

# CONVERSION ANALOGIQUE / NUMERIQUE - L'ECHANTILLONNAGE

Lorsque l'on veut stocker une information sur un **support numérique** (CD, ordinateur...), il nous faut convertir le **signal analogique** (signal sonore, électrique, lumineux...) en un **signal numérique**.

On doit donc utiliser un dispositif de **conversion analogique / numérique** (Convertisseur Analogique Numérique : C.A.N.)

## Exemples:

- Si l'on veut enregistrer un son pour le stocker dans la mémoire de l'ordinateur ou sur le disque dur, ou encore sur un CD, il faut brancher un micro sur la carte son de l'ordinateur. Le micro convertit le signal sonore en un signal électrique analogique. Puis la carte son dispose d'un C.A.N. qui convertit alors le signal reçu en signal numérique. Ce qui fait la qualité d'une carte son, c'est en grande partie la qualité de ce C.A.N.
- Si l'on veut enregistrer un signal électrique, par exemple les variations d'une tension au cours du temps, sur l'ordinateur, il nous faut faire parvenir ce signal électrique (analogique) à la console GTS2. Celle-ci contient un C.A.N. qui va effectuer la conversion en un signal numérique que l'ordinateur sera capable de stocker et de traiter.

Comme on le sait, la première étape de la conversion consiste à prélever des "échantillons" de mesures à intervalles de temps réguliers.

Cette opération est appelée "**échantillonnage**".

La qualité de cet échantillonnage dépend essentiellement de **2 paramètres** dont vous avez étudié les influences respectives:

- **la fréquence d'échantillonnage**
- **le nombre de bit du convertisseur**

## 1. **Influence de la fréquence d'échantillonnage**

Rappelons quelques définitions :

**La période T du signal** correspond à la durée d'une « vibration » de notre tension alternative. Cette période est de **20ms**, elle a été réglée au niveau du GBF (générateur de basses fréquences).

**La fréquence f du signal** correspond au nombre de « vibrations » de notre tension alternative pendant une durée de 1s.  
La fréquence de notre signal a été réglée au niveau du GBF à une valeur de **50Hz**.

**Fréquence et période sont liées par la relation :**

$$\boxed{f = \frac{1}{T}} \quad \text{ou} \quad \boxed{T = \frac{1}{f}}$$

Ne pas confondre période et fréquence du signal avec la période d'échantillonnage et la fréquence d'échantillonnage.

**La période d'échantillonnage  $T_e$**  est égale à la durée séparant 2 mesures.

**La fréquence d'échantillonnage  $f_e$**  est égale au nombre de mesures en 1s.

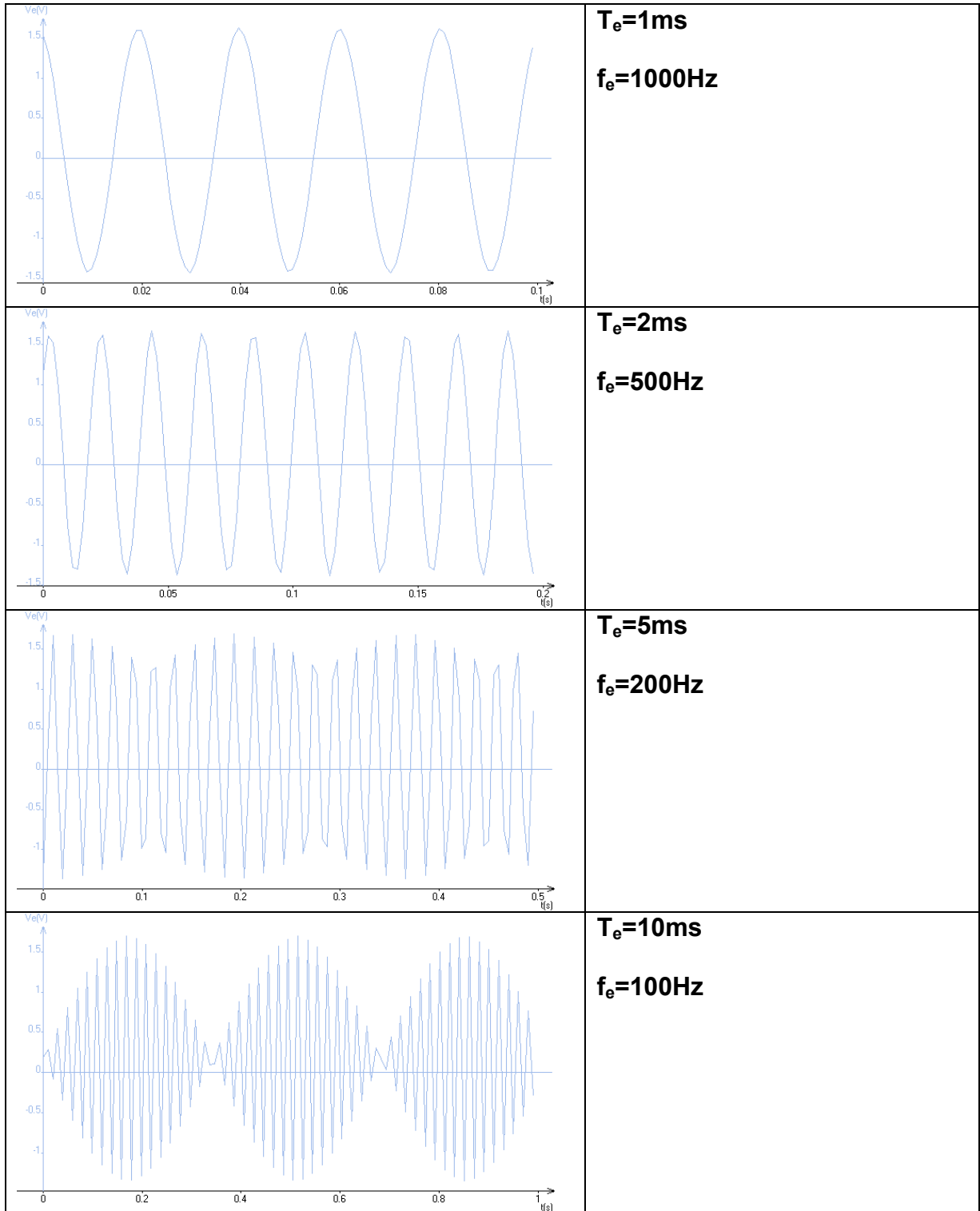
Il existe entre  $T_e$  et  $f_e$  le même type de relation qu'entre  $f$  et  $T$  :

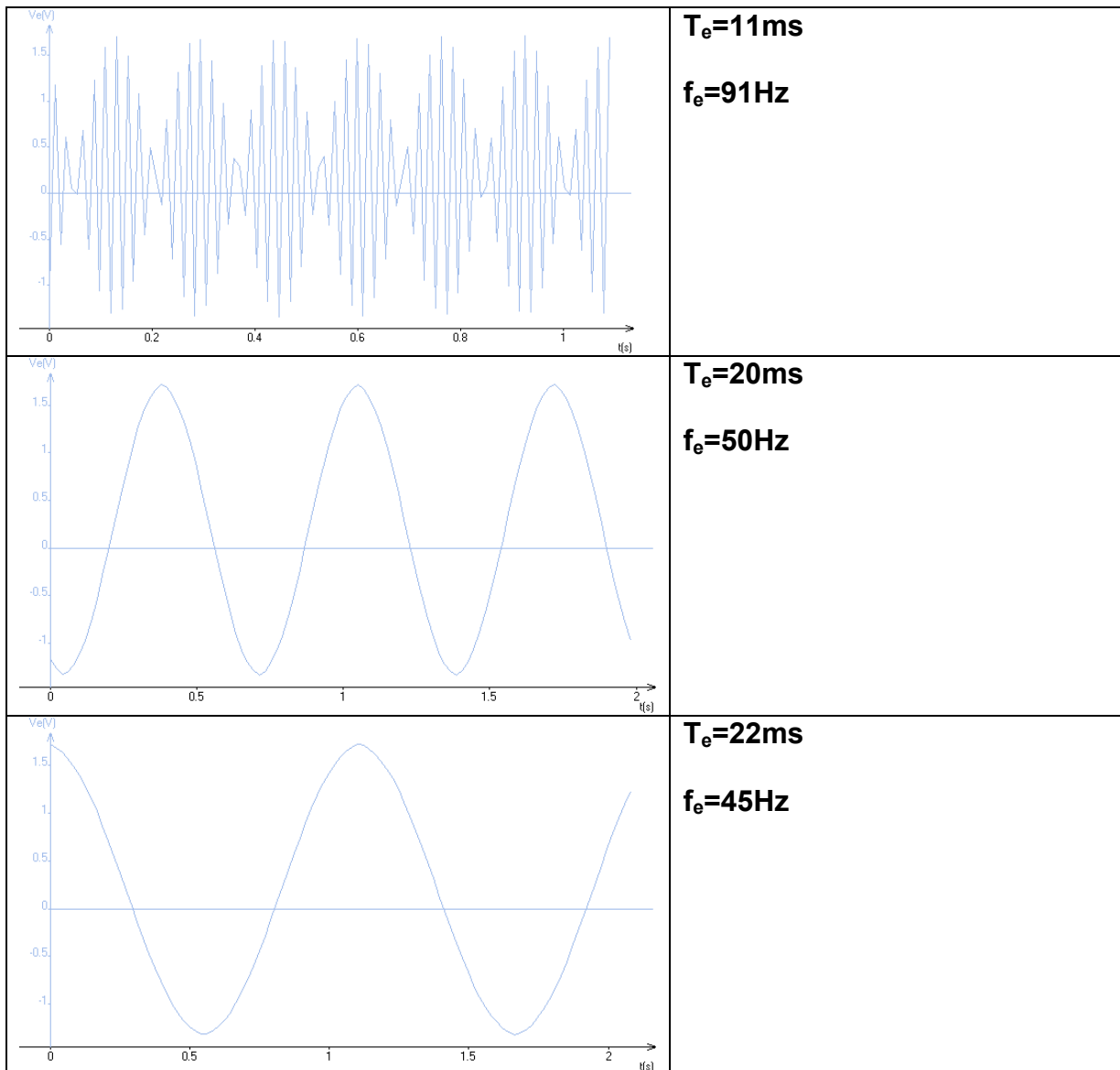
$$\boxed{T_e = \frac{1}{f_e}}$$

Un échantillonnage sera considéré comme **satisfaisant** si les points obtenus par échantillonnage permettent de retrouver la **fréquence** (ou la période) du signal réel, c'est à dire ici 50Hz, et si ces points forment une courbe ayant **la même allure que la courbe réelle**, c'est à dire ici une sinusoïde.

**Pour remplir ces deux conditions, l'échantillonnage ne doit pas être réalisé avec n'importe quelle fréquence.**

Les courbes suivantes ont toutes réalisées à partir du même signal, mais avec des fréquences d'échantillonnage différentes.





Comme on peut le voir sur les graphiques ci-dessus, seuls les deux premiers graphes permettent de retrouver la période du signal, c'est à dire 20ms.

Au niveau de l'allure, les 2 derniers graphes pourraient sembler acceptables, mais leur période est totalement différente de la période réelle.

Les 2 premiers graphes ont à la fois une allure et une période convenable. Toutefois le deuxième a une allure un peu « anguleuse ».

**Enfin, seul le premier graphique est vraiment satisfaisant.**

Pour pouvoir retrouver la fréquence réelle, il faut donc une fréquence d'échantillonnage au moins égale au double de la fréquence réelle. Ceci signifie qu'il faut un minimum de 2 mesures au cours d'une période.

Ce critère est appelé **critère de Shannon**. Il est extrêmement important, nous en reparlerons.

Pour retrouver à la fois la fréquence et l'allure du signal réel, il faut au moins 10 points par période, c'est à dire une **fréquence d'échantillonnage au moins 10 fois supérieure à la fréquence du signal**.

Il faut résister à la tentation de choisir une fréquence d'échantillonnage aussi grande que possible. L'échantillonnage sera, certes, excellent, mais la mémoire utilisée sera, inutilement, très élevée et les délais de traitement deviendront importants.

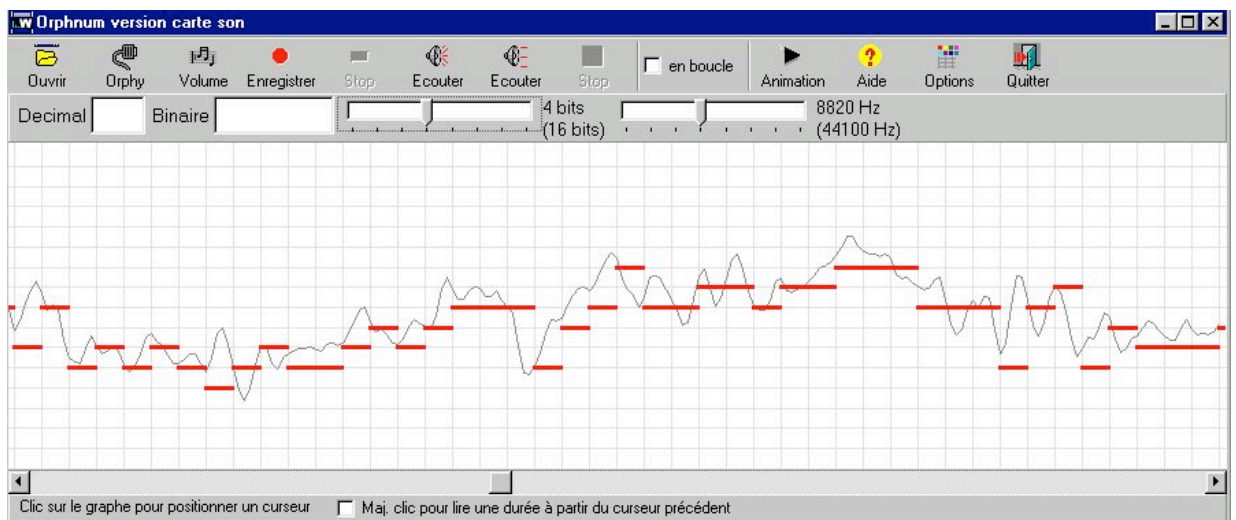
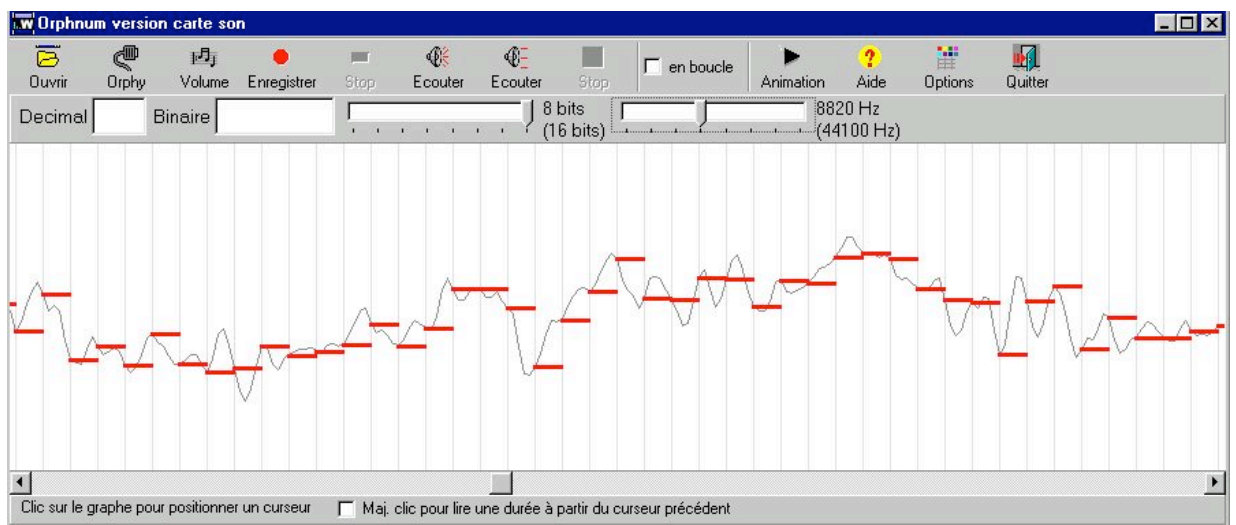
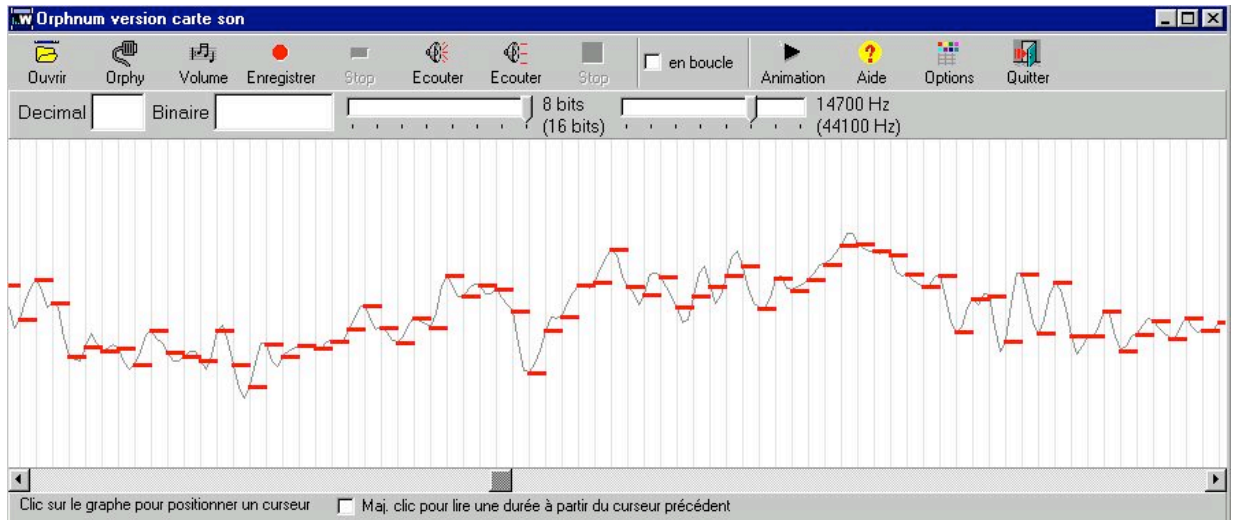
## 2. Nombre de bit du convertisseur

Le logiciel Wavnum permet de faire varier la fréquence d'échantillonnage, dont l'influence a déjà été étudiée, mais aussi le nombre de bits sur lesquels sera codée la valeur mesurée.

Avec **un seul bit**, on ne peut coder que **2 niveaux, 0 ou 1**. Lors de l'échantillonnage, chaque mesure doit donc être arrondie à un niveau ou à un autre, et cela donne finalement une succession de points qui a une allure très différente de la courbe initiale.

Avec 2 bits on peut coder 4 niveaux : 00, 01, 10 et 11.  
La courbe obtenue commence donc déjà à se rapprocher un peu mieux de la courbe de départ.

Avec **4 bits** on code **16 niveaux**, avec **8 bits 256 niveaux**, ça va déjà mieux, et avec **16 bits 65536 niveaux**. On est alors assuré de pouvoir reproduire les variations du signal de départ avec une grande précision (à condition bien sûr que la fréquence d'échantillonnage soit aussi suffisamment élevée).



### 3. Les différents standards

Les données échantillonnées afin d'être stockées sur un **CD** sont échantillonnées en **16 bits** avec une fréquence d'échantillonnage de **44,1kHz**.  
Idem sur un DVD audio.

**Sur internet**, où l'essentiel est d'avoir des fichiers peu volumineux, et où la qualité du son est moins importante puisque celui-ci n'est pas écouté sur du bon matériel, on trouve des formats d'échantillonnage à **8 bits et/ou 22,05 kHz**.

#### **Pourquoi $f_e=44,1\text{kHz}$ pour un CD ?**

Souvenez-vous du critère de Shannon...

Les sons audibles par l'oreille humaine ont une **fréquence maximale d'environ 20kHz** (au delà ce sont des ultra-sons).

Or, d'après le critère de Shannon, pour retrouver cette fréquence maximale dans le signal échantillonné, il faut au minimum une **fréquence d'échantillonnage double, c'est à dire 40kHz**.

C'est ce même critère qui explique la fréquence d'échantillonnage de 48kHz pour la DAT (cassette audio numérique multipiste utilisée par les professionnels).

Dans la pratique, il est très rare que des sons aussi aigus jouent un rôle important dans la musique.

La voix occupe un intervalle de fréquence beaucoup plus réduit, le **téléphone** n'a donc pas besoin de fréquences d'échantillonnage aussi élevées que 44,1kHz. Dans la pratique on se contente de **8kHz et de 8 bits**.

De même, la **radio numérique** se contente de **22kHz et 8 bits** en modulation d'amplitude, et **32kHz 16 bits** en FM (plus de programmes musicaux).

Evidemment on pourrait utiliser plus de 16 bits et une fréquence d'échantillonnage plus grande que 48kHz. Mais cela occuperait encore plus de mémoire, et personne, même pas les professionnels, n'entendrait la différence...

#### **Pour finir : qu'est-ce que le MP3 ?**

Le MP3 ne correspond pas à une fréquence d'échantillonnage ou à un nombre de bit moins élevé, le MP3 est un **algorithme de compression**.

La musique est d'abord échantillonnée en qualité CD, puis un algorithme enlève un certain nombre de données qui correspondent à des choses que l'on n'entend normalement pas sur un équipement audio multimédia classique.

Mais sur un équipement de grande qualité, on entend la différence entre la qualité CD et la qualité MP3 !

#### 4. Mémoire occupée

**Combien de minutes de musique peut-on enregistrer sur un CD de 700 Mo ?**  
(Mo=Mb, un octet se traduit en anglais par un byte).

**Calculons d'abord le nombre de bits disponibles sur ce CD.**

Un Mo correspond à 1024 Ko, qui lui même correspond à 1024 octets, qui lui même correspond à 8 bits.

Il y a donc sur le CD  $700 \times 1024 \times 1024 \times 8$  bits

**Combien de bits faut-il pour coder 1s de musique ?**

La fréquence d'échantillonnage est de 44,1kHz, cela signifie qu'il y a 44100 mesures par seconde. Et chaque mesure est codée sur 16 bits.  
Chaque seconde occupe donc  $44100 \times 16$  bits.

Mais on enregistre en **stéréo**, c'est à dire 2 fois : un piste pour l'enceinte de gauche et une pour celle de droite.

On occupe donc en fait  $44100 \times 16 \times 2$  bits par seconde.

**Combien de secondes de musique peut-on donc stocker ?**

On divise la mémoire totale par la mémoire nécessaire au stockage d'une seconde de musique :

$$\frac{700 \times 1024 \times 1024 \times 8}{44100 \times 16 \times 2} = 4161s$$

Ce qui donne donc, divisé par 60, **70 minutes de musique.**



## 5. La qualité numérique

**Pourquoi le numérique est-il censé représenter le signal initial avec une beaucoup plus grande fidélité qu'un codage analogique ?**

Cela peut sembler très surprenant dans la mesure où l'échantillonnage, comme nous l'avons vu, ne permet pas de reproduire exactement la courbe initiale, mais juste une série de points.

Cela provient de ce que le numérique permet de supprimer la sensibilité aux petites perturbations.

Ces petites perturbations sont extrêmement fréquentes et viennent altérer un signal analogique. Ce sont elles, en particulier, qui sont responsables du **bruit de fond**, si gênant sur les vieilles cassettes audio.

Un **signal numérique** se présente sous la forme d'une **succession de 0 et de 1**, de « **plats** » et de « **creux** » à la surface d'un CD.

Des 0 et des 1 ne sont pas sensibles aux petites perturbations. Un « creux » peut parfois être un peu plus ou un peu moins profond qu'il ne devrait être, il n'en reste pas moins un « creux », et est reconnu comme tel.

Quant-au « plat », il se peut que par accident il soit très légèrement creux. Mais sachant que l'on doit avoir un creux ou un plat, on reconnaît alors sans peine que ce très léger creux est en fait un plat.

De même, si un « 1 » correspond à une tension de 5V, et un « 0 » à 0V, alors une petite perturbation transformera par exemple la tension de 5V en 4,8V, et celle-ci sera sans problème identifiée à un « 1 ».

Pour que ce « 1 » soit accidentellement transformé en « 0 », il faudrait une énorme perturbation transformant la tension de 5V en moins de 2,5V.

**Impossible !**