

# SAV

## Applications et traitements audio

Romuald Mosqueron

Octobre 2017



R. Mosqueron (HES-SO / HEIG-VD  
/ REDS), 2017

1

## Rappel

Audio :

- Qui concerne l'enregistrement ou la transmission des sons.
- Qui se rapporte au son; Domaine d'activité technique associé au son, aux produits destinés à être écoutés;
- Traitement du son

En audio, le niveau de pression

$L_p$  (SPL en anglais) =  $20 \log_{10} (\tilde{p}/p_{ref})$ , avec  $p_{ref} = 20 \mu\text{Pa}$ .

Sons audibles :

- fréquence  $f$  de 20 Hz à 20 kHz
- niveau de pression de 0 dB (20  $\mu\text{Pa}$ ) à 140 dB (200 Pa)

Fréquences Normales (référence):

- 1Khz
- 440Hz pour la musique
- 800Hz pour la téléphonie

Si nous pouvons aujourd'hui écouter de la musique, donc du son, c'est parce que nos connaissances et nos expériences passées nous ont permis de fabriquer des appareils capables de le capturer et de le restituer.

Alors qu'il est impossible d'emprisonner un son directement puisqu'il s'évapore dans l'air, il fallait trouver un moyen pour le capturer.

Toutefois, enregistrer un son sans pouvoir le restituer n'aurait eu aucun intérêt. Le premier problème technique que durent résoudre nos aïeux fut le suivant : **passer de la source sonore à un support de mémorisation, et ensuite passer de ce support à la restitution du son d'origine.**

# Signal audio analogique

- Grand public  
Téléphonie, radiodiffusion, télévision, cinéma,  
Industrie du disque (disque vinyl 33 tours) et de  
l'enregistrement (cassette audio)
- Bioacoustique  
Acoustique médicale (audiométrie, prothèse auditive)  
Perception du son (homme, animaux)
- Acoustique musicale  
Analyse et synthèse de sons ; instruments de musique
- Analyse/synthèse de parole  
Dialogue avec des machines
- Lutte contre le bruit  
Mesures et critères de niveaux de bruit  
Acoustique des constructions ; vibrations
- Acoustique sous-marine  
Surveillance, repérage de sous-marins, de bancs de  
poissons  
Sondage (recherche de pétrole, étude des fonds, ...)
- Acoustique architecturale  
Acoustique des salles, sonorisation, propriétés des  
matériaux
- Mesures acoustiques  
distorsion)  
Instrumentation spécialisée (sonomètre, analyseur de

R. Mosqueron (HES-SO / HEIG-VD / REDS), 2017

5

# Signal audio numérique

- Lecteurs-enregistreurs de disques (CD, MD, DVD audio).
- Enregistrement sur bande magnétique avec têtes stationnaires ou rotatives (DAT, DCC, ...).
- Enregistrement sur disque dur ou mémoire statique d'une station de travail.
- Consoles de mixage numérique.
- Effets spéciaux numériques.
- Synthétiseurs de musique numériques.
- Emission, transmission et réception de programmes radio et télévision avec nécessité d'utiliser des algorithmes de compression de données (DAB, D2, ...).
- Audio dans les systèmes vidéo numériques (DVD, BluRay).

R. Mosqueron (HES-SO / HEIG-VD / REDS), 2017

6

L'analogique et le numérique sont deux procédés pour transporter et stocker des données.

Exemple: Enregistrement analogique et numérique du son.

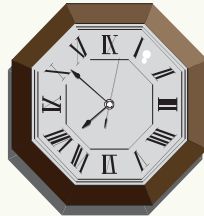
- 1) Reproduire les valeurs du phénomène,
- 2) L'enregistrer sur un support, afin de pouvoir l'interpréter
- 3) Reproduire le phénomène original de la façon la plus exacte possible.

L'analogique est né avec le début de l'électricité tandis que le numérique est apparu plus récemment avec l'ère de l'informatique.

Les phénomènes qui nous entourent sont quasiment tous continus, c'est-à-dire que lorsque ces phénomènes sont quantifiables, ils passent d'une valeur à une autre sans discontinuité. C'est pour cela que quelque soit la nature du phénomène, on y associe un signal analogique.

- **Analogique:**

Les valeurs ne sont pas séparées par des sauts: entre deux valeurs A et B il existe un nombre infini d'autres valeurs



- **Digitale (numérique):**

Une valeur est représentée par une chaîne finie de symboles appelés **digits**.

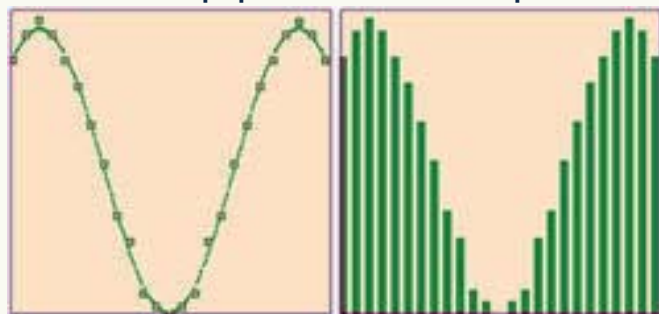


Il est impossible de représenter numériquement tous les nombres existants entre deux valeurs analogiques  
⇒ il faut une infinité de points!

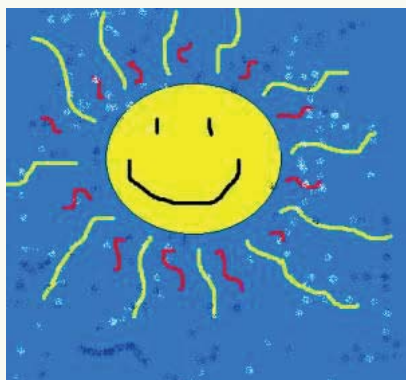
Signal analogique => courbe,

Signal numérique => histogramme.

⇒ Un signal numérique est beaucoup plus facile à reproduire qu'un signal analogique.

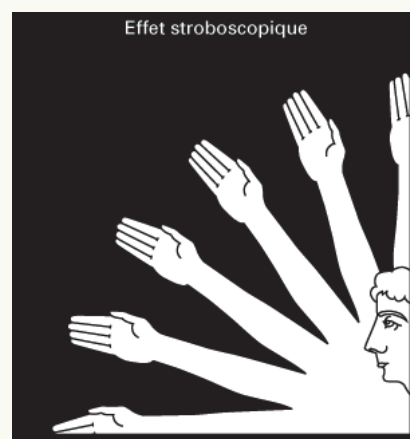


# Petit modèle de comparaison



C'EST L'ANALOGIQUE

# Petit modèle de comparaison



C'EST LE NUMERIQUE

Pour bien percevoir la différence de qualité entre les deux types de signaux traités, on peut aussi imaginer une personne dansant en plein soleil : celui-ci diffuse une lumière continue et tous les mouvements du danseur peuvent être perçus. C'est l'analogique. Maintenant imaginons ce même danseur sous une lumière stroboscopique : celui-ci n'éclaire que le danseur par à coups, et le mouvement n'est pas perçu de façon continue. C'est le numérique. Maintenant si le stroboscope éclaire le danseur à une fréquence très élevée, l'image perçue par notre œil sera très proche dans les deux cas mais le stroboscope ne donnera jamais exactement la réplique parfait de l'image perçue par le soleil.

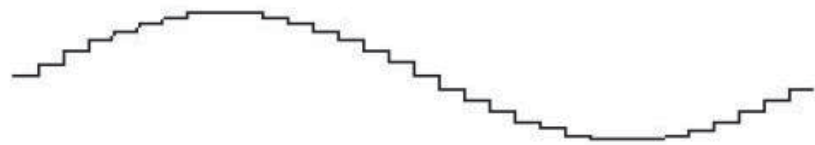
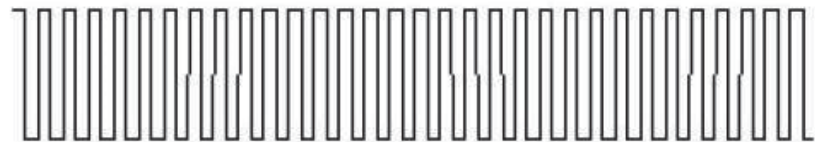
## Analogique

- Une recherche de qualité et de fidélité, réplique fidèle du signal.
- La numérisation du signal analogique perd en quelque sorte de « sa qualité » lors de deux étapes : l'échantillonnage et la quantification.

ANALOGIQUE →



NUMERIQUE →

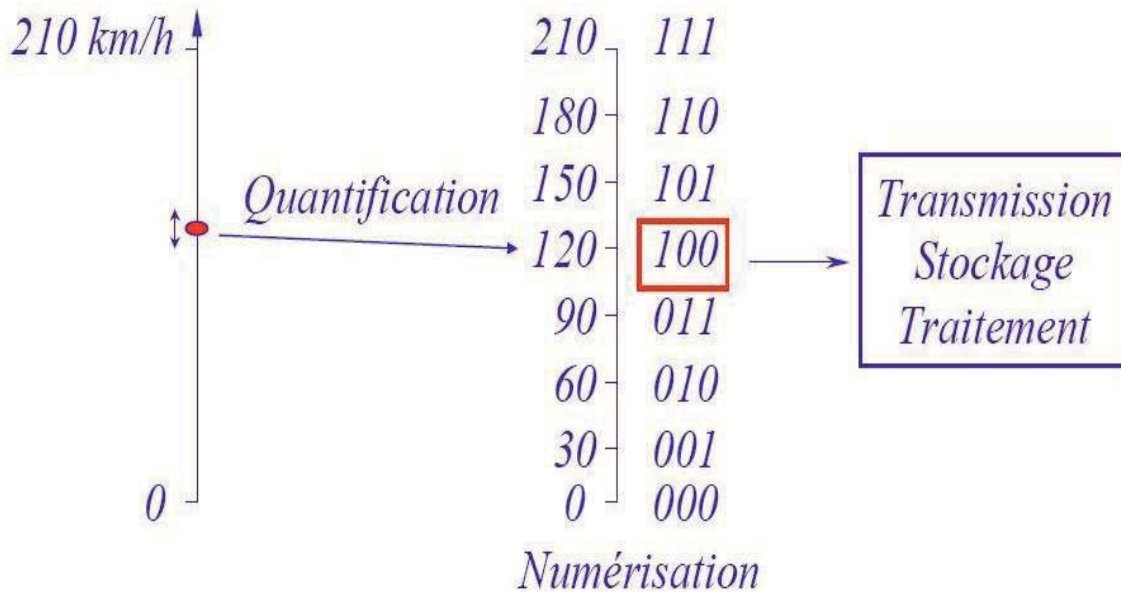


# Echantillonnage

Echantillonnage : discrétisation de l'axe des temps.

- Le convertisseur prélève des valeurs du signal à des intervalles de temps réguliers et les transforme en nombre binaire => ne lit pas toute la courbe, mais seulement quelques échantillons.
- Ceci permet de définir une période ou une fréquence d'échantillonnage (nombre d'évènements lus par seconde).
- Première limite du signal numérique, il prend des valeurs constantes approchées du signal analogique par intervalles de temps précis, ce qui explique la forme en « escalier » du signal numérique. Plus la fréquence d'échantillonnage est élevée plus la forme du signal numérique sera fidèle à celle du signal analogique.





-Quantification : discrétisation de l'axe des amplitudes.

- En analogique, toutes les valeurs d'amplitude sont permises : 134,567 ; 1266,66 ...

- Pas en numérique : il y a quantification.

⇒ Le nombre de bits limite la précision du codage : 135 ; 1267

⇒ Plus le nombre de bits utilisés pour le codage sera grand, meilleure sera la ressemblance avec le signal d'origine mais plus ce nombre est élevé plus l'opération de conversion est lente et le circuit coûteux.

Autre limite du signal numérique car le signal issu de l'opération de numérisation ne pourra prendre les mêmes valeurs, on aura systématiquement des valeurs approchées, atténuant la précision du signal.

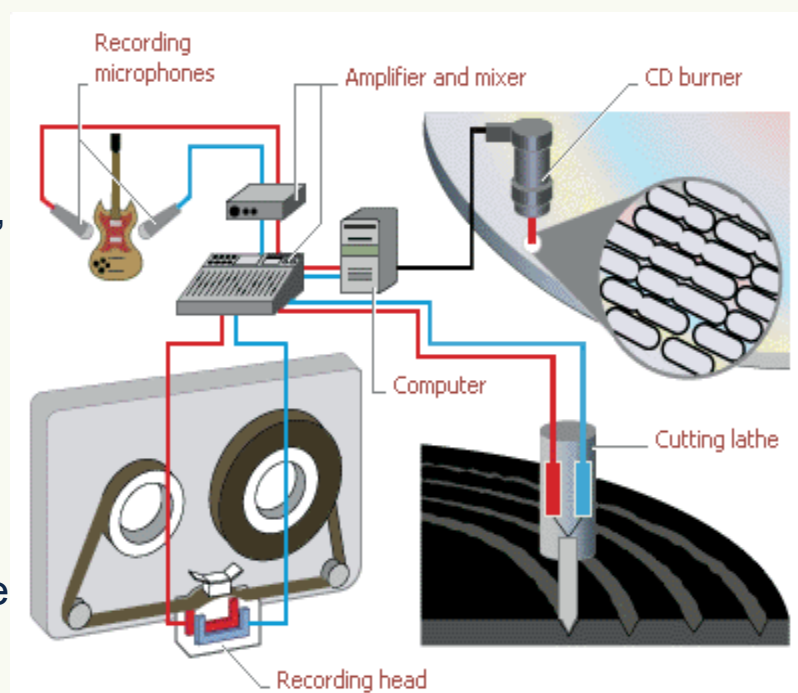
**Analogique** {  
- Variation continue des grandeurs électriques  
- Modèle théorique sinusoïdal

**Numérique** : Variation binaire des grandeurs électriques  
(nombre de valeurs de signaux limités)

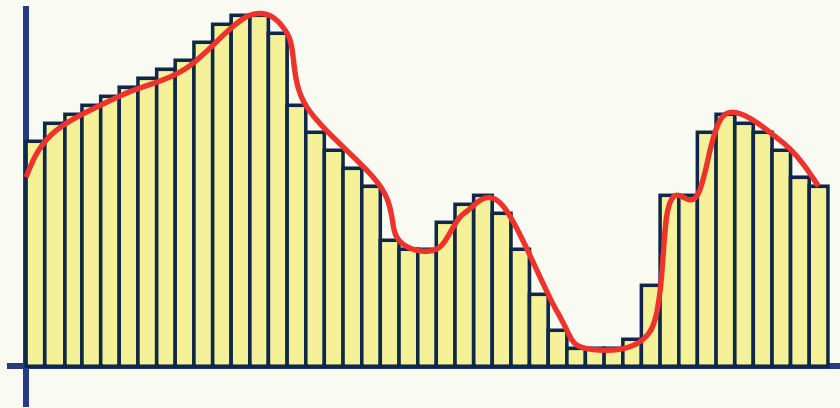
→ Des domaines d'utilisation variés

Si le support physique peut prendre:

- des valeurs continues, on parle d'enregistrement analogique.
- des valeurs bien définies, en nombre limité, on parle alors de signal numérique.



# Analogique et Numérique



Pour enregistrer sur un CD, le son est échantillonné 44'100 fois par seconde. La valeur de chaque échantillon est stockée en binaire, à l'aide de 16 digits (*bits*): il n'y a **que** 65'536 valeurs possibles ( $2^{16}$ )

# Disque Vinyle VS CD-Audio



Avantages ?

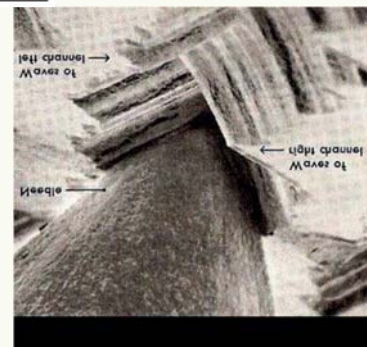
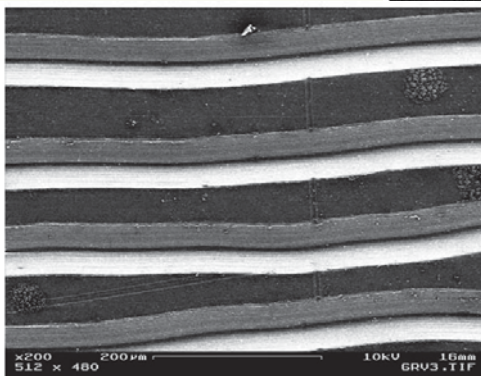
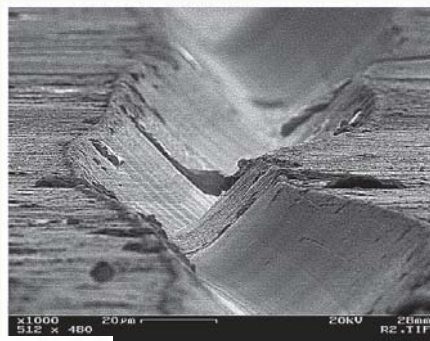
Inconvénients ?



# Disque Vinyle

Le disque est posé sur un plateau tournant à une vitesse stable. Un bras pivotant librement et équilibré de façon à s'appuyer légèrement sur le disque porte la tête de lecture, ou cellule. Un stylet muni d'une pointe en saphir ou, plus récemment, en diamant est posé dans le sillon, qui va guider le bras de lecture du début à la fin. Le stylet transmet les déviations du sillon à un transducteur électromagnétique ou piézoélectrique qui transforme ces vibrations en signal électrique.

# Disque Vinyle



# Le disque compact

Quand le faisceau laser atteint un plat, le rayon est réfléchi sur une cellule photoélectrique. Lorsqu'il atteint un creux, la cellule photoélectrique ne reçoit qu'une faible réflexion. La cellule photoélectrique reçoit donc des séries d'impulsions lumineuses correspondant aux creux et aux plats du disque. Ces impulsions lumineuses sont la base des données numériques binaires. Un simple remplacement du signal faible "0" et du signal accentué "1" donne une lecture numérique pure sans altération, sans défaillance ou dégradation.

# Le disque compact

Premier représentant des disques optiques, le CD est constitué d'une galette de plastique sur laquelle sont déposés une couche réfléchissante (aluminium ou or), un vernis protecteur et éventuellement une couche de « décoration ».

Les données y sont représentées grâce à des petits trous disposés le long d'une spirale serrée (1,6  $\mu\text{m}$  d'espacement entre deux tours sur un CD de 74 min, 1,5  $\mu\text{m}$  sur un CD de 80 min, l'espacement minimal permis par la norme) sur la surface supérieure de la couche de plastique. Ces trous ont une largeur de 600 nm et une longueur qui peut aller de 800 nm à 3500nm.

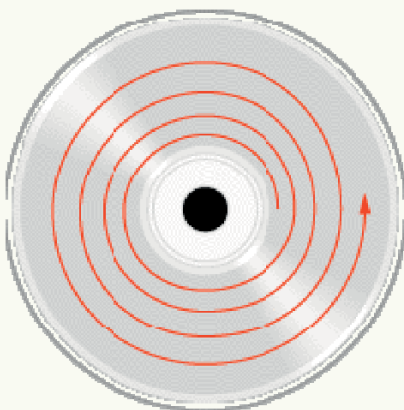
Pour la lecture, un laser d'une longueur d'onde de 780 nm (rouge) est focalisé sur la piste via une lentille et est réfléchi par la couche métallique. Selon qu'il rencontre un trou ou non, la lumière réfléchit interfère plus ou moins avec la lumière d'origine, modulant ainsi l'intensité lumineuse mesurée par un détecteur. Chaque changement d'intensité (passage d'un trou à une bosse ou d'une bosse à un trou) correspond à un 1, tandis que l'absence de changement d'intensité correspond à un 0.

# Le disque compact

## L'encodage EFM

Les données sont encodées de manière à garantir que les changements ne soient ni trop fréquents, ni trop rares : chaque séquence de 8 bits est encodée sur 14 bits avec un algorithme garantissant qu'il y a toujours au moins 2 et au plus 10 zéros entre deux 1 (d'où l'existence d'une longueur maximale pour un trou). Ceci permet d'éviter une désynchronisation entre le défilement du disque et la lecture des données. En effet, sur une longue séquence de 0, une faible erreur dans le contrôle de la vitesse de rotation peut provoquer une erreur de lecture. Par exemple, sur une séquence de 1000 zéros consécutifs, une erreur de seulement 0,1% provoquerait la lecture de 999 ou 1001 bits au lieu de 1000. En limitant la longueur des séquences de zéro, on assure d'avoir une resynchronisation régulière (à chaque 1), autorisant un contrôle moins précis (et donc moins coûteux) de la vitesse de rotation : avec des séquences ne dépassant pas 10 zéros, il faut une erreur de plus de 5% pour avoir un bit en moins ou en plus.

# Le disque compact



©2000 How Stuff Works

Les informations sur un CD standard sont codées sur une piste d'alvéoles en spirale. Par exemple, dans le cas d'un CD de 74min, la spirale mesure 5.38kms de longueur. Les données sont lues à une vitesse linéaire constante de ~1.2m/s.

Si le temps maximal d'enregistrement sur un CD est de 74 minutes, le nombre maximal de bits stockés dans un CD est donc de:

$$(44100 \text{ échantillons/sec}) * (16 \text{ bits}) * (2 \text{ canaux}) * (74 * 60 \text{ sec}) = \\ 6'265'728'000 \text{ bits} = 783'216'000 \text{ bytes} \\ (1 \text{ byte} = 8 \text{ bits})$$



## Cas de la musique

Les disques vinyles n'utilisent pas l'échantillonnage, et de ce fait, le son n'est donc pas numérisé en 'escaliers'. Chacun sait en effet qu'à l'opposé de la bande magnétique ou du disque vinyle, le Compact Disc (CD) échantillonné en numérique a 44 100 Hz, ampute le signal audio, en le codifiant sous forme d'une courbe 'escalier'. Le son numérique est plus « métallique » et n'a pas la chaleur du son analogique. D'où le net avantage qualitatif musical du son analogique sur le son numérique, et du disque vinyle sur le disque compact.

## Cas de la musique

Donc au contraire des médias numérique, le disque vinyle, analogiques, n'est pas un produit échantillonné. Il est fabriqué par pressage d'une galette de vinyle, à partir d'une matrice dont la gravure est analogique.

C'est pourquoi les informations sonores gravées dans ses sillons restituent un signal analogique linéaire, continu. De surcroît, le son du disque vinyle est d'une indiscutable qualité musicale avec incomparable richesse harmonique.

Le résultat ? Une image sonore réaliste et extrêmement précise, avec un rendu étonnant des aigus et une définition exceptionnelle de l'espace stéréophonique. La musique restituée semble « naturelle ».

# Avantage du numérique

- Plus grande fiabilité des données.
- Plus grande gamme dynamique.
- Meilleure réponse fréquentielle.
- Pas de "wow", de "flutter" ou de battement (par correction de la base de temps).
- Très faible distorsion.
- Très bonne stabilité (à la température, au vieillissement, ...).
- Manipulation facile des données mises en mémoire.
- Différents supports de stockage (magnétique, optique, mémoires solides).
- Les données sont copiables et recopiables sans pertes.
- Possibilités de post-traitement.
- Possibilité de réaliser en numérique des algorithmes de traitement qui sont trop complexes ou même impossible à faire dans le domaine analogique (filtres à phase linéaire, compression du temps, compression des données, ...).

# Inconvénients du numérique

- Très sensible aux pertes de données ; une détection et correction des erreurs est nécessaire.
- Il y a quelques années, circuiterie électronique plus complexe et coûteuse pour des traitements simples. Les choses ont changé avec l'apparition de DSPs spécialement dédiés à l'audio numérique et incluant même des convertisseurs AN et NA.
- Mauvais comportement en cas de surcharge (pour éviter un écrêtage, un "head-room" est nécessaire).
- Problèmes de compatibilité entre différents formats; problèmes de standardisation.
- Nécessité de limiter de façon franche la bande passante.
- Nouvelles technologies (progrès rapides, beaucoup de nouveaux produits et de formats).



# Une recherche de qualité et de fidélité : signal analogique

## → Besoin de conversion

-Echantillonnage }  
-Quantification } Plus de bits → plus lent et plus cher

## → Qualité du signal analogique

-Domaine musical → Son analogique → meilleure qualité

# Les problèmes liés à l'évolution

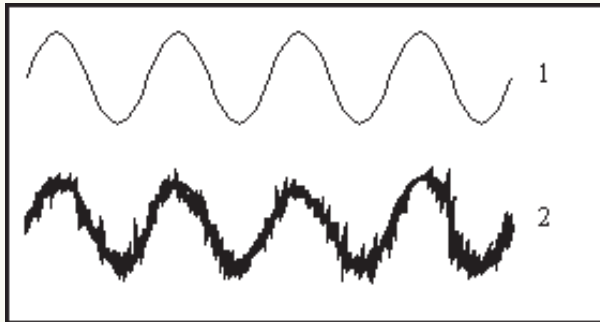
→ Adaptation des circuits au numérique

→ Le numérique encore limité dans quelques domaines

Quand le numérique palie les défauts de l'analogique



## L'analogique : Transmission difficile

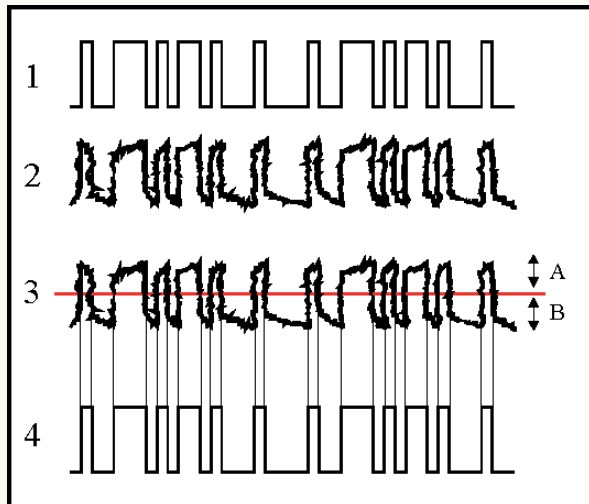


Signal 1 = signal d'entrée

Signal 2 = signal de sortie

# Pourquoi une telle dégradation ?

- ➔ Les bruits : signaux aléatoires et non désirés, donc des parasites
- ➔ La dérive : décalage entre le signal d'entrée et celui de sortie



- Correction des défauts
- Code de correction d'erreurs
- Exploitation par un ordinateur (interface avec homme + facilité de programmation)

# Tableau comparatif

Analogique:	Numérique:
<p><u>inconvénients:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• bruit</li> <li>• dérive</li> <li>• mémorisation difficile                             <ul style="list-style-type: none"> <li>condensateur</li> <li>piste magnétique (séquentiel)</li> </ul> </li> <li>• consommation importante</li> </ul> <p><u>avantages:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• caractère analogique des capteurs</li> <li>• facilité des réglages</li> </ul>	<p><u>inconvénients:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• quantification et échantillonnage plus de bits ==&gt; plus lent et plus cher</li> <li>• inutilisable pour des fréquences &gt; à 10 GHz</li> </ul> <p><u>avantages:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• insensible aux bruit et dérives si erreur, il y a possibilité de mettre en place des algorithmes de correction</li> <li>• facilité de transmission on peut régénérer le signal</li> <li>• isolement galvanique</li> <li>• facilité de traitement numérique</li> <li>• intelligence de la programmation dialogue homme-machine commande adaptative</li> </ul>

## Avez-vous déjà essayé?

Le dépannage?

Le numérique c'est compliqué. C'est plein de calculs qui se font à très grande vitesse dans des circuits électroniques où il est difficile de voir ce qui se passe avec les instruments de mesure habituels. Donc, par exemple, pas question de trouver la panne quand elle arrive, sauf en atelier hyper-spécialisé.

L'analogique est relativement simple : avec un oscilloscope et un multimètre, on peut suivre facilement le trajet du signal. Un bon dépanneur radio-télé peut s'y retrouver. Le numérique c'est sans compromis, ça marche ou ça ne marche pas. Entre les deux, c'est horrible.

## Avez-vous déjà essayé?

Avez-vous déjà essayé de dépasser le niveau maximum admis ?

En analogique, la saturation n'est pas apocalyptique, elle ne fait qu'augmenter progressivement la distorsion. Certains ingénieurs s'en servent même en studio pour donner un son spécial.

Le numérique c'est strict, rigide, carré, lourd.

## Avez-vous déjà essayé?

Le montage:

L'analogique c'est souple, rond, léger. On enregistre directement. On coupe, on colle à l'endroit, à l'envers, sans précautions spéciales. Une empreinte de doigt sur la bande ne l'empêche pas d'être relue et réenregistrée. Et l'analogique, ça marche ! Combien d'utilisateurs de certains magnétophones à cassettes numériques se sont arrachés les cheveux à cause de précieux enregistrements qu'ils ne pouvaient plus relire ?

## Qu'en pensez-vous?

Que penser de cet utilisateur qui nous annonce qu'il essaye depuis six mois de relire des enregistrements d'un concert live sans y arriver ? Des fluctuations de hauteur se produisent au cours de la lecture et aucun technicien n'arrive à trouver l'origine du problème. Et c'est fabriqué par un grand constructeur, en qui on serait tenté d'avoir confiance !

Dans de telles conditions, sauf en étant parfaitement sûr de son matériel, comment prendre aujourd'hui le risque de réaliser un enregistrement précieux en numérique, sans faire en parallèle un enregistrement analogique ? Demandez ce qu'en pensent ceux qui ont perdu leur enregistrement parce qu'ils ont voulu le faire en numérique ! La perte d'un enregistrement est une chose, celle de la réputation en est une autre !

## Qu'en pensez-vous?

En numérique, il est obligatoire de réaliser de nombreuses mesures. De leur précision dépendra la 'fidélité' de restitution du signal d'origine. Et qui dit précision, dit stockage. Là est le principal inconvénient de cette technologie des 'temps modernes', car dès que la précision augmente, la quantité de données suit le même chemin et demande toujours plus d'espace. C'est pour cette raison que des formats de compression audio ont vu le jour, tel le MP3.

En analogique, la précision de la 'fidélité sonore' existe également. Pour l'améliorer, l'augmentation du défilement de la bande est souvent utilisée. En passant, par exemple, la vitesse de défilement de 19cm/s à 38cm/s, les détails enregistrés sur le support magnétique seront plus nombreux, ce qui se traduira par une restitution sonore plus fidèle.

## Fréquences d'échantillonnage

AES 5-2008 recommandent trois fréquences d'échantillonnage pour l'audio numérique.

- La fréquence de 48 kHz (à  $\pm 10^{-5}$ ) est le choix principal. Elle est utilisée pour la production et l'échange de données audio numériques. Elle permet une largeur de bande audio de 20 kHz.
- Pour les applications directement en relation avec des produits grand public, une fréquence d'échantillonnage de 44,1 kHz peut être utilisée. C'est le cas du disque audio numérique (système Compact Disc)
- La fréquence de 32 kHz est admise pour les applications en radiodiffusion et télévision ou en relation avec celle-ci, pour lesquelles une largeur de bande audio de 15 kHz est suffisante (ITU-T recommandation J.53). On peut aussi l'utiliser pour des transmissions à travers des canaux à capacité limitée.

La coexistence de trois fréquences d'échantillonnage et la nécessité d'échange de programmes enregistrés ne sont possibles que grâce à des systèmes de conversion de fréquence d'échantillonnage. La complexité de tels systèmes fonctionnant en temps réel dépend aussi bien du rapport des fréquences que du fait que l'une et l'autre sont verrouillées. Bien qu'il soit possible de passer en numérique d'un signal à un autre avec des fréquences d'échantillonnage quelconques, un rapport fractionnaire permet de faire un système de conversion plus simple.

D'autres fréquences d'échantillonnage sont utilisées. Pour l'audio, ce sont généralement des multiples ou des sous-multiples des trois fréquences mentionnées plus haut (par exemple 22,05 kHz, 96 kHz, 192 kHz).

## CAN et CNA

1) Limiter la bande passante du signal d'entrée par un filtre passe-bas anti-recouvrement ("antialiasing") à  $f_{\max}$

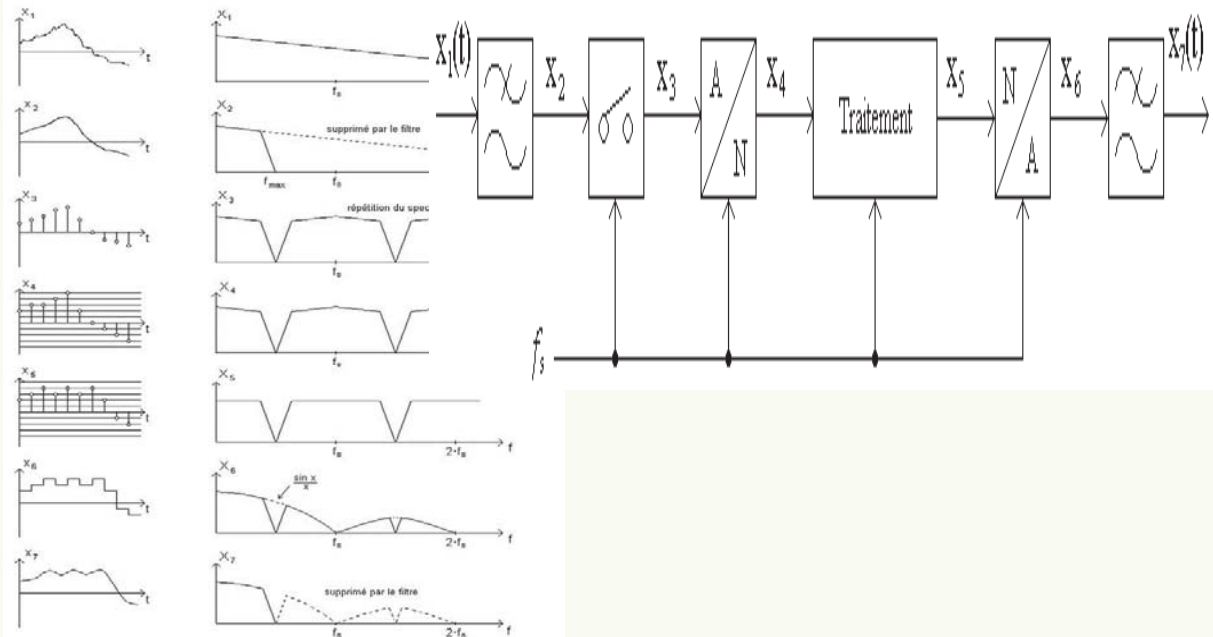
2) Échantillonner le signal analogique à une cadence

$$T_s = 1/f_s \text{ avec } f_s \geq 2 \cdot f_{\max}$$

3) Numériser les échantillons à l'aide d'un quantificateur (convertisseur AN)

Le signal numérique ainsi obtenu peut alors être transmis, traité, compressé ou mémorisé.

4) A la fin du "traitement", le signal numérique (éventuellement décompressé) est transformé en un signal analogique à l'aide d'un convertisseur NA et d'un filtre passe-bas de lissage.



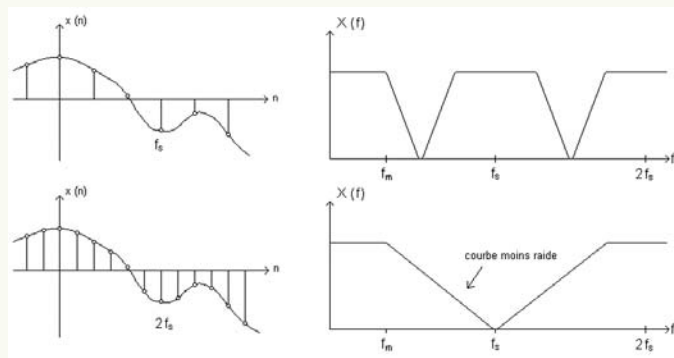
R. Mosqueron (HES-SO / HEIG-VD / REDS), 2017

47

# Sur-échantillonnage

Soit un signal analogique de bande passante limitée à  $f_{\max}$ . On sait que la fréquence d'échantillonnage doit respecter la condition  $f_s > 2 f_{\max}$  pour qu'il n'y ait pas de recouvrement. En augmentant d'un facteur  $M$  la fréquence d'échantillonnage, on respecte d'autant mieux le théorème d'échantillonnage. Cela permet d'utiliser un filtre passe-bas anti-recouvrement d'ordre plus faible.

$M=2$



R. Mosqueron (HES-SO / HEIG-VD / REDS), 2017

48



En numérique, on peut multiplier par  $M$  la fréquence d'échantillonnage après coup.

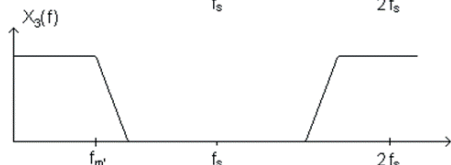
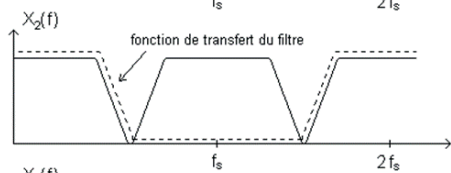
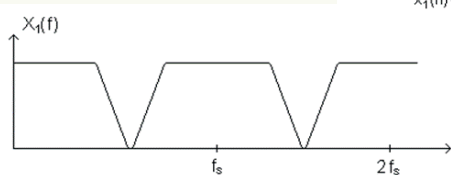
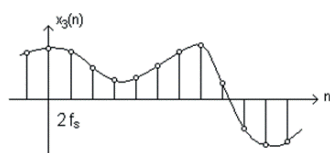
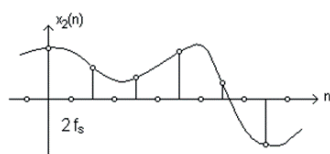
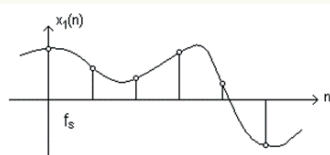
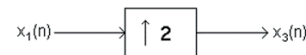
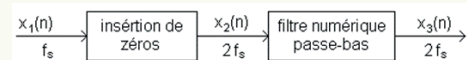
Pour cela, on crée un nouveau signal de fréquence d'échantillonnage  $M f_s$  obtenu en insérant  $M - 1$  échantillons nuls entre les échantillons à fréquence d'échantillonnage  $f_s$  du signal de départ.

Ensuite, on filtre numériquement ce signal par un passe-bas très performant.

Les  $M-1$  échantillons supplémentaires prennent alors la bonne valeur.

Le multiplicateur de fréquence d'échantillonnage est donc un interpolateur.

Ici  $M = 2$ . Allure temporelle et fréquentielle des signaux entrant en jeu dans ce système.



Le filtre passe-bas a une bande passante de  $f_m$ , avec  $f_m \leq 2 f_s$

# Sous-échantillonnage

On peut diminuer la fréquence d'échantillonnage d'un signal numérique d'un facteur  $N$  en "laissant tomber"  $N-1$  échantillons successifs et en "gardant" la  $N$ ème.

La fréquence d'échantillonnage passe alors de  $f_s$  à  $\frac{f_s}{N}$ .

Si l'on désire respecter le théorème de l'échantillonnage même après diminution de la fréquence d'échantillonnage, il faut que

$$\frac{f_s}{N} > 2 \cdot f_m \quad \Rightarrow \quad f_s > 2N \cdot f_m$$

Cela n'est possible que si le signal de départ est suréchantillonné.

Si ce n'est pas le cas, il faut commencer par filtrer passe-bas le signal numérique à une fréquence  $f_{m'}$  telle que :

$$\frac{f_s}{N} > 2 \cdot f_{m'} \quad \Rightarrow \quad f_s > 2N \cdot f_{m'}$$

En résumé :

- pas besoin de filtre si :  $f_s > 2N \cdot f_m$

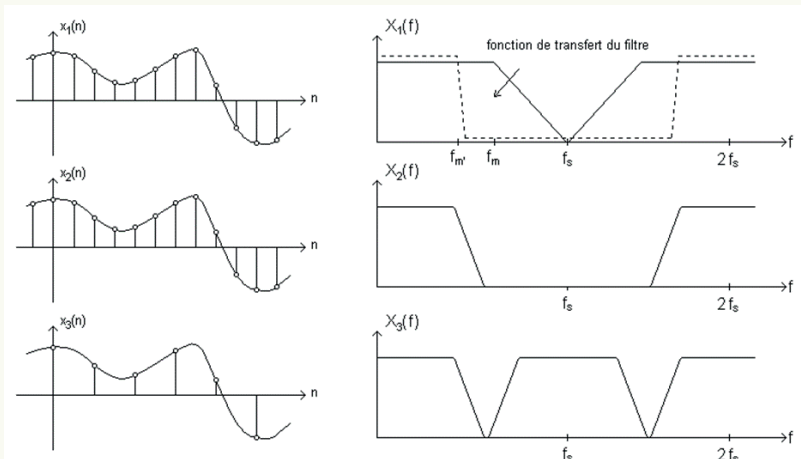
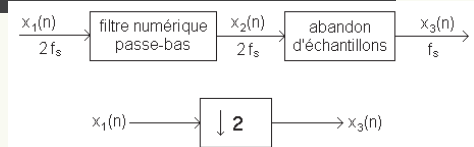
filtre nécessaire si :  $f_s < 2N \cdot f_m$  ; il faut alors  $f_s > 2N \cdot f_{m'}$

# Sous-échantillonnage

Exemple avec  $N = 2$

$f_s = 2 \text{ kHz}$      $f_m = 400 \text{ Hz}$      $f_s > 4 \cdot 400 \text{ Hz}$  : pas de filtre

$f_s = 2 \text{ kHz}$      $f_m = 800 \text{ Hz}$      $f_s < 4 \cdot 800 \text{ Hz}$  : il faut un filtre avec  $f_{m'} < \frac{f_s}{2N} = 500 \text{ Hz}$



# Application : changeur de fréquence d'échantillonnage

La coexistence de trois fréquences d'échantillonnage et la nécessité d'échange de programmes enregistrés ne sont possibles que grâce à des systèmes de conversion de fréquence d'échantillonnage.

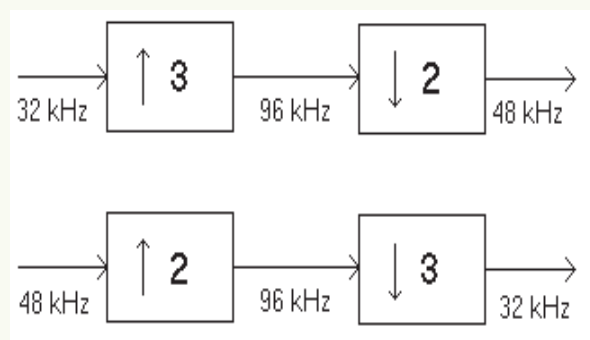
Avant : Passage obligé par une forme analogique (conversion N/A à  $f_{e1}$ , puis A/N à  $f_{e2}$ ).

Aujourd'hui: Purement numérique.

Elle est possible en principe pour un rapport quelconque des fréquences d'échantillonnage, mais elle est beaucoup moins complexe si ce rapport est simple (par exemple 3/2, qui est le rapport entre une fréquence d'échantillonnage de 48 kHz et une à 32 kHz).

# Application : changeur de fréquence d'échantillonnage

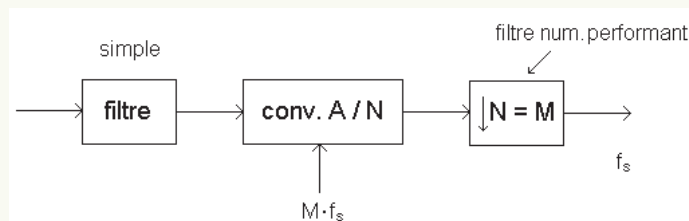
En mettant en cascade un multiplicateur de fréquence d'échantillonnage par  $M$  avec un diviseur de fréquence d'échantillonnage par  $N$ , on obtient un circuit qui multiplie  $f_s$  par  $M / N$ . Un seul filtre numérique est nécessaire.



# Application : convertisseur AN REDS heig-vd

Au lieu d'avoir un filtre passe-bas anti-recouvrement d'ordre élevé suivi d'un convertisseur de fréquence d'échantillonnage  $f_s$ , on peut utiliser un filtre passe-bas d'ordre plus faible suivi d'un convertisseur de fréquence  $M f_s$  (on fait du sur-échantillonnage) suivi d'un réducteur de fréquence d'échantillonnage de  $N = M$ .

Au lieu de devoir utiliser un filtre analogique compliqué d'ordre élevé, on a un filtre analogique simple et un filtre numérique facile à réaliser d'ordre élevé.

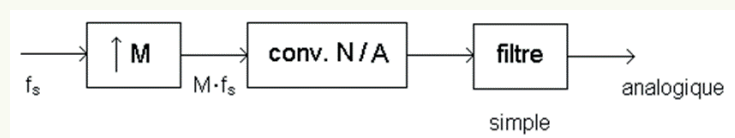


R. Mosqueron (HES-SO / HEIG-VD / REDS), 2017

55

# Application : convertisseur NA REDS heig-vd

Au lieu d'avoir un filtre passe-bas analogique de lissage d'ordre élevé qui fait suite à un convertisseur de fréquence d'échantillonnage  $f_s$ , on peut préalablement multiplier la fréquence d'échantillonnage d'un facteur  $M$  et utiliser un convertisseur plus rapide suivi d'un filtre analogique plus simple.



Pour conserver la forme temporelle des signaux, on utilise généralement des filtres (numériques et analogiques) à phase linéaire.

R. Mosqueron (HES-SO / HEIG-VD / REDS), 2017

56