

Numérisation d'un signal analogique

1. Signal analogique, signal numérique :

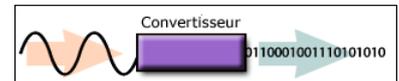
Un signal **analogique** est un ensemble **continu** d'informations. (exple : son, capteur de température...)

Un signal **numérique** est un ensemble **discret** (c'est-à-dire discontinu) d'informations.

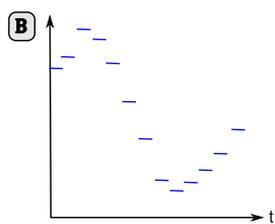
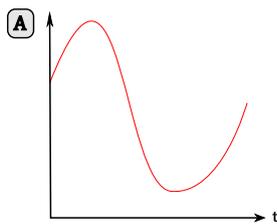
Pour transformer un signal analogique en signal numérique, il faut **discrétiser** les informations : on parle de **numérisation**.

Les ordinateurs ne traitant que des données binaires (0 ou 1), les informations sont ensuite traduites en binaire, c'est-à-dire en ensemble de 0 ou de 1.

La numérisation est faite par un **convertisseur analogique-numérique** (en abrégé : **CAN**):



☞ Classifier les signaux décrits ou représentés ci-dessous en « analogique » ou « numériques »



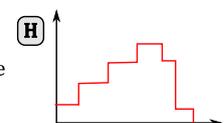
C Evolution de la température au cours d'une journée

D Affichage toutes les heures des températures

E Film diffusé en streaming sur internet

F Son émis par un haut-parleur relié à un lecteur CD (via un amplificateur)

G Film enregistré par un magnétoscope sur cassette VHS



Analogiques : A, C, F, G Numérique : B, D, E, H

La numérisation est d'autant meilleure que le signal numérique se rapproche du signal analogique initial.

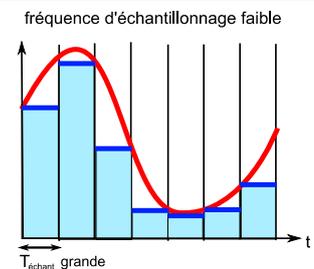
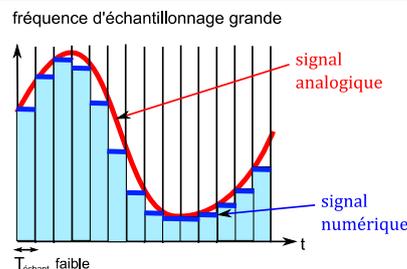
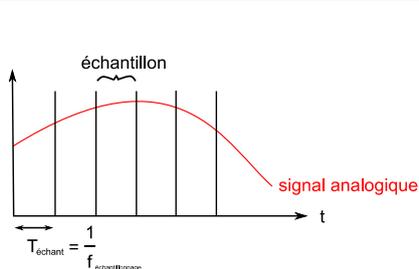
Pour cela, plusieurs paramètres ont leur importance, en particulier la fréquence d'échantillonnage et la quantification.

2. La fréquence d'échantillonnage :

2.1. Généralités :

Pour numériser un signal, il faut le découper en **échantillons** (« samples » en anglais) de durée égale T_e .

La **fréquence d'échantillonnage** correspond au nombre d'échantillons par seconde et s'exprime : $F_e = 1/T_e$.



☞ Compléter en barrant un des deux adjectifs entre les crochets :

Plus la fréquence d'échantillonnage sera grande, plus la période d'échantillonnage sera [*petite*], plus le nombre d'échantillons sera [*grand*], plus le signal numérique sera [*proche*] du signal analogique et donc [*meilleure*] sera la numérisation :

2.2. Approche expérimentale:

- Utiliser l'animation suivante : http://www.ostralo.net/3_animations/swf/echantillonnage.swf
- Régler la fréquence du générateur à 500Hz :

☞ *1^{er} cas : faible fréquence d'échantillonnage* : régler la fréquence de l'échantillonneur à $F_e = 1 \text{ kHz}$. Observer et conclure.

$T_e = 1/1.10^3 = 1 \text{ ms}$ On rappelle que $T_{\text{signal}} = 2 \text{ ms}$. Comme $T_e = 1 \text{ ms}$, sur une période, seules 2 valeurs sont acquises. Très nettement insuffisant pour reproduire la forme du signal.

2^{de} cas : grande fréquence d'échantillonnage : régler le nombre de points de manière à ce que la fréquence d'échantillonnage soit de 10 kHz. Observer et conclure quant au choix de la fréquence d'échantillonnage.

$T_E = 1/10.10^3 = 0,1 \text{ ms}$. $T_{\text{signal}} = 2 \text{ ms}$. Donc sur une période, il y aura 20 valeurs pour tracer le signal numérique. On se rapproche alors de la forme du signal analogique. Il faut que F_E soit grande.

Théorème de Shannon

Pour numériser convenablement un signal, il faut que la fréquence d'échantillonnage soit au moins deux fois supérieure à la fréquence du signal à numériser. On l'a vu avec le 1^{er} cas où $F_E = 2F$ et on perd l'information du signal analogique !

1. En se remémorant le domaine de fréquence audible par l'Homme, expliquer pourquoi les sons des CD audio sont échantillonnés à 44,1 kHz.

Le domaine de fréquences audibles par l'Homme est limité à 20 kHz. Il faut donc, dans un son, conserver les fréquences proches de 20 kHz si l'on veut le numériser correctement. D'où le choix de 44,1 kHz (supérieur au double du 20 kHz).

NB : le 44,1 (et non 44,0) vient d'un choix technologique datant de l'époque du stockage des sons sur la bande magnétique d'un magnéscope (oui j'ai bien écrit « scope » !)

2. La voix humaine est comprise dans une bande de fréquence comprise entre 100 et 3400 Hz. Quelle fréquence d'échantillonnage doit-on choisir pour la téléphonie ?

Fe doit être supérieure à $2 \times 3400 \text{ Hz} = 6800 \text{ Hz}$. C'est pourquoi la fréquence échantillonnage de la téléphonie est de 8000 Hz.

2.3. Influence de la fréquence d'échantillonnage sur les hautes fréquences du signal analogique :

- télécharger les fichiers : **piano_8kHz_16bits.wav** et **piano_44kHz_16bits.wav** depuis l'ENT : <https://leon-blum.mon-ent-occitanie.fr/disciplines/sciences-physiques/terminale-s/ts-ae-29c-numerisation-a-distance-16562.htm>

- Ouvrir et écouter ces 2 sons :
- Quelle grandeur, liée à la numérisation, ces deux fichiers ont-ils en commun ?

Le nombre de bits

- Que constatez vous ? quel est le signal qui restitue le mieux les aigus ?

Le son en 8 kHz est moins riche et surtout possède moins d'aigu. Baisser la fréquence d'échantillonnage élimine les informations sur les hautes fréquences.

Exemple d'application :

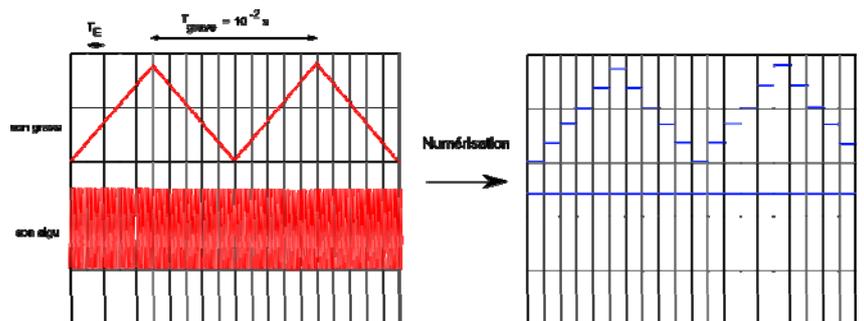
Un son aigu a une fréquence de 10 kHz. Un son grave a une fréquence de 100 Hz

1. Calculer les périodes de ces deux sons.
2. Si la fréquence d'échantillonnage choisie pour numériser ces sons est de 1 kHz, calculer la durée des échantillons.
3. Conclure : Si l'on réduit la fréquence d'échantillonnage, quel type de son est alors mal numérisé ?

1. $T_{\text{aigu}} = 10^{-4} \text{ s}$ et $T_{\text{grave}} = 10^{-2} \text{ s}$.

2. Si $F_E = 1 \text{ kHz}$ alors $T_E = 10^{-3} \text{ s}$

3. Pour le son grave, chaque période est décomposée en 10 échantillons
Pour le son aigu, dans un échantillon, il y a 10 périodes donc l'information du son aigu est perdue.



2.4. Conclusion :

Deux idées à retenir sur le choix de la fréquence d'échantillonnage :

- Il faut choisir F_E de manière *signal analogique*.
- Une fréquence F_E trop faible sur *les hautes fréquences du*
- Ordres de grandeurs :

Type de support de sons	F_E choisie
CD audio	44,1 kHz
DVD	48 kHz
Téléphonie	8 kHz
Radio numérique	22,5 kHz

à ce que $F_E > 2F_{\text{maxi}}$ du

*enlève l'information portant *signal analogique*.*

3. La quantification :

3.1. Présentation de la quantification

Lors de la numérisation, il faut également discrétiser les **valeurs de l'amplitude du signal**. La quantification consiste, pour chaque échantillon, à lui associer **une** valeur d'amplitude.

Cette valeur de l'amplitude s'exprime en « bit » et l'action de transformer la valeur numérique de l'amplitude en valeur binaire s'appelle le **codage**.

Qu'est-ce qu'un bit ?

Un « bit » (de l'anglais *binary digit*) est un chiffre binaire (**0** ou **1**)

Avec 2 bits, on peut écrire : **00**, **01**, **10** et **11** soit **4** valeurs. ($4 = 2^2$)

Avec 3 bits, on peut écrire : **000**, **001**, **010**, **011**, **100**, **101**, **110**, **111** soit **8** valeurs ($8 = 2^3$)

Avec 4 bits, on peut écrire $2^4 = 16$ valeurs

Avec n bits, on peut écrire 2^n valeurs

Conversion d'un nombre binaire en nombre décimal : un exemple vaut mieux qu'un long discours :

Que vaut l'**octet** (ensemble de 8 bits) **10110010** en décimal ?

	2^7 = 128	2^6 = 64	2^5 = 32	2^4 = 16	2^3 = 8	2^2 = 4	2^1 = 2	2^0 = 1
Octet =	1	0	1	1	0	0	1	0
somme de:	1 x 128	0 x 64	1 x 32	1 x 16	0 x 8	0 x 4	1 x 2	0 x 1

Ici **10110010** = $1 \times 128 + 0 \times 64 + 1 \times 32 + 1 \times 16 + 0 \times 8 + 0 \times 4 + 1 \times 2 + 0 \times 1 = 178$

Exemples d'écriture binaire :

1. Ecrire la valeur décimale de l'octet 01001101. $1 \times 64 + 1 \times 8 + 1 \times 4 + 1 \times 1 = 77$

2. Écrire, en binaire, la valeur maximale que peut prendre une grandeur codée sur 4 bits puis calculer sa valeur en décimal. **1111** soit $8 + 4 + 2 + 1 = 15$

3. Ecrire l'octet correspondant au nombre 15. Même question pour le 16. 15 : **00001111** et 16 : **00010000**

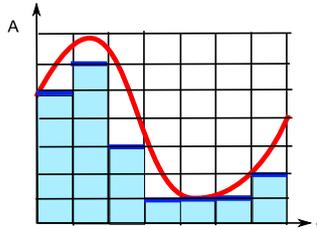
3.2. Exemples de quantifications

1. Avec une quantification de 16 bit (soit une séquence binaire de 16 zéros ou un), de combien de valeurs dispose-t-on pour traduire l'amplitude du signal dans chaque échantillon ?

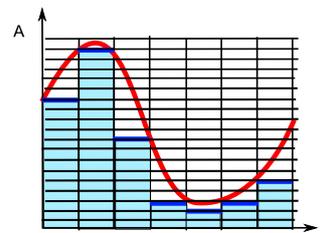
On dispose de $2^{16} = 65536$ valeurs pour traduire l'amplitude du signal dans chaque échantillon.

2. Même question avec une quantification de 8 bit (soit une séquence binaire de 8 zéros ou un).

On dispose de $2^8 = 256$ valeurs seulement pour traduire l'amplitude du signal dans chaque échantillon.



faible quantification
(peu de "bit")
peu de valeurs pour traduire l'amplitude



grande quantification
(beaucoup de "bit")
beaucoup de valeurs pour traduire l'amplitude

3. Compléter en barrant un des deux adjectifs entre les crochets :

Lors de la quantification, plus le codage s'effectue avec un nombre important de bits, plus l'amplitude du signal numérique sera [**proche**] de celle du signal analogique et donc [**meilleure**] sera la numérisation.

4. Exercice :

a. Calculer le nombre de « paliers » dont on dispose pour décrire l'amplitude en 24 bits. Idem en 4 bits.

b. Lequel permettra de bien distinguer un son intense d'un son moins intense ?

1. En 24 bits : $2^{24} = 16\,777\,216$ possibilités et en 4 bits : $2^4 = 16$ possibilités

2. Avec 16 possibilités, on ne pourra pas distinguer deux sons d'intensité sonore très proche.

3.3. Influence de la quantification sur la qualité d'un son :

Les fichiers sont à télécharger depuis l'activité sur l'ENT :

<https://leon-blum.mon-ent-occitanie.fr/disciplines/sciences-physiques/terminale-s/ts-ae-29c-numerisation-a-distance-16562.htm>

• télécharger le fichier : **piano_44kHz_16bits.wav** et **piano_44kHz_8bits.wav**

Ouvrir et écouter ces 2 sons :

Quelle grandeur, liée à la numérisation, ces deux fichiers ont-ils en commun ?

Que remarque-t-on lorsque l'on réduit la quantification ?

Ces fichiers ont la même fréquence d'échantillonnage.

En réduisant la quantification de 16 bits à 8 bits, on perd de l'information sur l'amplitude et l'ordinateur ce qui a pour effet de créer du bruit (un souffle).

4. Choix des critères de numérisation :

Regarder la vidéo sur l'ENT : <https://leon-blum.mon-ent-occitanie.fr/disciplines/sciences-physiques/terminale-s/rtsa-03-numerisation-11933.htm>

En résumé, L'échantillonnage consiste à prélever périodiquement des échantillons d'un signal analogique. La quantification consiste à affecter une valeur numérique à chaque échantillon prélevé. Plus la fréquence d'échantillonnage et la quantification sont grandes, meilleure sera la numérisation.

☞ Alors pourquoi se restreindre au niveau de ces valeurs ?

La limite vient du nombre d'octets qui vont être nécessaires pour numériser le signal car ce nombre sera écrit sur un support de stockage (disque dur, clé USB, DVD...). La capacité de stockage de ces supports n'est pas illimitée.

De plus, il faut penser qu'il faut du temps pour écrire toutes ces données sur un support (durée qui dépend de beaucoup de paramètres : type de support, version du port USB etc....) Les informaticiens parlent de « flux » ou « débit binaire » (en ko/s ou Mo/s). Cette vitesse d'écriture ne peut pas être infinie ! Il en est de même pour transmettre l'information sur un réseau : chaque réseau a son propre débit et réduire le nombre d'octets d'une numérisation d'un son (par exemples) permettra de faire circuler plus de sons numériques différents par seconde.

Pistes de réflexion et informations :

Le nombre N d'octets (ensemble de 8 bits) nécessaires pour « décrire » numériquement une minute de son est:

$$N = F \times (Q/8) \times 60 \times n$$

avec F fréquence échantillonnage en Hz

Q : quantification en bits

n : nombre de voies (si le son est stéréo, n= 2 ; en mono : n = 1)

N s'exprime en octet

Exemples :

1. Calculer la taille occupée, en octets puis Mo, d'une minute du son d'un CD audio (44,1 kHz et 16 bits, stéréo):

$$N = 44\,100 \times (16/8) \times 60 \times 2 = 10\,584\,000 \text{ octets soit environ } 10,6 \text{ Mo (en réalité } 10,9 \text{ Mo, voir remarque)}$$

2. Même question pour le son d'un film encodé au format « ac3 » sur un DVD (48 kHz et 24 bits, stéréo):

$$N = 48\,000 \times (24/8) \times 60 \times 2 = 17\,280\,000 \text{ octets} = 17,3 \text{ Mo (en réalité } 16,5 \text{ Mo, voir remarque)}$$

3. Un réseau informatique domestique de mauvaise qualité possède un débit binaire (nombre d'octets pouvant circuler sur le réseau par seconde) de 230 ko/s. Le son du CD pourra-t-il être transmis sur ce réseau ? Et celui du DVD ?

En une minute, peut transiter $230 \times 60 = 14 \text{ Mo}$ environ. C'est suffisant pour transmettre le son du CD, pas celui du DVD (les informations seront incomplètes, saccadées car le débit n'est jamais réellement constant et une partie du son du DVD sera quand même transmis...)

☞ Exercice bilan :

Une personne mal attentionnée télécharge sur un forum une chanson de 3 minutes au format mp3.

La chanson a été numérisée par un pirate à 16 kHz et 8 bits mono.

La personne, voulant une qualité « DVD » pour la chanson, modifie le fichier et le transforme en 48 kHz et 24 bits stéréo.

a. Calculer le poids en octet de la chanson avant transformation.

b. Même question après transformation.

c. Décrire la sensation auditive que l'on éprouve en écoutant le fichier téléchargé avant transformation.

d. La qualité de la chanson a-t-elle été améliorée par la transformation ?

e. Comment la personne peut-elle améliorer la qualité du fichier téléchargé ?

1. $N = 16\,000 \times (8/8) \times 3 \times 60 \text{ (3 minutes)} \times 1 \text{ (mono)} = 2,88 \cdot 10^6 \text{ o} = 2,8 \text{ Mo}$

2. $N = 48\,000 \times (24/8) \times 3 \times 60 \times 2 \text{ (stéréo)} = 51,8 \cdot 10^6 \text{ o} = 49,4 \text{ Mo}$

3. F_E faible : des aigus semblent absents de la chanson

Quantification faible : on entend beaucoup de bruit et peu la distinction son intense/peu intense.

4. NON, les fréquences aigus absentes ne peuvent pas être « inventées » et le bruit reste présent. Il est juste codé sur plus de bits.

5. Elle ne peut pas !