

## *Conversion analogique – numérique*

### **Introduction historique :**

Claude Shannon, dans sa « théorie mathématique de la communication », définit la notion d'information et pose que tout message peut se résumer en une suite de 0 et de 1.

Ce formalisme permet de rendre un signal électrique par exemple, moins sensible au bruit de transmission mais aussi de quantifier l'information portée par le message.

L'invention du transistor en 1948, par les physiciens Shockley, Bardeen et Brattain (Prix Nobel en 1956), suivie une dizaine d'années plus tard par la mise au point de la technologie des circuits intégrés, allait permettre la réalisation de systèmes de traitement de l'information complexes et efficaces.

En 1975, Gordon Earle Moore, un des fondateurs de la société Intel, proposa une loi empirique, qui s'est effectivement vérifiée par la suite, stipulant que le nombre de transistors des microprocesseurs sur une puce de silicium double tous les deux ans.

En 1970, un circuit intégré comportait environ 2 000 transistors. On en est, de nos jours, à plus de  $10^9$  transistors, ce qui permet aux processeurs actuels de réaliser plusieurs milliards d'opérations par seconde !

Les signaux primaires porteurs d'informations, que ce soient des sons, des images ou des phénomènes physico – chimiques, sont pratiquement toujours de type analogique.

Un ordinateur est un dispositif qui traite des données, c'est à dire des suites de nombres.

Il y a apparemment incompatibilité ... Pour faire le lien entre ces deux univers, il faut mettre en œuvre des composants capables de transformer les informations initiales continues en grandeurs digérables par les processeurs de nos ordinateurs.

Si on veut traiter un signal par voie numérique, il faut le représenter au préalable par une suite de valeurs ponctuelles prélevées régulièrement. Un tel prélèvement a été présenté dans la vidéo de la collection « La physique animée » intitulée « échantillonnage temporel ».

La représentation numérique des échantillons obtenus requiert une opération complémentaire de quantification et de codage.

L'ensemble réalise une fonction de convertisseur Analogique – Numérique et le composant qui réalise cette fonction est appelé un CAN.

Nous allons, dans cette vidéo de la collection « La physique animée », nous intéresser plus particulièrement à la notion de quantification du signal analogique et donnerons quelques exemples de convertisseurs analogiques - numériques.

## **Numérisation – introduction :**

Les signaux du monde macroscopique qui nous entoure, comme par exemple le son, la température ou les ondes électromagnétiques, sont de nature analogique.

Ce sont des signaux continus dans le temps et dans l'espace.

Depuis la moitié du siècle passé, avec l'invention des ordinateurs et les innovations dans les transmissions d'informations, l'homme a pu mettre en évidence les avantages de la transformation des signaux analogiques en signaux numériques.

Un signal numérique est un signal discret dans le temps et dans l'espace.

Les convertisseurs analogiques - numérique CAN ou « Analog to digital converter » ADC en anglais, réalisent l'opération de numérisation d'un signal.

## **Chaîne de numérisation :**

Nous allons présenter la chaîne d'opérations permettant de numériser un signal.

Nous prenons ici l'exemple d'un signal sonore.

En entrée, un transducteur (un micro ici) assure la conversion d'énergie mécanique de l'onde sonore en énergie électrique.

Les tensions issues des transducteurs sont généralement faibles.

Un amplificateur permet d'arriver à des niveaux de tensions de quelques volts.

Un filtre Passe-bas limite le repliement du spectre de fréquences qui peut se produire lors de l'étape d'échantillonnage du signal, comme nous l'avons vu dans la vidéo de la collection « La physique animée » consacrée à l'échantillonnage temporel.

Le Convertisseur analogique - numérique donne finalement, après des opérations de quantification et de codage, une représentation numérique du signal d'entrée.

## **Échantillonnage :**

L'échantillonnage d'un signal consiste à transformer un signal continu dans le temps en un signal discrétisé dans le temps.

On vient « prendre » des petits morceaux du signal analogique à des temps réguliers.

L'étape d'échantillonnage a été vue en détail dans la vidéo « La physique animée : échantillonnage temporel ».

Le théorème de Shannon montre que pour restituer correctement un signal, il faut échantillonner le signal à une fréquence au moins deux fois supérieure à la fréquence maximale du signal.

### **Quantification :**

L'opération de quantification consiste à attribuer un nombre binaire à toute valeur prélevée au signal lors de l'échantillonnage.

Chaque niveau de tension est codé sur  $n$  bits, chaque bit pouvant prendre deux valeurs (0 ou 1). Un convertisseur à  $n$  bits possède ainsi  $N = 2^n$  niveaux de quantification.

On peut définir le pas de quantification (ou quantum), égal à la valeur maximale de la tension échantillonnée sur le nombre  $N$  de niveaux de quantification.

La fonction de quantification linéaire uniforme attribue le même niveau binaire à tous les signaux situés dans un intervalle de tension de largeur  $q$  constante.

Si on prend l'exemple d'un CAN qui code sur 3 bits, le nombre de niveaux sera  $N = 8$ .

Il n'y a donc que 8 valeurs possibles attribuables à toutes les valeurs prélevées lors de l'échantillonnage, variant par exemple entre 0 et une valeur maximale  $E$  choisie égale à 8 V.

Le pas de quantification sera de  $q = E/(2^n) = 8 / 8 = 1$  V.

Toutes les tensions comprises entre 0 et 8 V auront comme valeur binaire 000 et ainsi de suite jusqu'à 111 correspondant à la valeur maximale de la tension  $E$ , soit 8 V.

Par exemple, une tension de 4,7 V correspond au quatrième niveau quantifié, associé à la valeur binaire 100.

Prenons des exemples de convertisseurs plus sophistiqués, pour lesquels la tension maximale choisie vaut, arbitrairement, 5 V :

- Pour un convertisseur à 8 bits (comme ceux utilisés actuellement en téléphonie) : 256 niveaux sont disponibles, d'où un pas de quantification de 19,5 mV.
- Pour un convertisseur à 16 bits (utilisé pour la restitution musicale de qualité CD) : on a 65 536 niveaux et un pas de 0,076 mV

Les niveaux numériques codés sur 16 bits seront ainsi plus proches de la valeur analogique que lorsque le codage est réalisé sur 8 bits.

Si l'on veut apporter davantage de précision à certains échantillons, plutôt qu'à d'autres, on peut utiliser une quantification non uniforme pour laquelle le pas de quantification n'est plus constant.

Les quantifications non uniformes à pas logarithmiques sont par exemple utilisées pour coder les signaux de téléphonie fixe.

### **Bruit de quantification :**

L'opération de quantification ne s'effectue pas sans perte.

La conversion analogique – numérique implique en effet une opération où l'on remplace la valeur exacte de la tension échantillonnée par une valeur approximative égale à l'une des  $2^n$  valeurs binaires possibles.

Ainsi, pour toute tension échantillonnée comprise entre  $pq$  et  $(p+1)q$ , la valeur codée sera la même, égale à  $pq$ .

En remplaçant la valeur de la tension échantillonnée par une valeur binaire, le CAN introduit une erreur d'arrondi aléatoire, appelée bruit de quantification.

Dans le cas du CAN à 3 bits, le bruit de quantification sur la tension échantillonnée à 4,7 V est de 0,7 V.

La tension échantillonnée précédemment est maintenant numérisée avec un CAN possédant 4 bits, soit 16 niveaux.

On constate que le bruit de quantification est devenu 0,2 V : le bruit de quantification diminue si la précision, c'est-à-dire le nombre de bits  $n$ , de la conversion augmente.

Si le CAN possède  $n$  bits, la plus petite tension que l'on pourra déceler sera égale au pas de quantification, soit  $E/2^n$ , où  $E$  désigne la tension maximale.

La quantification peut également entraîner un autre type d'erreur que la simple erreur d'arrondi : l'erreur de saturation.

En effet, le nombre de niveau de quantification étant fini, on ne peut recevoir que des signaux d'amplitude maximale prédéfinie.

Si un signal d'amplitude supérieure est présent, il sera écrêté.

Un convertisseur analogique numérique est utilisé chaque fois que l'information disponible sous forme analogique subit une opération comme :

- traitement numérique
- transmission numérique
- visualisation numérique
- mémorisation numérique

Il existe différents types de convertisseurs. Le choix dépend du domaine d'application, du temps de conversion qui correspond à l'étape d'échantillonnage, de la précision ou résolution, c'est à dire le nombre de bits disponibles, de la plage de conversion, de la puissance consommée et de son prix.

On rencontre des convertisseurs à rampes, des convertisseurs à approximations successives ou encore des convertisseur parallèle (ou flash).

### **Expérience – réalisation d'un CAN au laboratoire :**

Nous avons réalisé une chaîne de conversion analogique-numérique avec les différents composants que l'on peut trouver en laboratoire.

Dans un premier temps nous étudions le fonctionnement d'un convertisseur parallèle réalisé à partir d'amplificateurs opérationnels montés en comparateurs.

Comme nous l'avons vu dans la vidéo sur l'échantillonnage temporel, le signal est en amont échantillonné à l'aide d'un échantillonneur-bloqueur.

Ce convertisseur est composé de 4 comparateurs, de 5 résistances identiques de valeur  $R$  et de diodes électroluminescentes protégées par des résistances  $R'$ .

Le 1<sup>er</sup> comparateur compare la tension que l'on souhaite numérisée à la tension  $(4/5) V_{\text{réf}}$  : si elle plus grande, la tension en sortie du comparateur vaut environ  $+15V$  et elle vaut  $-15V$  dans le cas où la tension mesurée est plus faible que  $(4/5) V_{\text{réf}}$ .

Les autres comparateurs comparent la tension mesurée à  $(3/5) V_{\text{réf}}$ ,  $(2/5) V_{\text{réf}}$  et  $(1/5) V_{\text{réf}}$ .

Les diodes s'allument quand la tension en sortie du comparateur est positive.

Toutes ces comparaisons sont effectuées en même temps, d'où le nom de convertisseur parallèle.

On utilise le circuit intégré TL084 qui compte 4 apli-op dans le même boîtier.

On applique sur l'entrée  $V^+$  le signal à convertir ( $V_{\text{mesurée}}$ ) et sur l'entrée  $V^-$  la valeur de référence qui sert à la comparaison.

Les diodes s'allument lorsque la tension en sortie du comparateur est positive (+15V ici). Avec 4 comparateurs, nous pouvons coder 5 états ou niveaux de quantification.

On choisit comme dynamique maximale la tension de référence  $V_{\text{ref}} = 5V$ . Le pas de quantification sera ainsi de 1V. Autrement dit, avec ce montage on est capable de numériser des tensions de 0 à 5V avec une résolution de 1V.

Dans un premier temps pour bien appréhender le fonctionnement du convertisseur, nous travaillons avec un signal continu. Une tension comprise entre 0 et 1V correspond à l'état éteint des diodes, et peut être codé par la valeur binaire 00.

Pour une tension entre 1 et 2V, la première LED s'allume, cette valeur peut être codée en binaire par 01 et ainsi de suite... On aboutit à la table de vérité du convertisseur.

On code sur 3 bits l'état « allumé » ou « éteint » des diodes.

Pour une tension mesurée d'environ 2,7 V, les diodes S3 et S4 sont allumées et S1 et S2 éteintes.

Cette tension sera codée par 010.

Si l'on choisit maintenant de numériser une sinusoïde d'amplitude crête-crête 5V de très faible fréquence, on voit les diodes s'allumer successivement.

Si l'on souhaite une précision meilleure que 1 volt, il faut augmenter le nombre de bits. Ce qui implique d'augmenter le nombre de comparateurs.

Par exemple, pour réaliser un convertisseur 8 bits, il faudra 255 comparateurs.

Ces premières mesures ont été réalisées en partant de signaux issus d'un GBF pour des raisons pédagogiques et faciles à reproduire au laboratoire. Passons maintenant à un signal analogique « réel ».

A l'aide du circuit intégré ADC0804, convertisseur analogique numérique parallèle 8 bits, nous numérisons maintenant le signal obtenu par un capteur de température, le composant LM35.

Les diodes placées en sortie correspondent directement aux niveaux binaires.

La plage de tensions est comprise entre 0 et 5V, le convertisseur 8 bits fournit donc 256 niveaux de codage avec un quantum  $q$  d'environ 20mV entre chaque échantillon.

Lorsque le capteur est plongé dans un bécher de glace à  $1^{\circ}\text{C}$ , il indique une tension de  $288\text{mV}$ , codé par le mot binaire, en partant du bit de poids fort : 00001111. Ce qui correspond au niveau de codage 15.

Mesurons maintenant un autre point de température.

Lorsque la température augmente on retrouve bien l'incrémentation du mot binaire pour chaque quantum de  $20\text{mV}$ .

Une température de  $48^{\circ}\text{C}$ , correspond à une tension de  $980\text{mV}$ . Elle est codée, en partant du bit de poids fort par 00110010, ce qui correspond au niveau de codage 50.

On retrouve, en effet 35 pas de quantification entre ces deux valeurs.

---