

# Conversion analogique – numérique

Édition au 23-mars-14 ATTENTION CETTE VERSION EST EN TRAVAUX !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

Cette partie, issue de l'ouvrage initial, a été écrite par Guy DURLIAT et en partie par Didier HIROU. Une mise à jour devrait être faite sérieusement vu que nombre de données datent de quelques années !

La plupart des appareils que nous utilisons, radio, télévision, pHmètre, téléphone... utilisent des courants électriques transportant une information de type tension (ddp). La variation de la tension est liée à la variation d'un paramètre comme le son, le pH... Elle n'est pas utilisable directement par l'ordinateur : il faut numériser.

Le signal électrique, à la sortie d'un micro par exemple, est donc une variation de ddp en fonction du temps. C'est un signal ANALOGIQUE qui est continu. Il doit donc être transformé en bits, signal qui sera discontinu (et fini). Un outil doit donc transformer la ddp en bits : c'est le CAN (convertisseur analogique numérique) qui peut fonctionner aussi dans l'autre sens, par exemple pour que le son numérique soit envoyé sur les haut-parleurs.



Par exemple pour numériser un son, la tension électrique délivrée par le microphone est mesurée périodiquement sur des intervalles très courts (1/44 000 seconde dans le standard du disque compact audionumérique). C'est ce que l'on appelle l'échantillonnage. Puis la valeur moyenne de la tension électrique pour chaque intervalle est ensuite convertie en un nombre binaire (quantification) codé sur 8, 12 ou 16 bits (16 dans le cas du son) à l'aide d'un Convertisseur Analogique/Numérique (CAN).

La plupart des appareils modernes (les lecteurs de CD audio par exemple) contiennent de tels convertisseurs. Leur précision dépend en particulier du nombre de bits permettant de coder la ddp.

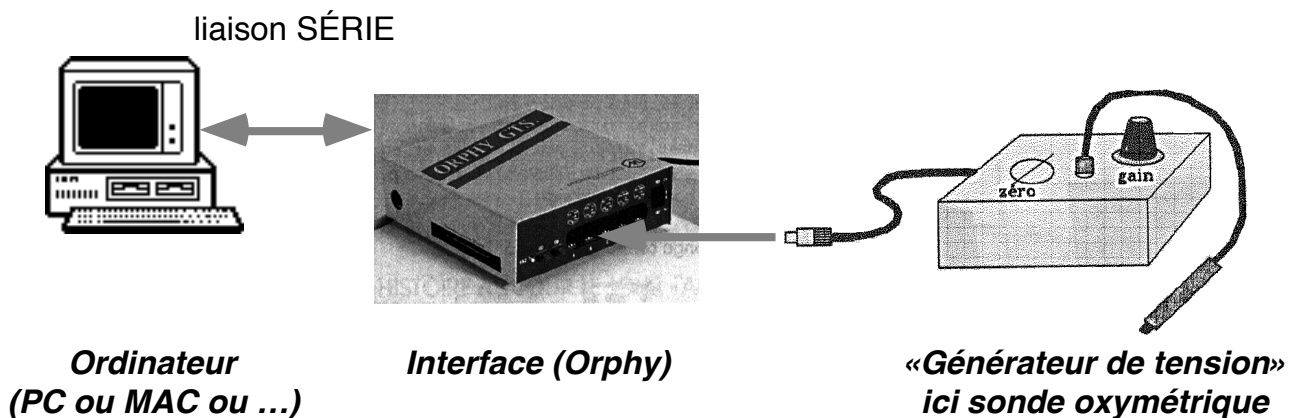
La commande par l'ordinateur d'un appareil pourra utiliser le procédé inverse : l'ordre numérique peut être transformé en tension qui produit l'action sur l'appareil. C'est le cas du générateur de son de l'appareil qui, *in fine*, doit être transformé en tension vers le haut-parleur...

De nombreux types d'appareils intègrent des CAN :

- les MODEM qui permettent l'échange téléphonique.
- les Scanneurs qui permettent la numérisation des images
- les cartes de numérisation vidéo
- les interfaces avec les appareils de laboratoire. (voir chapitre correspondant)

Voici pour illustrer le problème, une interface permettant de relier un appareil de laboratoire (thermomètre, pHmètre...) à l'ordinateur.

## Exemple d'interfaçage :



exemple d'interfaçage appareil de mesure - ordinateur

# 1. LES MONDES ANALOGIQUE ET NUMÉRIQUE

La tension aux bornes des sorties analogiques des appareils est une variable continue incompatible avec un ordinateur qui n'accepte que des grandeurs numériques.

## 1.1. Les signaux analogiques

Hormis quelques systèmes (comme les comparateurs et compteurs), la majorité des appareils de laboratoire détecte et mesure des grandeurs physiques (absorbance, pH, température, lumière ...) en les traduisant en un courant électrique dont l'intensité ou la tension est une fonction connue, souvent linéaire, de la valeur prise par la grandeur.

Ce signal est une variable continue : entre deux bornes il peut en effet prendre une infinité de valeurs. C'est un signal **analogique**. Ces appareils "analogiques" restituent la grandeur par le déplacement d'une aiguille sur un cadran gradué et l'émettent par des sorties analogiques (SA) souvent marquées "enregistreur" (*recorder*) car initialement destinées aux enregistreurs-papier : leur pointe est déplacée par le signal électrique. En pratique ces enregistrements se font en fonction du temps (mesuré par la vitesse de défilement mécanique du papier) ; ils ont, et gardent, l'avantage de reproduire la variation continue de la grandeur étudiée. Mais leurs inconvénients sont connus : exploitations limitées à des déterminations sur un papier-graphique, difficultés des superpositions, pas de tableau des valeurs expérimentales ni de possibilité de leur stockage.

## 1.2. L'informatisation

L'informatique offrant des possibilités incomparables, et en développement constant, de stockage, de traitements graphiques et mathématiques, d'échanges... On comprend que l'acquisition des données expérimentales par ordinateur soit devenue incontournable au laboratoire et dans l'industrie.

Le problème est celui de deux mondes incompatibles par nature : le signal électrique analogique émis par les appareils physiques ne peut être reçu ("compris") par l'ordinateur qui manipule des grandeurs numériques, donc discontinues, codées en langage binaire. La solution passe par la conversion de ces signaux, les convertisseurs constituant le cœur des interfaces.

# 2. LA CONVERSION ANALOGIQUE-NUMÉRIQUE

Résumé :

Le découpage et la numérisation des grandeurs analogiques sont effectués par des convertisseurs basés sur des solutions analogiques ou numériques. Parmi ces derniers, les modèles à approximations successives sont de bons compromis performances/prix.

Pour numériser un signal analogique, on emploie un montage convertisseur dont les abréviations synonymes sont, selon la langue ou ses traductions :

CAN : Convertisseur Analogique Numérique

ADC : *Analog Digital Converter*, traduit en :

CAD : Convertisseur Analogique Digital (digital : compter sur ses doigts).

## 2.1. Le principe de la conversion

Schématiquement, le signal continu (plus exactement l'amplitude maximale qu'il peut prendre) est découpé - on dit couramment **échantillonné** - en intervalles égaux que le convertisseur affecte de valeurs numériques croissantes. Imposé par le système de codage propre au convertisseur, le nombre d'intervalles s'exprime en bits : un CAN numérisant sur  $n$  bits découpe la tension maximale d'entrée en  $2^n$  échantillons qu'il traduit en  $2^n$  nombres.

Prenons l'exemple d'un spectrophotomètre dont la sortie analogique SA a la spécification :  
amplitude : 0 - 10 Volts pour une variation d'Absorbance 0 - 1.

Si l'appareil traduit de façon bien linéaire, il émet la tension  $V_{sa}$  de la **figure 1a**.

Envoyons cette tension sur un CAN 3 bits - un montage de démonstration ! - :

elle est découpée en  $2^3 = 8$  intervalles de largeur 1,25 V qui sont autant d'états logiques (tout ou rien) affectés chacun d'un nombre, ce que la **figure 1b** représente.

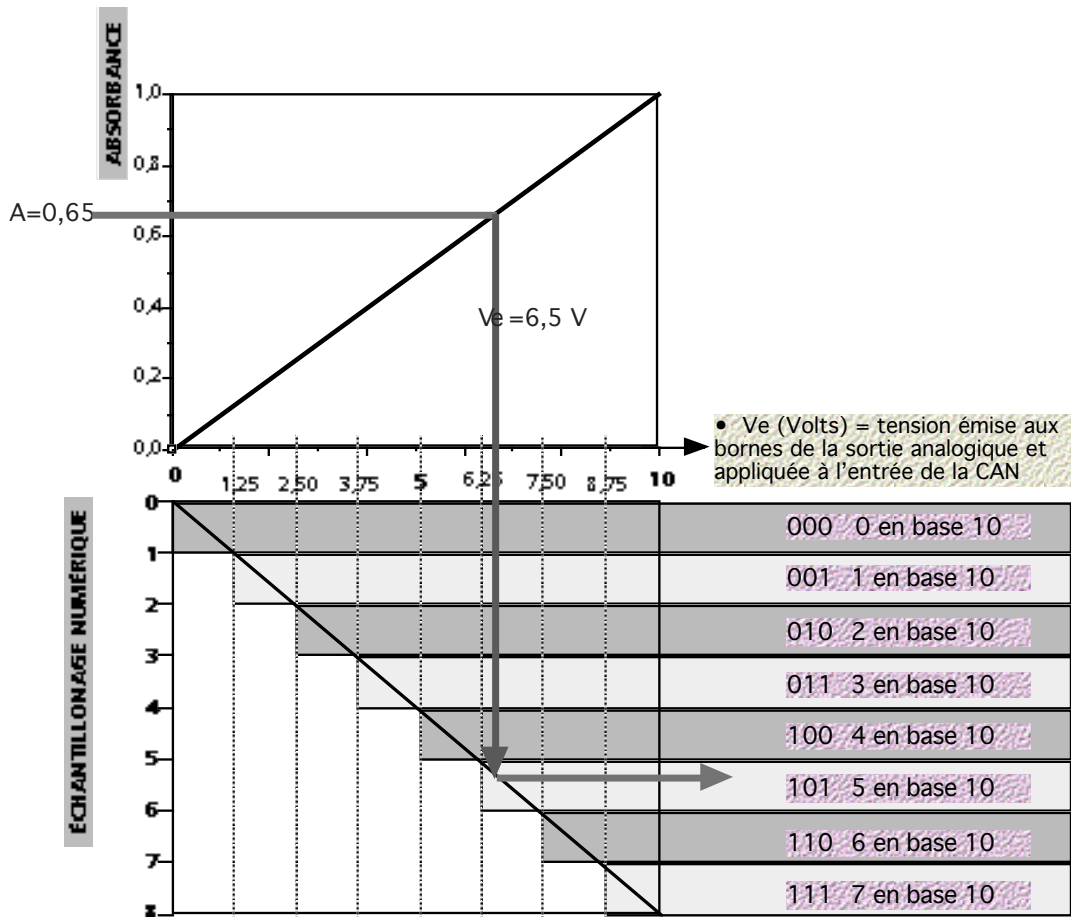


Fig.1 : Fonctions de traduction en tension et de numérisation d'une grandeur physique.

a : Traduction par un spectrophotomètre de la grandeur physique Absorbance en tension continue.  
 A : Absorbance mesurée (anciennement densité optique DO). Ve : tension émise aux bornes de la sortie analogique.

b : Numérisation par un CAN de capacité 3 bits. Ve : tension d'entrée à numériser.

## 2.2. Les performances d'un CAN

On comprend qu'un convertisseur se caractérise d'abord par :

- **sa capacité de conversion en nombre de bits** (ou bits significatifs) qui lui confère sa résolution (qualité appelée aussi sensibilité). Des convertisseurs 8, 12, ou 16 bits fractionnent le signal maximal en 256, 4096 et 65536 paliers respectivement.
- **sa précision son inexactitude ??**: écart existant entre la tension théorique (ou nominale) fournissant un certain "mot" et la valeur réelle à l'entrée qui le produit. Elle s'exprime en erreur absolue ou relative (en %) ; ou encore en nombre de bits en prenant comme référence le bit de poids faible (LSB = *Least Significant Bit*). Cet écart peut venir de la quantification, d'un décalage de zéro, d'un défaut d'amplification...

À ces performances il faut ajouter les paramètres :

- **vitesse de conversion**, c'est à dire la durée (en fraction de seconde : ms voire ns) que prend le convertisseur pour traduire une valeur de la tension d'entrée en son équivalent numérique. Cette caractéristique peut être donnée en fréquence de conversion en Hertz. Un théorème (de Shannon) indique que la vitesse d'un échantillonneur - cas ici - doit être au moins égale à 2 fois la fréquence du signal à mesurer, s'il est sinusoïdal permanent.
- **entrée analogique acceptée** :
  - son **étendue** : l'amplitude ou plage de tension admissible,
  - son **signe** : le CAN peut, ou non, numériser des signaux positifs (unipolaires) et des signaux variant de part et d'autre de zéro (bipolaires),
  - son **impédance**.
  - et dans le cas d'entrées différentes possibles : leurs calibres et le type de masse (commune ou différentielle) : nous y reviendrons.

Il faudra prendre en compte ces caractéristiques - souvent pour les relativiser comme nous le verrons pour la résolution attendue - lors du choix ou de l'emploi correct d'une interface dans une chaîne d'acquisition de données expérimentales.

On peut par exemple lire les spécifications d'un convertisseur de la firme Analog Devices , l'ADC 800 :

- approximations successives\*, 8 bits.
  - sans échantillonneur-bloqueur\*.
  - tension : entre - 5 et + 5 V.
  - durée de conversion : 50  $\mu$ s.
  - précision : +ou- 2 LSB : l'erreur maximale de conversion est la tension équivalent à 2 fois le bit de poids faible soit pour la plage 10 Volts :  $2 \times 10/256 = 0,078$  V ou 78 mV. Soit encore  $78/10000 = 0,8$  %.
- \* : voir le paragraphe 4 : Composants d'un module CAN.

## 2.3. Les types de convertisseurs

### 2.3.1. Les principes de fonctionnement

Ils sont assez variés pour poser un problème de classification des convertisseurs. On peut distinguer les CAN directs - le signal numérique est déduit de la comparaison de l'entrée avec une gamme de tensions - des CAN indirects qui transforment la tension d'entrée en un signal secondaire - un temps - qui est numérisé. On peut aussi les étudier en se référant à l'étape à la base du procédé de conversion : on parle alors de CAN "analogiques" ou "numériques" selon que la solution est essentiellement analogique ou repose sur une technique numérique.

Ce dernier critère est adopté pour la présentation rapide des principaux types de CAN de l'encadré 1. Le lecteur intéressé trouvera tous les compléments théoriques et techniques dans la bibliographie jointe.

#### Principaux types de convertisseurs Analogique/Numérique

##### 1- CAN analogiques (la conversion a pour base un traitement analogique)

- Convertisseur à rampe (ou à largeur d'impulsion ou tension-temps)

De conception simple, il est donné classiquement comme exemple. On fait correspondre à la tension d'entrée un temps proportionnel : la durée nécessaire pour que la tension aux bornes d'un condensateur en charge atteigne le niveau de l'entrée  $V_e$  ; un compteur somme les impulsions envoyées par une horloge. Il est économique mais de précision et vitesse mauvaises. Sa variante à double rampe corrige le défaut de précision mais reste lente. Il est employé dans les appareils à affichage numérique tels que voltmètres, multimètres ou pHmètres.

- Convertisseur à comptage (ou incrémental à rampe)

Comme pour le précédent une tension augmentant par paliers est utilisée ; mais c'est la valeur de la tension obtenue à la fin d'une période d'horloge qui est la grandeur numérisée et non plus le temps requis, variable intermédiaire. Le temps de conversion est grand, la précision meilleure et il est très économique.

##### 2- CAN logiques (la conversion s'appuie sur un traitement numérique)

- Convertisseur à approximations successives (SAR : Successive Approximation Register)

Type le plus employé dans les applications courantes par le bon rapport performances/prix qu'il offre. Pour cette raison son fonctionnement est détaillé dans le texte.

- Convertisseur parallèle (ou "flash")

Le plus rapide qui existe, c'est un convertisseur simultané à seuils multiples : la tension  $V_e$  est comparée au même instant au nombre nécessaire de tensions-étalons pour remplir en une fois tous les bits du mot numérique.

Si les convertisseurs de ce type ont une vitesse très élevée (une conversion ne prend que quelques ns !), leur complexité les rend vite très onéreux et les limite : on montre qu'ils exigent pour une résolution de n bits au moins  $2^n - 1$  comparateurs et résistances parallèles, soit déjà 7 éléments pour notre CAN 3 bits et 31 pour 5 bits. Il faudrait 127 de ces circuits pour 7 bits et 255 pour 8 bits. Ces convertisseurs sont réservés aux cas où une résolution faible suffit (4 - 5 bits) alors qu'on recherche la plus grande rapidité.

### 2.3.2. Le convertisseur à approximations successives (SAR : Successive Approximation Register)

Offrant un bon compromis entre performances et prix de revient, c'est le plus employé dans les systèmes d'acquisition (c'est ce type qui équipe les centrales d'acquisition prises plus loin comme exemples). Aussi nous arrêterons-nous un moment sur son fonctionnement.

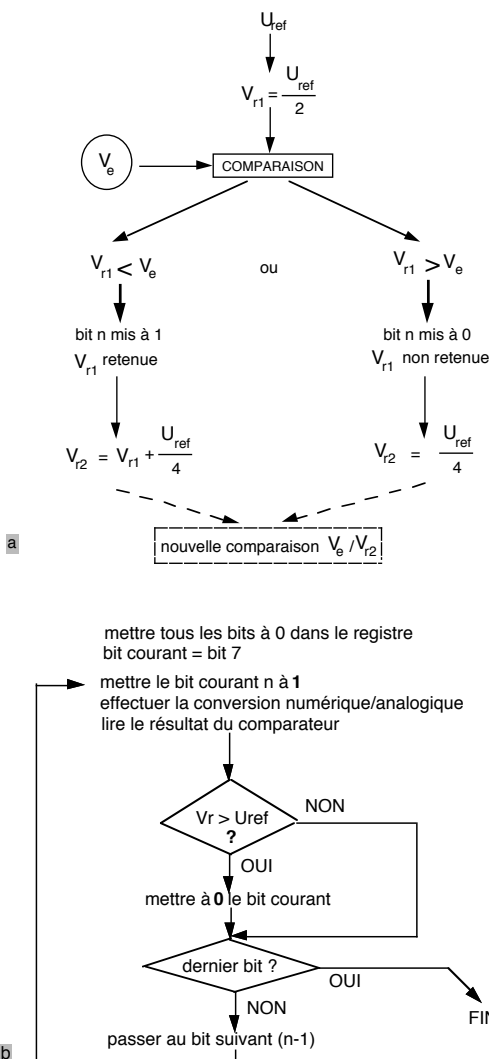
Il est aussi appelé "convertisseur à pesées" car procède sur le principe d'une pesée par essais successifs de masses marquées : on se rappellera peut-être qu'on commence par les plus fortes pour terminer par les plus faibles, chaque déséquilibre observé faisant retenir ou non la masse-étalon sur le plateau. Ce CAN est donc un convertisseur-série ou séquentiel : la valeur numérique de la tension d'entrée est produite par la répétition d'une séquence d'opérations qui affecte 1 bit à la fois, en débutant par le bit de poids fort.

Cette séquence élémentaire se décompose en deux temps qui d'ailleurs révèlent les composants de base de ce type de convertisseur :

- 1<sup>er</sup> temps, analogique : la tension d'entrée  $V_e$  est comparée à une tension-étalon.
- 2<sup>ème</sup> temps, logique : selon le résultat, le bit considéré est affecté et un CNA (Convertisseur Numérique Analogique) génère la tension pondérée pour l'essai suivant.

Les tensions-étalons successives dérivent les unes des autres par additions de fractions de la tension maximale appliquée au convertisseur\* (certains, dits postsoustractifs, peuvent faire des soustractions). Ainsi, la première séquence d'un convertisseur n bits sous une tension de référence  $U_{ref}$  recevant le signal d'entrée  $V_e$  est schématisée dans la figure 2a, et l'algorithme de la conversion 8 bits dans la figure 2b.

\* : la méthode dichotomique est la plus rapide : la première comparaison se fait avec la moitié de  $U_{ref}$ , les suivantes selon une progression géométrique de raison 2.



**Fig. 2 : Première séquence de comparaison d'un CAN à approximations successives (a) et algorithme de base de la conversion sur 8 bits (b).**

En reprenant notre CAN rudimentaire 3 bits de la figure 1b, sous la tension de référence 10 V la tension d'entrée 6,5 V sera convertie après les 3 comparaisons du tableau 1.

**Tableau 1 : Étapes de la conversion prise pour exemple à la figure 1b.**

| essai n°             | bit à affecter n° | $V_r$ appliquée             | Comparais on avec $V_e$  | "triet" | $V_r$ retenue |
|----------------------|-------------------|-----------------------------|--------------------------|---------|---------------|
| conditions initiales |                   | ( $U_{ref} = 10\text{ V}$ ) | ( $V_e = 6,5\text{ V}$ ) | xxx (*) |               |
| 1                    | 2                 | $10/2 = 5\text{ V}$         | $V_r < V_e$              | 1xx     | 5 V           |
| 2                    | 1                 | $5 + 10/4 = 7,5\text{ V}$   | $V_r > V_e$              | 10x     | 5 V           |
| 3                    | 0                 | $5 + 10/8 = 6,25\text{ V}$  | $V_r < V_e$              | 101     |               |

(\*) : représentation schématique, les bits sont en fait positionnés à 1 par défaut avant l'opération de comparaison.

On voit qu'une conversion sur n bits par ce type de convertisseur exige n comparaisons successives. Malgré cela le temps de conversion de ces CAN est bon. Leur précision dépend de la qualité des composants. La figure 3 schématise le plan d'un SAR.

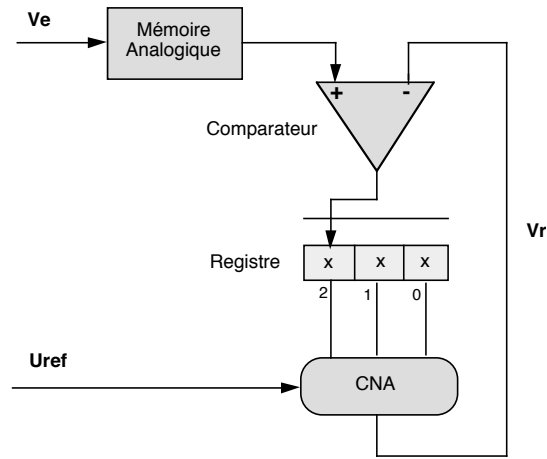
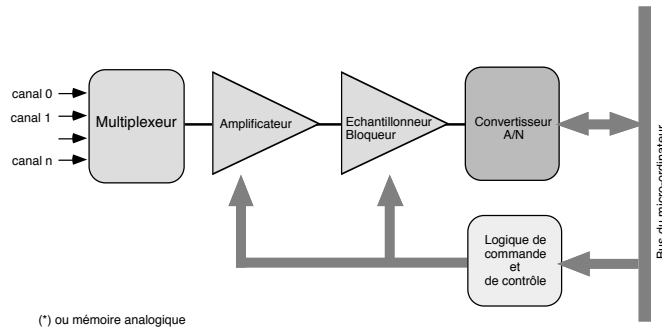


Fig. 3 : Schéma de principe d'un CAN à approximations successives.

## 2.4. Les composants d'un module CAN

Les principes de conversion entrevus précédemment exigent pour résoudre des problèmes techniques tels que la durée prise par les conversions ou les niveaux des tensions d'entrée à traiter d'adjoindre au CAN proprement dit différents éléments, pas toujours obligatoires. La figure 4 donne le schéma classique d'un module convertisseur.



(\*) ou mémoire analogique

Fig. 4 : Structure-type d'un module convertisseur.

### 2.4.1. Durée de conversion et signal

L'échantillonneur-bloqueur capte le signal à convertir, et le maintient constant à l'entrée du convertisseur le temps nécessaire à la numérisation. C'est une mémoire analogique qui améliore la précision des signaux à variation rapide en les datant.

### 2.4.2. Les entrées

L'adaptation de la plage de tension admissible à la ou aux sortie(s) analogique(s) d'appareils ou de capteurs conditionne la qualité de l'acquisition.

Dans le cas d'un seul signal, un simple amplificateur peut résoudre ce problème.

Dans le cas où l'on veut capter simultanément plusieurs sources analogiques, deux solutions se présentent :

- employer plusieurs convertisseurs à plages d'entrée différentes : trop onéreux.
- commuter plusieurs entrées sur un seul convertisseur par un multiplexeur.

Les conséquences pratiques de cet aspect adaptation des entrées sont importantes.

#### 2.4.2.1- Capacité de codage et précision finale d'une interface

La capacité de codage du CAN ne garantit pas la précision de la numérisation obtenue : l'adéquation entre le niveau d'entrée et l'échelle de numérisation est un autre facteur déterminant. L'exemple pratique de l'encadré suivant permettra de s'en rendre compte.

#### 2.4.2.2- Durée d'acquisition et nombre de paramètres

Lorsqu'on entre plusieurs signaux sur le convertisseur multiplexé d'une interface en vue d'une acquisition multiparamétrique, le multiplexeur à répartition dans le temps agit en balayant les voies l'une après l'autre : le temps d'acquisition est multiplié par le nombre de voies actives.

#### 2.4.2.3- Signaux changeant de signe

Pour capter les tensions pouvant prendre des valeurs positives et négatives (cas de la sortie "électrodes" des pHmètres par exemple), l'interface doit présenter une entrée bipolaire. Si elle est obtenue par un commutateur qui décale le zéro d'une voie unipolaire, il faut voir que l'amplitude de la tension admissible reste la même : une entrée analogique 5 V commutée en bipolaire n'accepte que la gamme - 2,5 à + 2,5 V.

Précisions finales obtenues par des interfaces de capacité et calibres d'entrée différents

**1- appareil à connecter :** spectrophotomètre de sortie analogique 0-1 V pour A 0-1.

**2 - interfaces disponibles :**

A : CAN 8 bits, calibres d'entrée  
0,1 , 0,5 , 1 , 2 et 5 V.

B : CAN 12 bits, calibres d'entrée 10 et 20 V.

**3- résultat :**

- cas A : la précision maximale du convertisseur est  $1/2^8$  soit 0,4 %. Elle est respectée en branchant le spectrophotomètre sur l'entrée analogique (EA) 1 V, la conversion se faisant pleine échelle. La précision en tension est 1 V/256 soit 4 mV ; en absorbance elle est de 0,004 ce qui est largement suffisant pour la majorité des mesures.

- cas B : la précision relative maximale de ce CAN est presque 20 fois meilleure :  $1/2^{12}$  soit 0,025 %. Mais l'entrée du signal 0-1 V sur le calibre 10 V divise d'autant la plage de conversion dont la précision devient 1/410 soit 0,25 %. Ou encore en valeurs absolues : 2,5 mV et environ  $\pm 0,003$  pour l'absorbance. On attendait mieux !

Le même calcul montrerait que l'interface B ne peut convenir pour des appareils à sortie analogique de niveau 100 mV alors que l'interface A permettrait l'acquisition. Mais attention cependant à ces signaux de faible niveau : leur bruit de fond est augmenté.

#### 2.4.2.4- La masse des entrées

On distingue des entrées :

- unimodales ou à masse commune : les entrées sont référencées à la masse, reliée à celle de l'interface.
- différentielles : les entrées ne sont plus référencées à la masse (montage "flottant"). D'une part on évite les problèmes des masses différentes des appareils ou des capteurs ; d'autre part on peut mesurer des signaux très parasites (les signaux de tension faible souvent).

### 3. LES INTERFACES ET LES CHAÎNES D'ACQUISITION

Résumé :

Le cœur des interfaces entre appareils et ordinateurs est leur convertisseur ; des fonctionnalités supplémentaires transforment certaines en véritables centrales d'acquisition et de pilotage. La liaison interface-appareil, de modes parallèle ou série, ne peut s'établir sans logiciel.

Nous avons vu que la source d'une chaîne d'acquisition de données expérimentales est l'appareil ou le capteur qui traduit la grandeur physique étudiée en tension (on parle de transducteur) et son récepteur le micro-ordinateur chargé d'un logiciel de gestion de l'interface (figure 5).

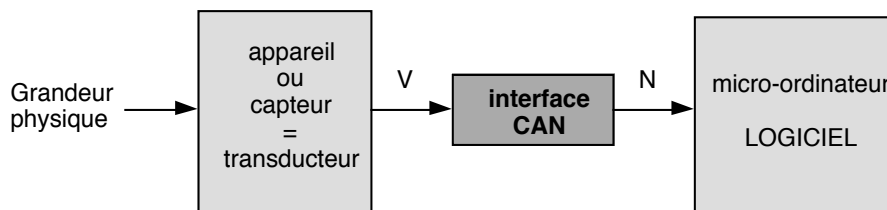


Fig 5 : Éléments d'une chaîne d'acquisition.

Les interfaces commercialisées offrent des performances et des services qui peuvent être très différents selon l'emploi prévu et le degré d'exigence : affectation à une source ou polyvalence, industrie ou laboratoire, expérimentation pédagogique ou recherche .... Il faut donc prendre en compte les points principaux suivants pour monter une chaîne d'acquisition efficace et plus ou moins ouverte.

#### 3.1. Performances et possibilités liées au module CAN

Nous rappellerons :

- la capacité en bits et le temps de conversion.
- les entrées analogiques disponibles : nombre, calibres et impédance, masses communes ou différentielles, entrées uni et bipolaires, avec les conséquences sur la précision finale qu'on peut attendre et les possibilités pratiques d'acquisition multiparamétrique à partir de sources qui peuvent être très différentes. Sans oublier le niveau de protection électrique des entrées, point qui se révèle très sensible en pratique !

#### 3.2. Fonctionnalités supplémentaires

##### 3.2.1. Entrées et sorties

En plus des entrées analogiques, les interfaces peuvent offrir des gammes d'entrées/sorties plus ou moins complètes, certaines dépendantes d'un CNA (Convertisseur Numérique Analogique) :

- entrées et sorties numériques telles que :

- entrées et sorties binaires pour l'acquisition de niveaux logiques (contacteurs) et la commande de systèmes par l'intermédiaire de relais.
- entrées front pour des synchronisations ou le comptage d'évènements.
- sorties analogiques programmables pour le pilotage de moteurs pas à pas par exemple.
- sorties basse tension (5, 12 V) pour alimentation de capteurs et moteurs par exemple.

### 3.2.2. Horloges et compteurs

Les interfaces en sont en général équipées pour le cadencement de la conversion mais aussi la mesure du temps ou de fréquences.

### 3.2.3. Microprocesseurs

Certaines interfaces possèdent leur propre microprocesseur avec une logique de programmation, stockage en mémoire et restitution des données : elles sont autonomes (peuvent être déconnectées de l'ordinateur). Elles deviennent des centrales d'acquisition et de pilotage.

Ces équipements permettront des modalités d'acquisition donc des montages expérimentaux plus ou moins élaborés :

- acquisition d'une ou plusieurs grandeurs en fonction du temps, d'une autre grandeur physique captée ou d'une entrée au clavier.
- acquisition sans ordinateur pour des relevés sur le terrain (interfaces portatives) ou de longue durée (heures, semaines...).
- asservissement du déclenchement à l'état logique ou au niveau analogique d'une autre source (telle qu'un capteur de contrôle).
- pilotage d'appareils et donc approche de l'automatisation : défilement des longueurs d'onde d'un spectrophotomètre, burette automatique ....

## 3.3. Liaison avec l'ordinateur

L'interface transmet ses données numérisées à l'ordinateur sur le mode parallèle ou série, et ce de façon directe ou indirecte.

### 3.3.1. Connexion directe

L'interface est directement liée au bus interne de l'ordinateur, la transmission est parallèle. Elle se présente sous forme d'une carte à fixer dans l'unité centrale sur l'un des connecteurs (slots) d'accès au bus interne.

### 3.3.2. Connexion indirecte

La liaison est externe, l'interface est contenue dans un boîtier autonome constituant souvent une "centrale d'acquisition et de commande" :

- Hewlett Packard (HP), et d'autres constructeurs, utilise pour les appareils scientifiques un interfaçage externe via un bus parallèle GP-IB (General Purpose Interface Bus, bus d'interfaçage à usage général) également dénommé IEEE488. L'acquisition et la commande de multiples appareils, de traceurs... autorisent des montages sophistiqués et automatisés avec des logiciels dédiés. Le coût est élevé.
- Le mode série, celui des modems, tables traçantes..., est employé par beaucoup de boîtiers d'interfaçage externes : ils se connectent sur l'un des ports série (COM) de l'ordinateur. C'est aussi le cas des "sorties série RS232" des appareils : la carte AN est alors dans l'appareil. Vu son importance pratique, les principales caractéristiques et contraintes de ce type de communication seront décrites au paragraphe suivant.

Enfin, quelle que soit l'interface, la configuration et la gestion de sa communication avec l'ordinateur sont logicielles. Ces programmes de dialogue, dédiés à une liaison et une application - ils sont alors "fermés" - ou au contraire ouverts, peuvent :

- être inclus dans la ou les applications développées pour l'interface,
- ou être rassemblés dans un pilote (driver, comme pour les imprimantes) à installer.

Ainsi, pour l'EXAO (Expérimentation Assistée par Ordinateur), un pilote "normé" qui devrait rendre les logiciels d'acquisition indépendants du matériel d'interfaçage est à l'état de prototype.



# 4. LA COMMUNICATION SÉRIE ET LES LIAISONS PAR LES SORTIES SÉRIE

Résumé :

Les transmissions sans signal périodique associé par le mode série asynchrone sont les plus utilisées. Des normes de câblage et de codage se sont imposées. En pratique, les paramètres de transmission doivent être connus pour configurer le protocole logiciel de communication.

En complément du chapitre "Matériel", nous reviendrons sur les caractéristiques de la communication par le mode série - très fréquemment employée pour les connexions appareil-ordinateur car de prix de revient intéressant - pour mettre en évidence quelques aspects matériels et logiciels posant des problèmes pratiques.

## 4.1. La communication série

### 4.1.1. Principe

Nous avons vu que chacune des valeurs prises par la variable analogique est numérisée par l'interface et envoyée à l'ordinateur sous la forme d'un "mot" de bits (les bits de donnée). Au contraire du mode parallèle, dans lequel ces bits sont transmis simultanément sur un faisceau d'autant de fils, en mode série le support est formé d'un seul fil électrique sur lequel les bits sont transmis l'un après l'autre. Ce qui impose que le fil prenne successivement la tension caractéristique de chacun d'eux, et ce pendant un temps déterminé T.

L'une des premières caractéristiques d'une liaison de ce type est donc la vitesse ou cadence de transmission. Son unité est le baud défini par l'application d'une tension pendant une seconde. En pratique, chaque changement de tension ne codant qu'1 bit, la vitesse en bauds équivaut au nombre de bits transmis par seconde. Nous reviendrons sur la cadence utile d'une transmission série.

### 4.1.2. La synchronisation émetteur-récepteur

Il faut évidemment que le système récepteur (l'ordinateur) affecte la tension instantanée lue au bit correspondant (c'est la synchronisation-bit) et découpe le message reçu en ses "mots" (synchronisation-caractère). Les deux moyens utilisés pour la synchronisation-bit sont :

- **la transmission série synchrone** : pendant toute la connexion, ou pendant la durée d'un message complet seulement, une horloge - constituée par un signal périodique porté sur un deuxième fil - impose l'application des tensions sur la ligne des données et leur lecture par le récepteur. Liaison donc relativement sûre, qui peut être très rapide (cadences supérieures à 64000 bauds), mais onéreuse.
- **la transmission série asynchrone** : chaque caractère est envoyé par l'émetteur comme lors d'une frappe au clavier : à une certaine cadence et avec des interruptions. La synchronisation ne s'opère qu'à l'émission de chaque caractère : un start bit (bit de départ ou "bit de start" !) donne le signal d'envoi ; l'ordinateur reçoit alors les bits du caractère à une cadence qui doit être la même que celle de l'émetteur. Pour corriger les dérives qui peuvent se produire quand les cadences récepteur/émetteur ne sont pas strictement identiques, l'émission du caractère est suivi d'un temps mort : une période d'envoi de stop bits (bits d'arrêt ou "bits de stop").

Ce dernier mode est le plus utilisé pour les connexions appareils-ordinateur ; il existe sur tout ordinateur au moins un port de ce type. Mais la probabilité d'erreur n'étant pas négligeable, un procédé de contrôle de l'intégrité du message peut venir s'ajouter à sa transmission.

### 4.1.3. Le contrôle d'erreurs par la parité

Employé pour le stockage en mémoire et les liaisons asynchrones, ce procédé s'apparente à la "preuve par 9" des multiplications et divisions dont, on s'en souvient peut-être, le produit est nécessaire mais non suffisant pour affirmer la justesse de l'opération.

Aux n bits du mot codé, l'émetteur accole un bit supplémentaire, le bit de parité P, qu'il positionne par un calcul en binaire de sorte que le nombre total de bits à 1 (bits de donnée + bit de parité) soit :

- **pair (even)** : code dit à parité, abusivement à "parité paire" (!),
- **ou impair (odd)** : code à imparité, abusivement à "parité impaire" (!!).

Par exemple : le mot de 8 bits 10100110 est, dans le cas où ce contrôle existe, envoyé par l'émetteur avec son bit de contrôle (en gras et souligné) :

|                       |                   |
|-----------------------|-------------------|
| mot à transmettre :   | 10100110          |
| contrôle à parité :   | <u>0</u> 10100110 |
| contrôle à imparité : | <u>1</u> 10100110 |

Le récepteur refait le calcul ... et doit obtenir le même résultat.

On conçoit que ce contrôle de la parité par 1 extrabit ait ses limites : il ne permet la détection que d'1 bit en erreur sans l'identifier ni le corriger ; il ne voit pas d'erreur si 2 ou plusieurs erreurs simultanées se compensent.

Ce contrôle de parité est en fait de moins en moins utilisé pour les liaisons interfaces/ordinateurs qui nous concernent, car sans réel intérêt. On l'employait pour les communications de longues portées telles que celles des modems.

#### 4.1.4. Exemple d'une transmission série asynchrone

Pour compléter l'exemple de notre CAN (figure 1b), le même signal d'entrée serait converti par un CAN 8 bits en valeur décimale  $(256/10)/6,5 = 166$ , l'interface émettant l'octet de donnée correspondant 10100110. Avec un contrôle de parité pair, le schéma de la transmission de cette valeur est représenté à la figure 6. On notera que la l'affectation des bits successifs par la tension du fil porteur se fait selon une logique négative : 1 pour la tension négative.

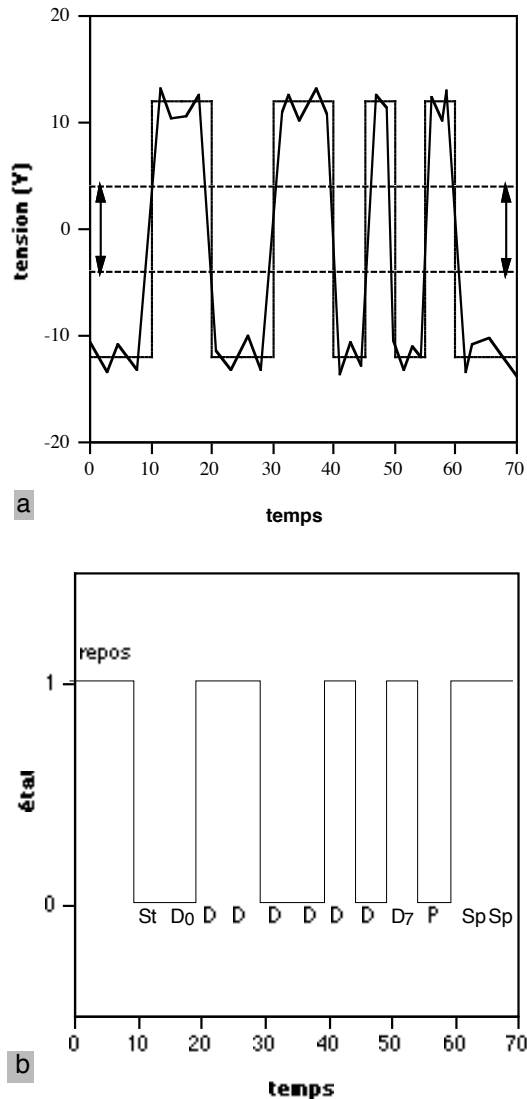


Fig 6 : Transmission de l'octet 10100110 par le mode série asynchrone avec contrôle de parité.

a : tension du fil (visible sur un oscilloscope) : elle est écartée de la tension idéale (en pointillés) par un parasitage dû au bruit de fond.  
 Entre les flèches : zone de variation ne produisant pas de changement d'état.  
 b : état des bits correspondants.  
 (pour le convertisseur ADC 800 du paragraphe 2.2 l'échelle de temps est en  $\mu$ s)  
 St : Start bit Sp : Stop bit P : bit de parité (pair)  
 D : bits de donnée de 0 à 7.

On voit que le rendement de la transmission des bits utiles par ce protocole n'est pas supérieur à  $8/12 = 65\%$  ; soit en terme de temps : à la cadence 1200 bauds il faudra 10 ms pour transmettre la valeur 166, et 1,25 ms à 9600 bauds.

Quand le convertisseur envoie un résultat sur un nombre de bits supérieur à 8 (CAN 10, 12, 16 bits), le processeur le lit par mots de 8 bits avec autant d'accès-mémoire nécessaires. Ainsi l'envoi d'un CAN 12 bits exige 2 lectures :

- les 8 premiers bits (de poids fort),
- puis les 8 suivants, dont 4 sont significatifs, les 4 autres étant masqués.

## 4.2. La sortie "série" des appareils et les problèmes de connexion

Alors que les sorties analogiques tendent à disparaître - conséquence des techniques numériques - nombre d'appareils sont proposés avec une sortie "série" ou "informatique" pour une liaison directe avec l'ordinateur. En pratique, sauf dans le cas des chaînes fermées qui peuvent ne pas convenir aux besoins, la connexion n'est pas sans difficultés, la standardisation étant limitée. Nous nous limiterons au cas des liaisons RS232 (V24), les variantes RS422 (type Macintosh) et 485, ou V23, V32 ... pour modems pouvant être étudiées dans les ouvrages spécialisés.

### 4.2.1. Les normalisations

#### 4.2.1.1- L'aspect physique : les connecteurs série RS232

Divers organismes ont proposé des normes pour la liaison série asynchrone précisant l'affectation des broches de connexion et certaines caractéristiques électriques. Les normes RS232C (recommandation de l'EIA : Electrical Industry Association en coopération avec les laboratoires Bell) et V.24 (avis publié par le comité CCITT) - deux normes très proches qui pour nous ne diffèrent que par la nomenclature adoptée - définissent :

- les positions et fonctions des 25, ou 9, broches (pins) des connecteurs pour liaison série asynchrone.
- les états électriques (niveaux de tension) correspondant aux états logiques 0 et 1 à l'émission et à la réception.

Sur les connecteurs série, mâles ou femelles, des appareils et ordinateurs, les broches d'usage courant portent les numéros et fonctions du tableau 2.

| numéros des broches |             | norme RS232     |                        | avis V24 |                                   |
|---------------------|-------------|-----------------|------------------------|----------|-----------------------------------|
| DB25                | D<br>B<br>9 | Sigle           | Fonction               | Sigle    | Fonction                          |
| 2                   | 3           | TD              | Transmit Data          | ED       | Émission de Données               |
| 3                   | 2           | RD              | Receive Data           | RD       | Réception de Données              |
| 4                   | 7           | RTS             | Request To Send        | DPE      | Demande Pour Émettre              |
| 5                   | 8           | CTS             | Clear To Send          | PAE      | Prêt A Émettre                    |
| 6                   | 6           | DSR             | Data Set Ready         | PDP      | Poste de Données Prêt             |
| 7                   | 5           | SG<br>(GND<br>) | Signal Ground          | TS       | Terre de Signalisation<br>(masse) |
| 8                   | 1           | CD<br>(DCD)     | Carrier Detect         | DP       | Détection de Porteuse             |
| 20                  | 4           | DTR             | Data Terminal<br>Ready | TDP      | Terminal de Données<br>Prêt       |

Tableau 2 : Normes d'identification des broches des connecteurs série.

Dans sa forme minimale, il ne faut que 3 fils entre un émetteur et un récepteur : émission, réception, masse. Mais la liaison est souvent complétée par un dialogue plus ou moins élaboré entre le récepteur et la source émettrice. Par exemple, l'ordinateur signale qu'il est prêt, ou non, par l'envoi d'un ordre logiciel (c'est le protocole Xon/Xoff) ou électrique (par les fils RTS/CTS). Ou encore le récepteur, détectant une erreur, demande la répétition de l'envoi du même mot un certain nombre de fois.

#### 4.2.1.2- L'aspect codage

S'agissant des nombre, format des informations et de leurs modalités d'envoi par l'appareil, il n'existe aucun standard, chaque constructeur adoptant sa solution informatique ... qui peut d'ailleurs changer d'une ligne d'appareils à une autre. On comprend que l'utilisation effective d'une sortie RS232 d'appareil puisse poser quelques problèmes de connectique et de configuration logicielle.

À noter ici que certains appareils offrent à l'utilisateur des options de configuration de leur sortie série. Elles vont de la position de commutateurs externes ou internes pour le changement de la vitesse à l'ouverture par le "superutilisateur" d'un menu complet de choix des paramètres de la sortie : vitesse, nombre de bits de donnée et d'arrêt, type de contrôle, grandeur(s) à transmettre...

### 4.2.2. Le câble série

Les appareils étant souvent équipés de prises RS232C simplifiées (tous les signaux nécessaires aux acquittements ne sont pas assurés), on a toujours intérêt à exiger du fabricant ou distributeur le câble - ou au moins son plan - pour la liaison avec l'ordinateur.

À défaut, les câbles croisés pour imprimantes série du commerce peuvent convenir, ou encore le câblage simplifié de la figure 7.

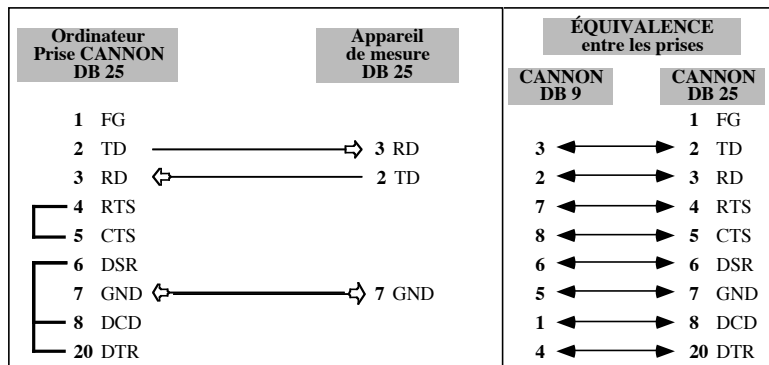


Fig. 7 : Plan de câblage d'une connexion par voie série et équivalence des connecteurs à 25 et 9 broches.

### 4.2.3. Configuration et protocole de la communication

La connexion physique sortie - ordinateur étant établie, son activation n'est possible, on le sait, que par un logiciel capable d'assurer la réception et le décryptage des trains d'information transmis. Ces logiciels sont assez souvent proposés par le constructeur - mais pas toujours, en particulier dans le cas des appareils de milieu ou bas de gamme - et, étant fermés, ils ne sont pas adaptables aux expérimentations recherchées (laboratoire, pédagogie) et presque jamais à des matériels voisins.

Nous avons vu que certaines sorties RS232 d'appareils sont paramétrables. De la même façon, il existe des logiciels d'acquisition ouverts munis d'un programme de configuration de la liaison série, efficace à condition que l'utilisateur connaisse toutes les caractéristiques de la sortie à capter : la notice technique de la carte RS232 et de son protocole de communication - dont le caractère uni ou bidirectionnel c'est à dire dans le seul sens récepteur-ordinateur ou dans les deux sens - sont indispensables.

L'encadré suivant montre les options du programme d'un tel logiciel conçues pour une adaptation maximale à la diversité des sorties numériques et des chaînes émises. Le programme permet de tester en ligne l'adéquation du paramétrage en visualisant "en clair" le message effectivement reçu. Une option "pilotage" (commande) le complète pour l'envoi de commandes à l'appareil : elles sont par exemple nécessaires pour initialiser les sorties mixtes de certains appareils (Centronics - connecteur à 36 broches pour imprimantes - et RS232 sur la même prise) ou établir un protocole pour les liaisons bidirectionnelles.

Fenêtre de paramétrage d'une liaison RS232 (logiciel Régressi, versions Série ou Windows)

**1- Numéro du Port série de l'ordinateur connecté :** COM 1, 2, 3, 4.....

**2- Paramètres d'émission du mot binaire :**

- vitesse : 1200 à 9600 bauds.
- nombre de bits de donnée : 7 ou 8  
(7 bits peuvent en effet suffire pour coder les caractères alphanumériques standard).
- contrôle de parité : absent (none), pair (even), impair (odd).
- nombre de bits d'arrêt : 1 ou 2.

**3- Modalités d'envoi et de dialogue :**

- envoi continu ou seulement sur ordre de l'ordinateur (et dans ce deuxième cas : saisie de l'ordre en code ASCII et du signal de terminaison).
- temporisation de l'émission, ou non, par le protocole Xon/Xoff.

**4- Format de la chaîne de caractères envoyée :**

- longueur fixe ou non (les valeurs numériques peuvent prendre un nombre variable de chiffres).
- emploi ou non de séparateurs des caractères numériques (lettres ou caractères de contrôle).
- nombre de lignes (donc de CR ou CRLF).

**5- Mode d'extraction de la grandeur physique :** choix du repère de sa position dans la chaîne transmise (par le numéro du caractère ou l'ordre de la donnée).

**6- Commande (envoi d'ordres à l'appareils).**

**7- Test en ligne (réception de l'intégralité de la chaîne de caractères émise).**

**8- Aide :** texte des instructions pour l'utilisateur.

# 5. LES CAPTEURS

Résumé :

Des capteurs détectent et mesurent des grandeurs physiques en les transformant en tension. Ils se caractérisent par la fonction tension émise/grandeur captée et leurs performances (bruit de fond, sensibilité, gamme couverte...). Des artifices de montage peuvent être nécessaires pour associer des capteurs incompatibles.

Ce sont les systèmes physiques en amont de la chaîne de mesure capables de transformer - transduire - une grandeur physique en courant ou tension électrique qu'on souhaite proportionnels à la grandeur.

## 5.1. Sorties en intensité et tension

Les appareils et capteurs à sortie intensité (entre 4 et 20 mA) sont destinés aux industriels car adaptés aux conditions particulières : sondes éloignées de l'ordinateur, environnement fortement parasité.

Ce sont des sorties analogiques en tension qui équipent les appareils et capteurs de laboratoire. Mais à part quelques cas (pression, accélération), la tension produite est trop faible (quelques mV / unité) pour être envoyée sur le CAN d'une interface sans une perte importante de résolution. Des conditionneurs amplifient, en général par une fonction affine, et au besoin linéarisent le signal, la proportionnalité tension/grandeur pouvant être inexacte. Les amplis op (amplificateurs opérationnels) qui les composent superposent leur bruit de fond aux très faibles tensions !

## 5.2. Exemples de capteurs employés en biologie

- Les forces et pressions sont mesurées par des capteurs à **jauge de contrainte** : la longueur (et la section) d'une résistance varient lors de la déformation du corps de l'épreuve (une membrane par exemple) sur lequel elle est fixée.
- **Les sondes de température** courantes sont des diodes qui, alimentées par un courant d'intensité constante, donnent une tension aux bornes variable avec la température. L'appariement différentiel de 2 diodes linéarise la réponse dont la sensibilité,  $60 \mu\text{V} / ^\circ\text{C}$  est amplifiée à  $10 \text{ mV} / ^\circ\text{C}$ . L'ensemble générateur, diodes, amplificateur est commercialisé en module intégré (National Semiconductor, Siemens).
- **Les éclaircissements** sont mesurés par les photodiodes de circuits intégrés de montage voisin du mode phototransduction. La bande passante est large, la réponse rapide et l'on trouve des luxmètres sensibles à des gammes d'éclaircissement différentes. À noter que les niveaux de leur sortie sont inversés :  $V_{sa}$  prenant les valeurs 0 et maximale pour les éclaircissements maximal et nul respectivement.
- **Le pH**, dont on sait qu'il est lui même une grandeur dérivée de la grandeur concentration en protons, est donné par les pHmètres. Leur sortie analogique est :
  - soit directement le potentiel d'électrodes; la relation donnant la force électromotrice de la pile constituée entre les électrodes de mesure et de référence montre que la tension est de  $58 \text{ mV} / \text{unité de pH}$  à  $20 ^\circ\text{C}$ , avec une valeur nulle à  $\text{pH} = 7$  : c'est l'exemple-type de signal bipolaire.
  - soit une ou un choix de tensions amplifiées et éventuellement décalées en variation unipolaire positive.
- **L'"électrode" à oxygène** (dite de Clark) est un ampéromètre à anode d'argent et cathode de Platine. La réduction du dioxygène en eau à la cathode produit un courant dont la valeur limite est, dans des conditions fixées (de tension appliquée aux électrodes, de température, d'agitation, d'isolement par une membrane perméable à  $\text{O}_2$ ) proportionnelle à la teneur en dioxygène du fluide - liquide ou gaz. Le courant, de quelques  $\mu\text{A}$ , doit être amplifié et transformé en tension. L'alimentation des oxymètres par le secteur autorise des sorties de quelques volts, ce qui n'est pas le cas des portables à piles dont le signal ne peut dépasser quelques dizaines de mV.
- Au contraire des précédents, **le capteur de gaz, sensible à l'alcool**, n'est pas linéaire : sa réponse en tension est une fonction logarithmique du logarithme de la pression du gaz (fonction log/log). La résistance d'un semi-conducteur déposé en couche mince sur une céramique poreuse dépend de la teneur en dioxygène de l'environnement. Ce dispositif adsorbe les gaz, et les oxyde à chaud avec consommation d'oxygène. Ce qui explique qu'il réagisse au monoxyde de carbone, à l'alcool... et non au dioxyde de carbone. Détecteur très sensible, ce capteur pose des problèmes de quantification et de spécificité, d'ailleurs d'intérêt pédagogique certain.
- On pourrait ajouter **les sondes volumétriques, les turbines à luxmètre** pour évaluation de débits. Ou les **conductimètres et les photomètres** - dont l'absorbance est, comme dans le cas du pH, une grandeur dérivée de l'intensité lumineuse par transformation logarithmique.

### 5.3. Leurs limites

Les capteurs sont plus ou moins sensibles et donnent une réponse, plus ou moins linéaire dans une certaine gamme de variation de la grandeur physique. On a vu que certains peuvent poser des problèmes d'interférences. Le signal qu'ils émettent peut être affecté par un bruit de fond et des parasites qui viennent perturber la détection : ce peut être le cas des capteurs fortement amplifiés.

À ces caractéristiques s'ajoutent en pratique des incompatibilités auxquelles on se trouve confronté pour des acquisitions multiparamétriques :

- **Les entrées offertes par l'interface** peuvent ne pas convenir complètement (par la gamme de calibres disponibles ou par le fait qu'on ait à connecter à la fois des capteurs uni et bipolaires) : les interfaces dont les entrées sont à zéro central et ajustables en calibre par l'utilisateur résolvent ces difficultés. Les masses des appareils et capteurs peuvent être à l'origine de décalages et de bruits pour les tensions faibles : les entrées différentielles les évitent en permettant des mesures de niveau et variations faibles mêmes parasitées.
- **Le principe même des capteurs** peut s'opposer à un branchement commun sous peine de court-circuit ; c'est par exemple le cas des systèmes à électrodes de référence comme les pHmètre, conductimètre et oxymètre. Il faut alors isoler électriquement l'un des capteurs de l'interface par un couple optoélectronique : un couplage photodiode-phototransistor assure une transmission intermédiaire du signal avec discontinuité électrique. Cette isolation, dite aussi galvanique, est par exemple adoptée pour les sondes de fermenteurs ; elle est nécessaire également dans le cas des modules numériques de commande.

### Corrélat :