins fort ?

Réponse

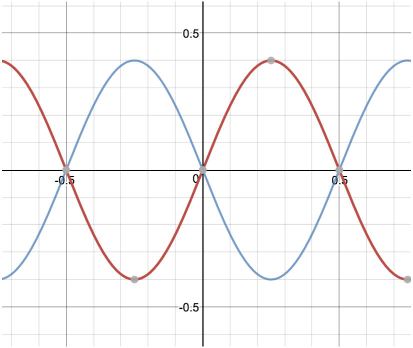
Il faut le *multiplier* par un signal de valeur constante v :

- $v > 1$ pour l'amplifier
- $0 < v < 1$ pour l'atténuer

Amplification et atténuation d'un signal `[01.freq-amp.pd]`

Quiz

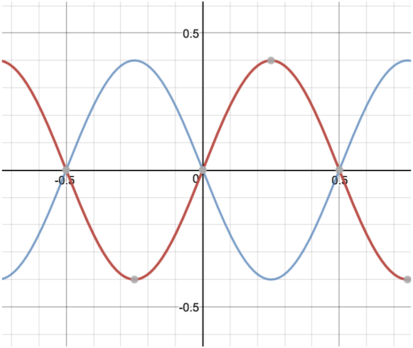
Qu'entend-on si on multiplie un signal sonore par -1 ?



Amplification et atténuation d'un signal `[01.freq-amp.pd]`

Quiz

Qu'entend-on si on multiplie un signal sonore par -1 ?



Réponse

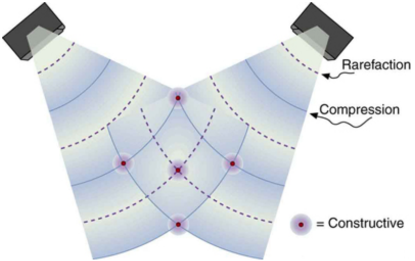
La même chose !

L'oreille n'est pas sensible aux différences de phase.

Principe de superposition `[02.superpose.pd]`

Quiz

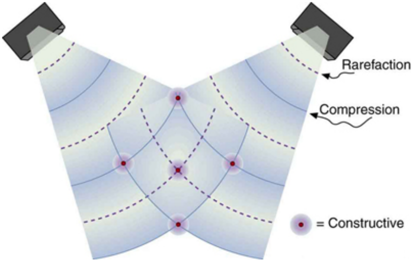
Qu'entend-on quand on est à la même distance de deux sources sonores $s_1(t)$ et $s_2(t)$?



Principe de superposition `[02.superpose.pd]`

Quiz

Qu'entend-on quand on est à la même distance de deux sources sonores $s_1(t)$ et $s_2(t)$?



Réponse

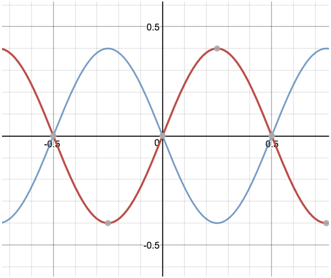
Le signal *somme* des deux signaux $s(t) = s_1(t) + s_2(t)$

$\rightsquigarrow$ "mixer" deux source, c'est faire leur somme

Principe de superposition `[02.superpose.pd]`

Quiz

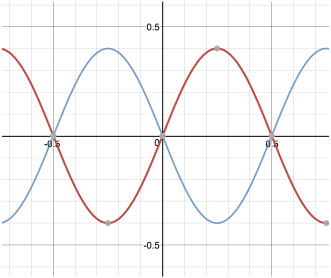
Qu'entend-on quand on est à la même distance de deux sources sonores $s_1(t)$ et $-s_1(t)$?



Principe de superposition `[02.superpose.pd]`

Quiz

Qu'entend-on quand on est à la même distance de deux sources sonores $s_1(t)$ et $-s_1(t)$?



Réponse

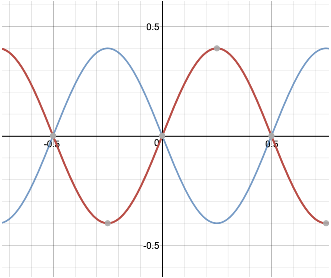
$s(t) = s_1(t) - s_1(t) = 0$

$\rightsquigarrow$ Rien ! (du silence)

Principe de superposition [02.superpose.pd]

Quiz

Qu'entend-on quand on est à la même distance de deux sources sonores $s_1(t)$ et $-s_1(t)$?



Réponse

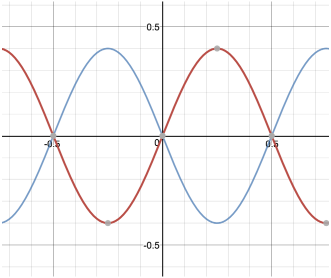
$s(t) = s_1(t) - s_1(t) = 0$

⇝ Rien ! (du silence) = **interférences destructives**

Principe de superposition [02.superpose.pd]

Quiz

Qu'entend-on quand on est à la même distance de deux sources sonores $s_1(t)$ et $-s_1(t)$?



Réponse

$s(t) = s_1(t) - s_1(t) = 0$

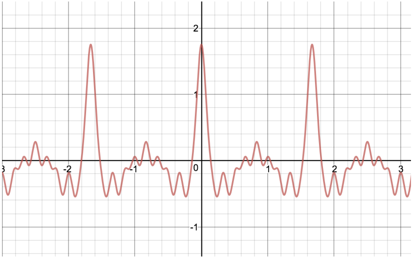
$\rightsquigarrow$ Rien ! (du silence) = **interférences destructives**

DEMO [03.destructive.pd]

Signal (a)périodique

Un signal *périodique* se répète infiniment avec une période T, et une fréquence $\frac{1}{T}$:

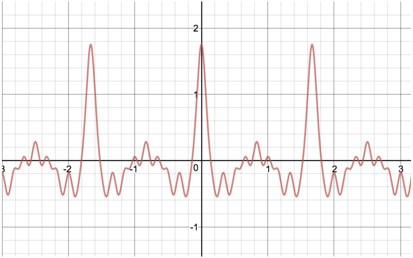
$$s \text{ périodique si } s(t+T) = s(t)$$



Signal (a)périodique

Un signal *périodique* se répète infiniment avec une période T, et une fréquence $\frac{1}{T}$:

$$s \text{ périodique si } s(t+T) = s(t)$$



Remarques

- aucun son n'est périodique (de $-\infty$ à $+\infty$)
  (mais *pseudo-périodique*)
- si fréquence <50Hz, il est perçu comme un *rhythme*
- si fréquence >20Hz, il est perçu comme ayant une *hauteur*

Signal (a)périodique

Un signal *apériodique* ne se répète jamais (bruit)

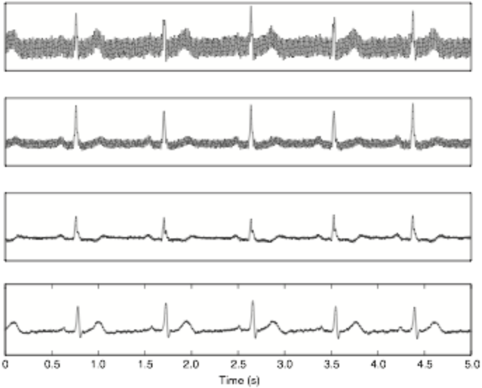


FIGURE 1.1 Three-lead electrocardiograph (ECG) signals. Note the significant amount of interference (noise) in the raw signals (top three traces).

La théorie de Fourier

Joseph Fourier (1768–1830)

"Toute fonction périodique $s(t)$ de fréquence f_0, peut être décomposée comme une somme infinie de sinusoïdes de fréquences multiples de f_0."

$$s(t) = \sum_{k=0}^{+\infty} A_k \cos(2\pi k f_0 t + \phi_k)$$

La théorie de Fourier

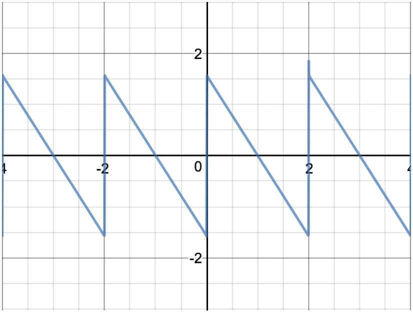
Exemple

La fonction *dent de scie* :

$$s(t) = (-t \mod 1) \cdot 2 - 1$$

peut s'écrire :

$$s(t) = \sum_{k=0}^{+\infty} \frac{1}{k} \cos(2\pi k t + \frac{\pi}{2})$$



La théorie de Fourier

$$s(t) = \sum_{k=0}^{+\infty} A_k \cos(2\pi k f_0 t + \phi_k)$$

Conclusion

Un son périodique n'est caractérisé que par les amplitudes A_k de ses **harmoniques**.
(les phases ϕ_k ne comptent pas pour l'oreille)

Des noms pour les harmoniques

$k = 0$ la *composante continue*

$k = 1$ la *fréquence fondamentale*

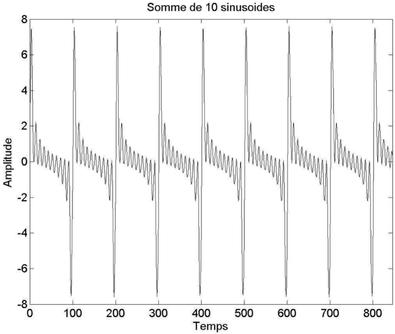
$k > 1$ le $(k-1)$ème *partiel*

Timbre d'un signal périodique

Le *timbre* est la "couleur" d'un son périodique

- différencie le son d'une flûte de celui d'un violon (à fréquence égale)
- déterminé par l'amplitude A_k des harmoniques
- on le visualise sur un *spectrogramme* (fonction du numéro k de l'harmonique $\rightarrow$ amplitude)

Exemple

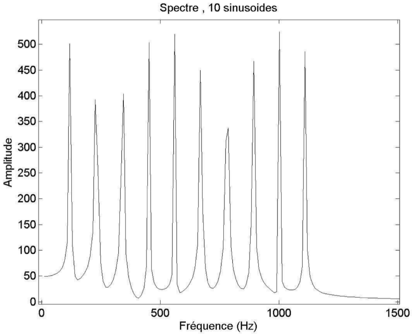


Timbre d'un signal périodique

Le *timbre* est la "couleur" d'un son périodique

- différencie le son d'une flûte de celui d'un violon (à fréquence égale)
- déterminé par l'amplitude A_k des harmoniques
- on le visualise sur un *spectrogramme* (fonction du numéro k de l'harmonique $\rightarrow$ amplitude)

Exemple



Spectre d'un signal apériodique

Le *spectre* d'un son apériodique représente son contenu fréquenciel

- ce n'est plus une somme discrète d'harmoniques mais une fonction des fréquences :
- on le visualise (aussi) sur un *spectrogramme* (fonction continue, fréquence $f \rightarrow$ amplitude)

Exemples

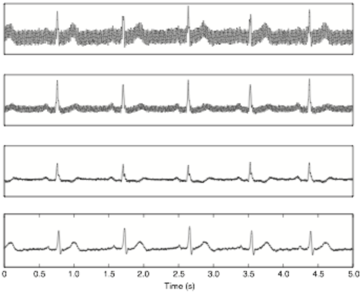


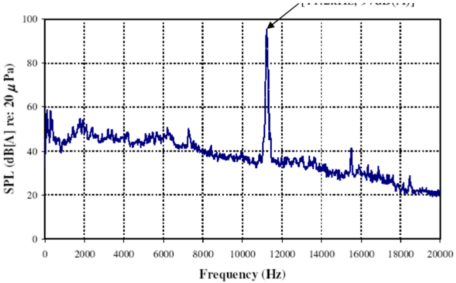
FIGURE 1.1 Three-lead electrocardiograph (ECG) signals. Note the significant amount of interference (noise) in the raw signals (top three traces).

Spectre d'un signal apériodique

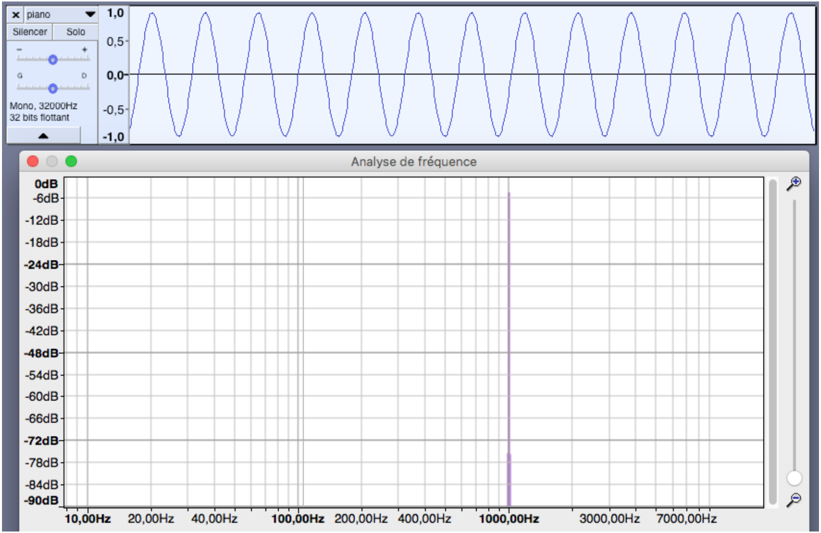
Le *spectre* d'un son apériodique représente son contenu fréquenciel

- ce n'est plus une somme discrète d'harmoniques mais une fonction des fréquences :
- on le visualise (aussi) sur un *spectrogramme* (fonction continue, fréquence $f \rightarrow$ amplitude)

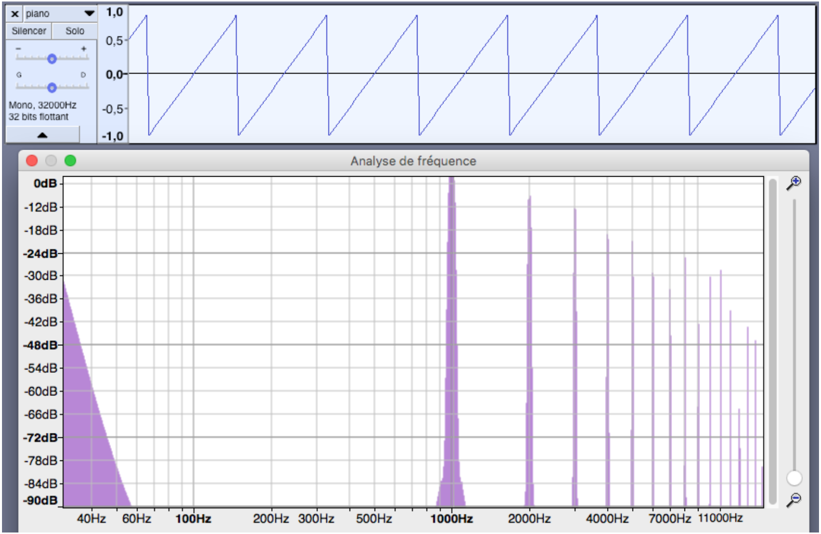
Exemples



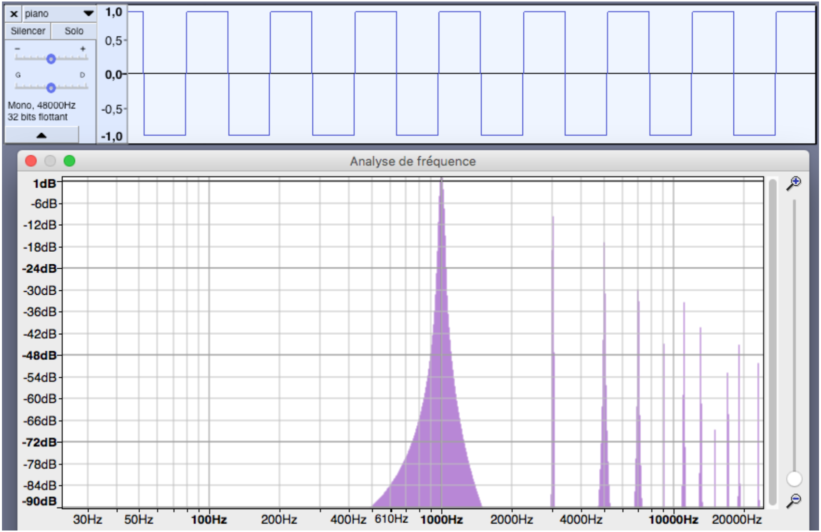
Relation entre forme d'onde et spectre



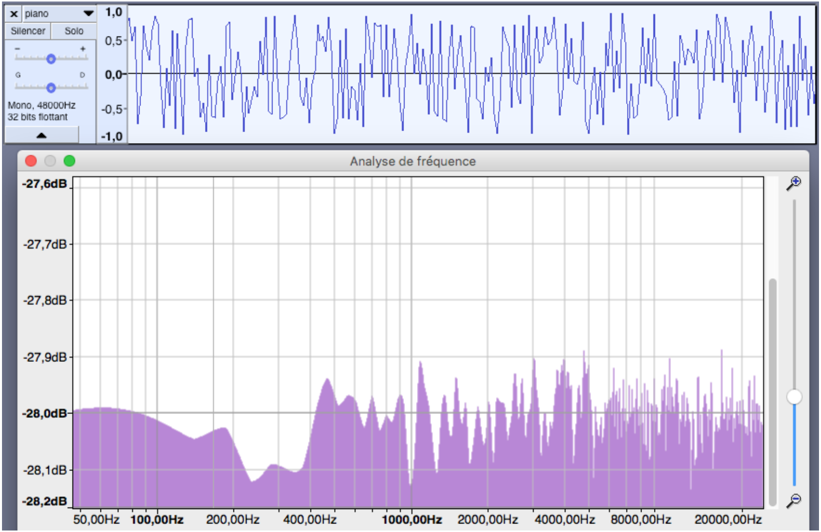
Relation entre forme d'onde et spectre



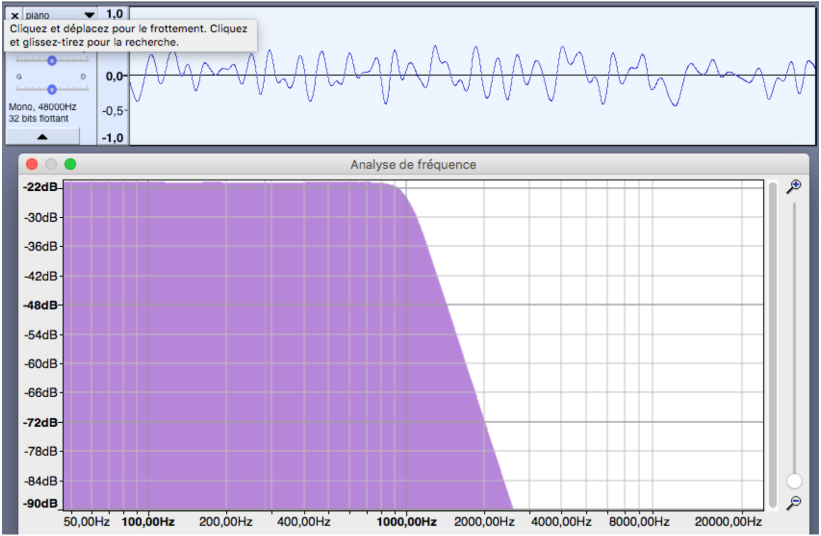
Relation entre forme d'onde et spectre



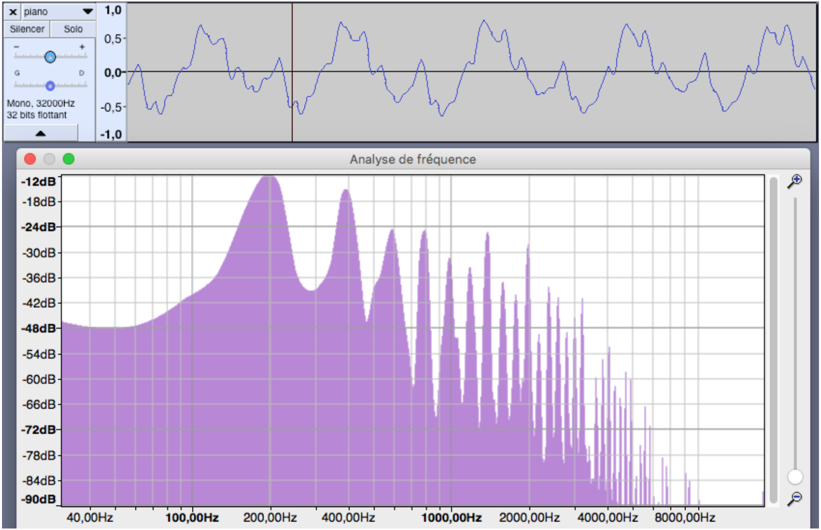
Relation entre forme d'onde et spectre



Relation entre forme d'onde et spectre



Relation entre forme d'onde et spectre



Relation entre forme d'onde et spectre

Intuition

forme d'onde	**spectre**
lisse	basses fréquences
pointu	hautes fréquences
apériodique	lisse
périodique	pointu
discontinuité	infini

La transformée de Fourier (inverse)

TF Transforme une forme d'onde $x(t)$ en son spectre $X(f)$

TFI fait l'inverse

$$\begin{tikzcd}
\text{Forme d'onde} \arrow[r, bend left, "TF"] & \text{Spectre} \arrow[l, bend left, "TFI"]
\end{tikzcd}$$

La transformée de Fourier (inverse)

TF Transforme une forme d'onde $x(t)$ en son spectre $X(f)$

TFI fait l'inverse

$$\text{Forme d'onde} \underset{TFI}{\overset{TF}{\rightleftarrows}} \text{Spectre}$$

Expression mathématique

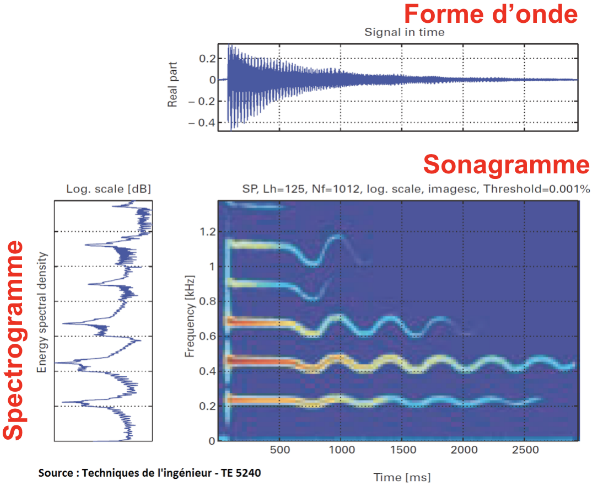
Pour les matheux :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-i2\pi ft}dt$$

(I)FFT : (Inverse) Fast Fourier Transform

Son algorithme le plus connu

Le sonagramme



Combine 2 représentations en une en 3D :

- forme d'onde (amplitude/temps)
- spectrogramme (amplitude/fréquence à un temps donné)

Audio Numérique

Du continu au discret

Un signal analogique $s(t)$ est *continu* :

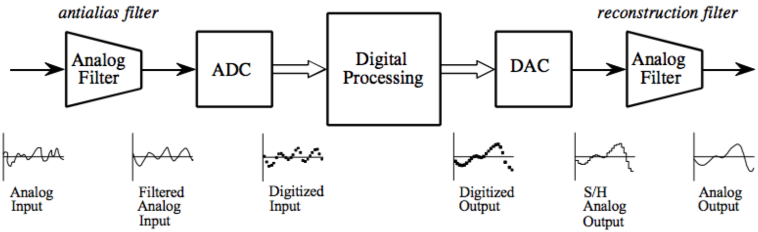
- défini pour toute valeur de $t \in \mathbb{R}$
  (a une valeur pour tous les points de la ligne du temps)
- peut prendre n'importe quelle valeur dans $\mathbb{R}$
  (sa mesure est aussi précise que l'on le souhaite)

L'ordinateur manipule des données *discrètes* dans un temps *discret* :

- le calcul est rhythmé par une horloge
  (entre deux tick d'horloge, aucune nouvelle information)
- une donnée ne peut prendre qu'un nombre fini de valeurs
  (ex : 16 bits $= 2^{16} = 65536$ valeurs possibles)

De l'ADC au DAC

Un schéma courant de processeur de signal audio :
(ex : une pédale de guitare)



l'ADC (convertisseur analogique-numérique) échantillonne le signal analogique en un flux de valeurs numériques discrètes

le DAC (convertisseur numérique-analogique) reconstruit un signal analogique continu à partir d'un flux de valeurs numériques discrètes

entre les deux le DSP modifie arbitrairement le flux de valeurs

Un signal numérique est une approximation

Un signal numérique $s[n]$ est un flux *discret* de valeurs (*échantillons*/*samples*) *discrètes* :

flux discret
: entre deux samples contigus dans le temps, il n'y a *pas* d'information

valeurs discrètes
: chaque sample ne peut prendre qu'un nombre fini de valeurs

Un signal numérique est une approximation

Un signal numérique $s[n]$ est un flux *discret* de valeurs (*échantillons*/*samples*) *discrètes* :

flux discret entre deux samples contigus dans le temps, il n'y a *pas* d'information

valeurs discrètes chaque sample ne peut prendre qu'un nombre fini de valeurs

$$s[n] : \mathbb{N} \rightarrow \{-32768, \ldots, 32768\}$$

Un signal numérique est une approximation

Un signal numérique $s[n]$ est un flux *discret* de valeurs (*échantillons*/*samples*) *discrètes* :

flux discret
: entre deux samples contigus dans le temps, il n'y a *pas* d'information

valeurs discrètes
: chaque sample ne peut prendre qu'un nombre fini de valeurs

$$s[n] : \mathbb{N} \rightarrow \{-32768, \ldots, 32768\}$$

Codage PCM (Pulse Code Modulation)

- flux d'échantillons à intervalle régulier (ex : 44.1kHz/96kHz)
- chacun représente une mesure du signal à un instant
- et est codé dans le même espace (ex : 8/16/32 bits)

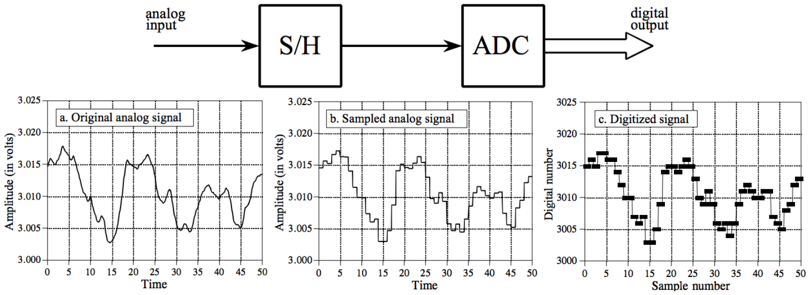
$\rightsquigarrow$ représentation dans le domaine temporel

Un signal numérique est une approximation

Conversion analogique→numérique

Deux étape :

- échantillonnage
  (mesure à intervalle régulier)
- quantification
  (déplacement à la valeur discrète la plus proche)



Échantillonnage

Mesure du signal analogique à intervalle régulier

Fréquence d'échantillonnage f_S

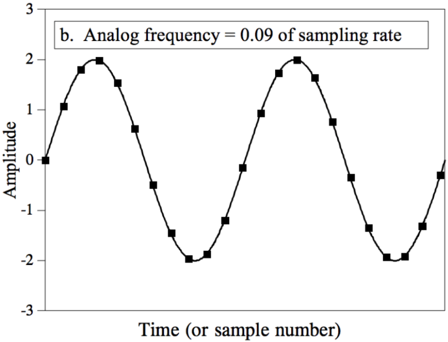
Exprimé en Hertz :

8kHz	téléphone
32kHz	radio
44.1kHz	CD
48kHz, 96kHz, 192kHz	*"Hi-Res"* : zéro différence audible avec CD (mais utile en synthèse)

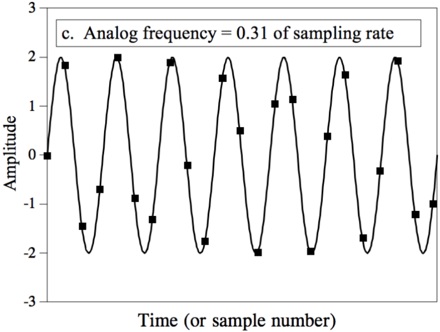
Exemple

`https://xiph.org/video/vid1.shtml` (à partir de 9:30)

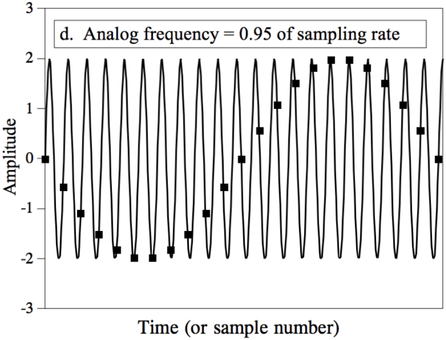
Le théorème de Shannon-Nyquist



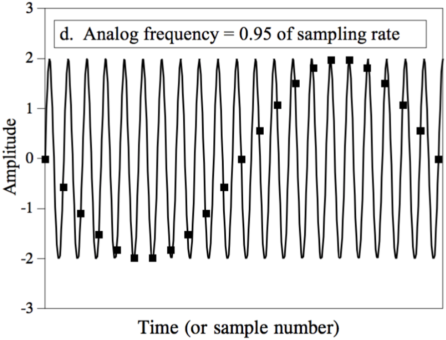
Le théorème de Shannon-Nyquist



Le théorème de Shannon-Nyquist



Le théorème de Shannon-Nyquist



Théorème

La représentation discrète d'un signal requiert une fréquence d'échantillonnage supérieure au double de la fréquence maximale présente dans ce signal.

Cette limite est appelée *fréquence de Nyquist* $f_N = \frac{f_S}{2}$

Repliement du spectre (*aliasing*) [05.aliasing.pd]

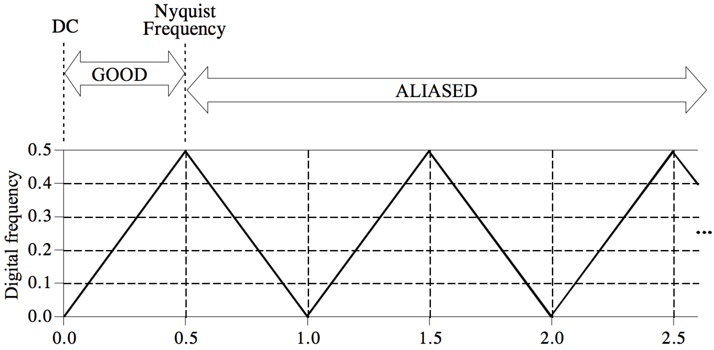
Que se passe-t-il si on échantillonne un signal
qui contient des fréquences supérieures à f_N ?

Repliement du spectre (*aliasing*) [05.aliasing.pd]

Que se passe-t-il si on échantillonne un signal
qui contient des fréquences supérieures à f_N ?

Réponse

Les fréquences au-delà sont “repliées” en dessous de Nyquist



(et s’entendent comme des artefacts désagréables)

Repliement du spectre (*aliasing*) `[05.aliasing.pd]`

Comment introduit-on de l'aliasing ?

- en échantillonnant avec un “mauvais” ADC
  (qui ne filtre pas les fréquences $> f_N$)
- en rééchantillonnant un signal de façon naïve
  (ex : en jetant un sample sur deux)

Que faire pour le prévenir ?

- augmenter f_S
  (plus de samples $\rightsquigarrow$ plus de calcul pour le processeur)
- ne jamais générer de sinusoïde $> f_N$
- utiliser des algorithmes *rééchantillonnage band-limités*
  (filtrent les fréquences $> f_N$)

Quantification [07.quantize.pd]

C’est le choix (par l’ADC) de la valeur discrète la plus proche de la valeur “réelle”.

Quantification [07.quantize.pd]

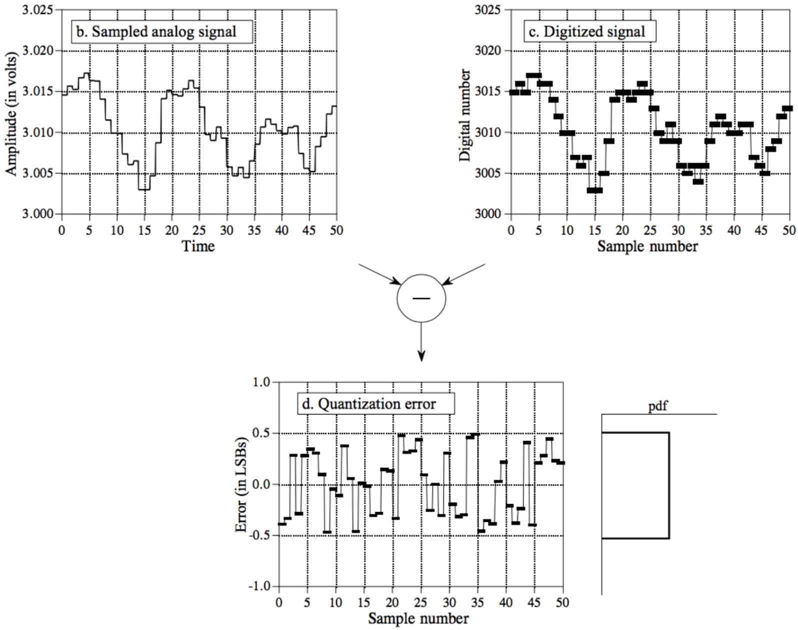
C'est le choix (par l'ADC) de la valeur discrète la plus proche de la valeur "réelle".

Résolution

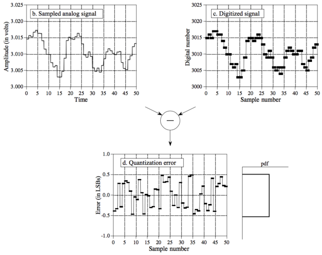
Exprimé en bits

- **8 bits** 256 valeurs différentes
  (rapport signal/bruit = 50 dB ; artefacts désagréables)
- **16 bits** 65536 valeurs
  (rapport signal/bruit = 98 dB ; CD)
- **24 bits** 16 millions de valeurs
  (rapport signal/bruit = 98 dB ; utilisé en production)
- **32 bits** 4 milliards de valeurs
  (rapport signal/bruit = 200 dB ; traitement interne)

Quantification [07.quantize.pd]



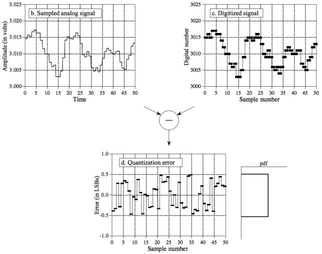
Quantification `[07.quantize.pd]`



Conclusion

La quantification ne fait que rajouter du **bruit** au signal

Quantification [07.quantize.pd]



Conclusion

La quantification ne fait que rajouter du **bruit** au signal

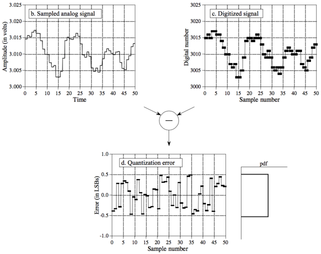
Anecdote

On peut mesurer le rapport signal/bruit d'un medium en bits

cassette audio 9 bits

disque vynile 10 bits

Quantification [07.quantize.pd]



Conclusion

La quantification ne fait que rajouter du **bruit** au signal

Anecdote

On peut mesurer le rapport signal/bruit d'un medium en bits

cassette audio 9 bits

disque vynile 10 bits

Pour aller plus loin : `https://xiph.org/video/vid2.shtml`

Quantification `[07.quantize.pd]`

Représentation des samples

entiers signés 8/16/24 bits quantification linéaire ; les valeurs sont répartie linéairement entre -2^N et $2^N - 1$.
(*ex pour 16 bits* : min=-32768, max=32767)

flottants 32/64 bits quantification exponentielle : plus de valeurs pour représenter les amplitudes faibles que les grandes. Suit la perception de l'oreille.
(*cf* : IEEE 754, A-law, μ-law)

Quantification [07.quantize.pd]

Dépassement [07.overflow.pd]

Que se passe-t-il quand le résultat d'une opération sur un sample dépasse *(overflow)* la valeur max/min de sa représentation ?
(*ex sur 16 bits* : 32767+1)

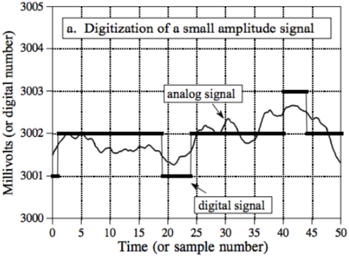
troncature
: *(wraparound)* comportement par défaut des entiers machine (*ex sur 16 bits* : 32767+1=-32768)

écrêtage
: *(clipping)* plus proche du comportement des circuits analogiques (clamping) ⇝ artefacts moins gênants
(*ex sur 16 bits* : 32767+1=32767)

- c'est un problème quand on utilise des entiers signés
- les flottants peuvent stocker des valeurs entre $\pm 3 \cdot 10^{38}$; or par convention on représente les signaux par des valeurs entre -1 et 1
  (on a de la *marge*)

Dithering

En ajoutant du bruit de façon *maîtrisé* avant quantification, on peut améliorer sa fidélité



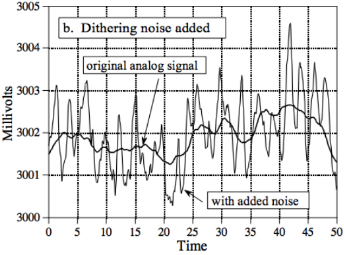
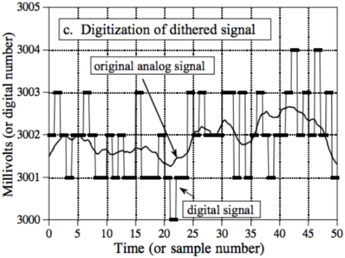


FIGURE 3-2
Illustration of dithering. Figure (a) shows how an analog signal that varies less than ±½ LSB can become *stuck* on the same quantization level during digitization. Dithering improves this situation by adding a small amount of random noise to the analog signal, such as shown in (b). In this example, the added noise is normally distributed with a standard deviation of 2/3 LSB. As shown in (c), the added noise causes the digitized signal to toggle between adjacent quantization levels, providing more information about the original signal.



Utilisation créative

… ou alors on utilise sciemment les artefacts de la numérisation, en les simulant en software :

- bruit de quantification
- repliement du spectre

Utilisation créative

… ou alors on utilise sciemment les artefacts de la numérisation, en les simulant en software :

- bruit de quantification
- repliement du spectre

$\Rightarrow$ *bitcrusher*

DEMO