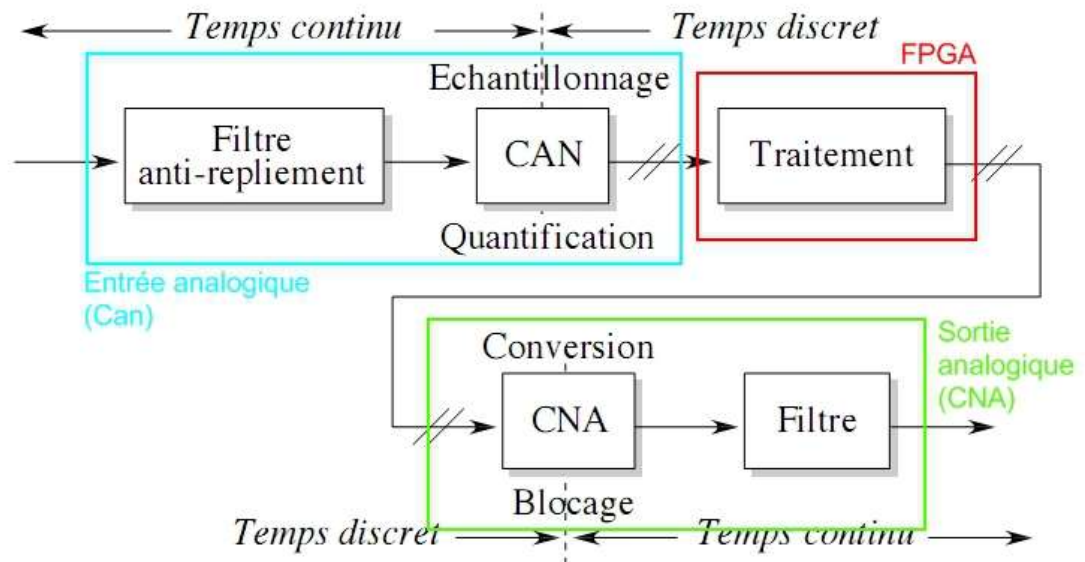


COURS – CI2

Système à Evénements Discrets (SED)

Partie 3 – Prélèvement et conversion de l'information pour les SED et systèmes asservis

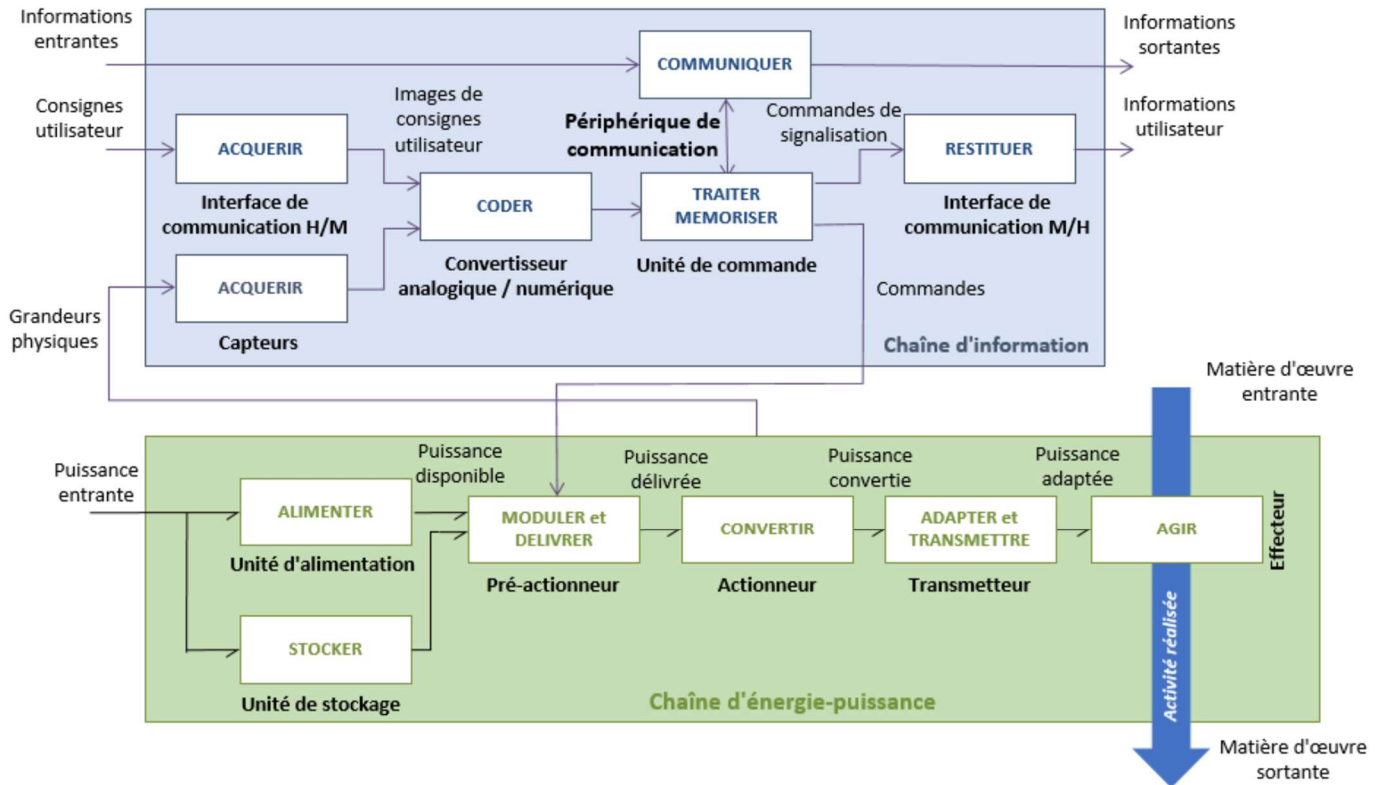


Je dois être capable de :

- ***Comprendre le principe de mise en œuvre des convertisseurs dans un système***
- ***Identifier les principales caractéristiques des convertisseurs***
- ***Connaître le vocabulaire employé pour caractériser le fonctionnement d'un capteur***
- ***Connaître les différentes technologies de capteurs***

1. Introduction

Les systèmes à événements discrets (SED) ou les systèmes asservis possèdent tous deux une chaîne fonctionnelle pouvant être décrite comme ci-dessous avec une chaîne d'énergie-puissance et une chaîne d'information :



Dans la chaîne d'information, l'information traitée peut être de trois types :

Type	Forme du signal	Exemple
analogique , le signal peut prendre une infinité de valeurs car il varie en continue ;		
numérique , le signal prend des valeurs discrètes transmises sous la forme d'une combinaison de digits (<i>bits</i>) ;		
logique , le signal n'admet que deux valeurs distinctes : tout ou rien (0 ou 1).		

Dans un SED ou un système asservi, le prélèvement de l'information de l'état des différents éléments du système est réalisé par les capteurs. Les **capteurs** permettent d'acquérir une **grandeur physique et d'en produire une image** exploitable par l'**unité de commande**.

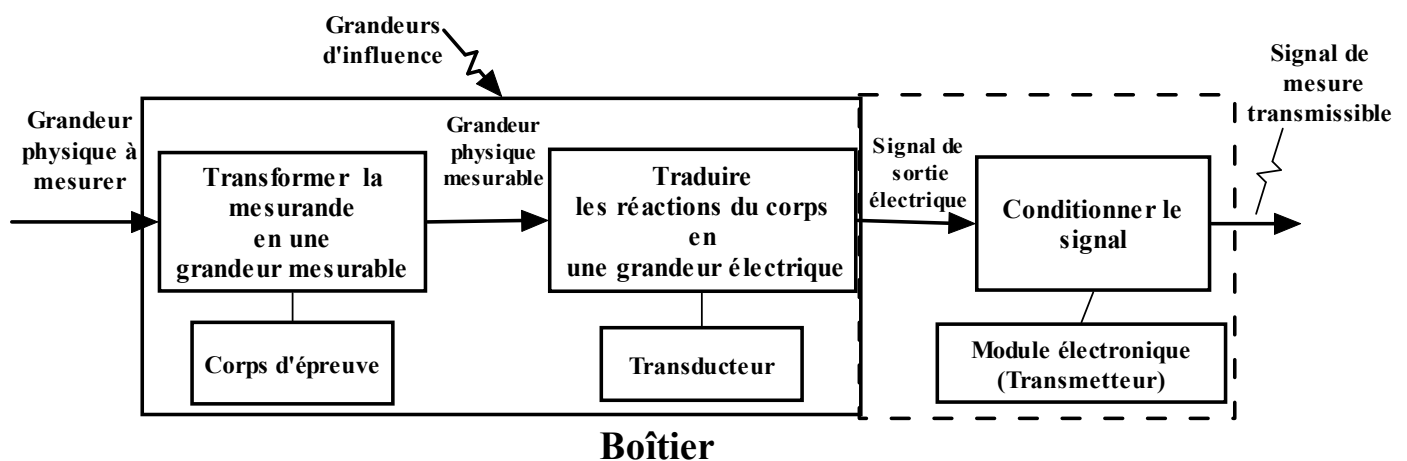
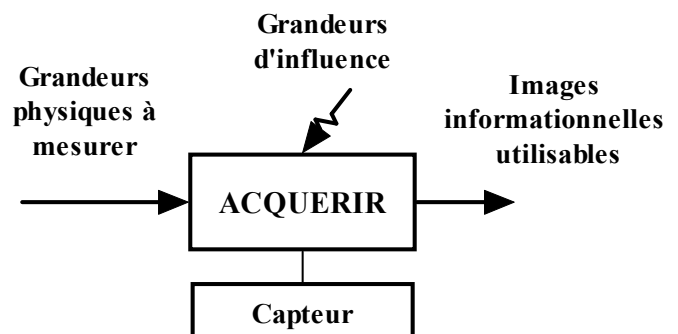
Cependant, l'**information délivrée par le capteur n'est pas toujours compatible avec l'unité de commande**. Il est alors souvent nécessaire d'associer au capteur un élément de codage pour **convertir le signal analogique en signal numérique** utilisable par l'unité de commande. C'est la fonction du bloc « CODER » réalisée par les **Convertisseurs Analogique-Numérique (CAN)** et les **Convertisseurs Numérique-Analogique (CNA)**.

Ce cours permet de présenter les **principales caractéristiques des capteurs** et des **convertisseurs CAN** et **CNA**.

2. Généralités des capteurs

Un **capteur** est un objet technique de prélèvement d'informations sur un processus. Il réalise la **conversion d'une grandeur physique mesurée (grandeur d'entrée) en une grandeur physique (grandeur de sortie)** exploitable par un élément de la chaîne de traitement de l'information.

Exemple : une tension électrique, une hauteur de mercure, une intensité, la déviation d'une aiguille....

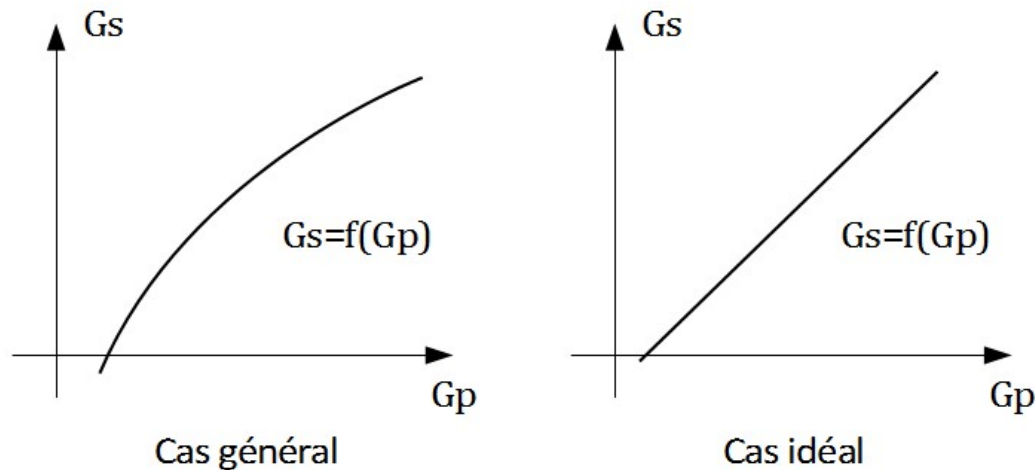


Les trois aspects à étudier pour choisir ou concevoir un capteur sont :

- Les caractéristiques du **mesurande** (la grandeur physique) et son accessibilité,
- L'utilisation du capteur (gestion, décision, contrôle) et les performances minimales attendues,
- Son insertion dans une chaîne de mesure (ou chaîne d'informations).

Fonction de transfert :

Capteur sont souvent utilisé en statique : la valeur d'un **mesurande** ne dépend pas du temps. Un capteur convertit l'effet d'une grandeur physique (G_p) en une grandeur de sortie, souvent électrique (G_s). La grandeur de sortie est l'image par f de la grandeur physique.



f est appelée **fonction de transfert** du capteur ou **courbe d'étalonnage**. Elle peut être donnée sous forme de tableau ou d'une fonction (une droite, un polynôme...).

3. Spécifications des capteurs

Etendue de mesure EM ou domaine nominal d'emploi (Full Scale) :

Différence algébrique entre les valeurs extrêmes pouvant être prises par la grandeur à mesurer.

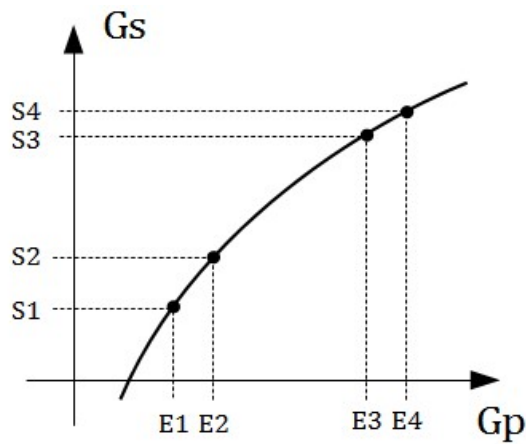
$$Em = E_{max} - E_{min}$$

Portées : Valeurs de la grandeur correspondant aux limites minimale S_{min} et maximale S_{max} de l'étendue de mesure.

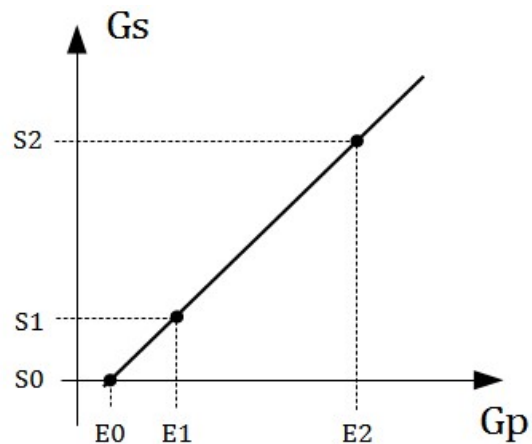
Sensibilité S_{cap} (ou S)

Pour une valeur donnée de la grandeur mesurée E , la sensibilité s'exprime par le quotient de la variation de sortie par la variation correspondante de la grandeur mesurée. Cela correspond à calculer la dérivée de la fonction en un point. Si la fonction est linéaire, la sensibilité sera constante et équivalente à la pente d'une droite.

$$S_{cap} = \frac{\Delta S}{\Delta E}$$



Caractéristique
non-linéaire



Caractéristique
linéaire

Caractéristique **non-linéaire** : la sensibilité est différente suivant la zone de variation considérée.

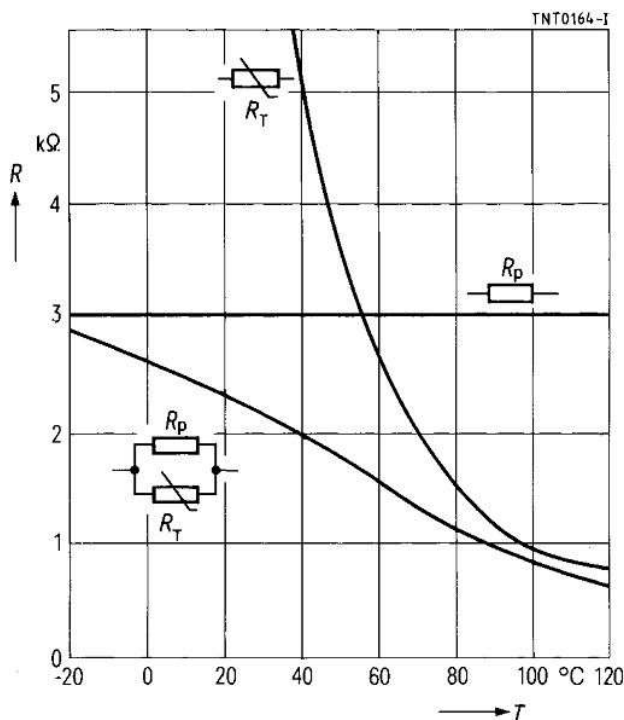
$$S_{cap1} = \frac{\Delta S}{\Delta E} = \frac{S2 - S1}{E2 - E1}$$

$$S_{cap2} = \frac{S4 - S3}{E4 - E3}$$

Caractéristique **linéaire** : La sensibilité est constante sur toute la plage de mesure.

$$S_{cap} = \frac{S2 - S0}{E2 - E0} = \frac{S2 - S1}{E2 - E1}$$

Exemple : capteur de température de type CTN :



Le capteur est symbolisé par la résistance R_T :

La fonction $R_T = f(T)$ n'est pas linéaire.

L'étendue de mesure est $Em = T_{max} - T_{min} = 120 - 38 = 82^\circ$

Portée : la portée maximum est $120^\circ C$, la portée minimum est $38^\circ C$.

Sensibilité (par exemple entre 4 et $5k\Omega$) :

$$S = \frac{\Delta R}{\Delta T} = \frac{5000 - 4000}{40 - 46} = \frac{1000}{-6}$$

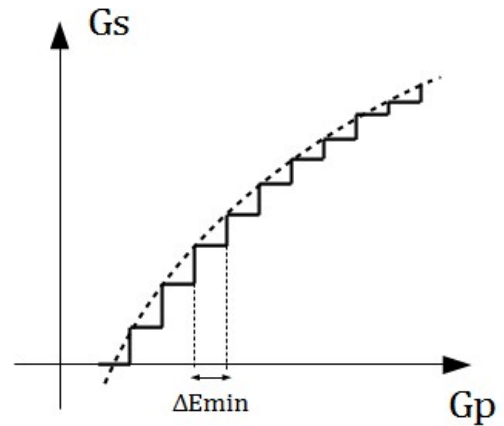
$$S = -166,7 \Omega/^\circ C$$

Résolution :

La résolution est la plus petite variation de la grandeur G_p à mesurer que l'appareil est capable de détecter. Attention : ne pas confondre la sensibilité avec la résolution.

Ex : un voltmètre indique 100 volts.

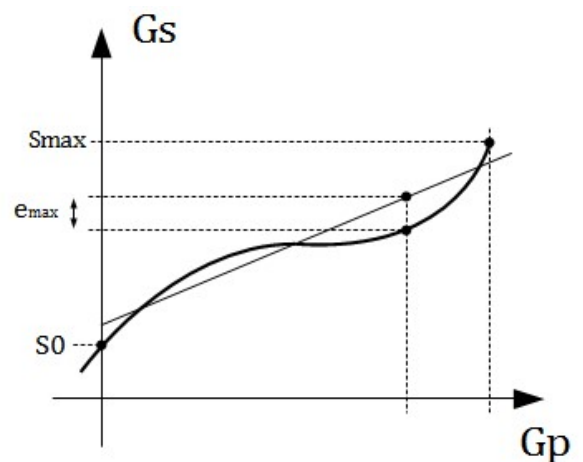
Une variation de 0,1 volt fait bouger l'aiguille du voltmètre alors qu'une variation de 0,05 volt ne fait pas bouger l'aiguille. La résolution du voltmètre est de 0,1 volt.



Linéarité et erreur de linéarité e_L :

C'est le plus grand écart entre la courbe d'étalonnage et une droite appelée "meilleure droite" obtenue par la méthode des moindres carrés. Elle s'exprime en pourcentage de l'étendue de mesure.

$$e_L = \frac{e_{max}}{S_{max} - S_0}$$



Justesse :

Qualité qui caractérise l'aptitude d'un capteur à donner des indications égales à la valeur mesurée, les erreurs de fidélité n'étant pas prise en compte

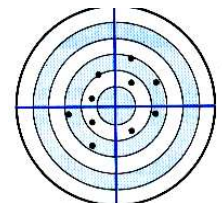
Fidélité :

Qualité d'un capteur dont les incertitudes sont faibles. Elle se traduit par des valeurs mesurées groupées autour de leur valeur moyenne.

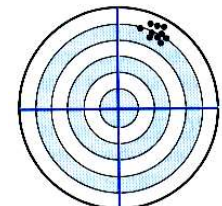
Précision :

Qualité qui caractérise l'aptitude d'un capteur à donner des indications proches de la valeur vraie mesurée de la grandeur mesurée : un capteur précis est à la fois juste et fidèle.

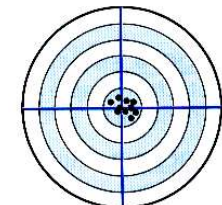
L'**erreur de précision** e_p est généralement exprimée en pourcentage de l'étendue de mesure ou de la pleine échelle erreur globale d'un capteur dans les conditions d'emploi et comprenant l'erreur de justesse ainsi que l'erreur de fidélité % P.E.



JUSTE



FIDÈLE



PRÉCIS

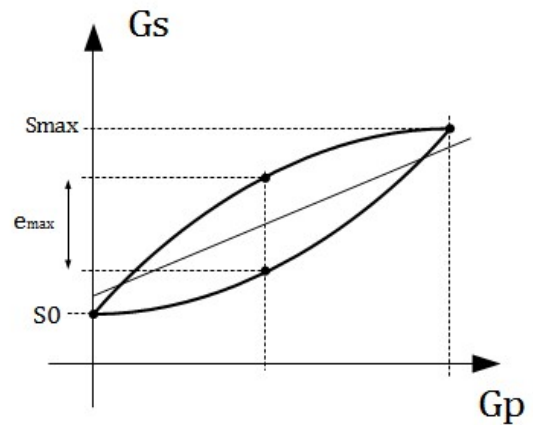
Réversibilité (hystérésis) :

Qualité qui caractérise l'aptitude d'un capteur à donner la même indication lorsqu'on atteint une même valeur de la grandeur mesurée, que cette valeur ait été atteinte par variation croissante continue ou décroissante continue de la grandeur.

Erreur de réversibilité, erreur d'hystérésis :

Différence des indications lorsqu'on atteint la même valeur de la grandeur mesurée soit par variation croissante continue, soit par variation décroissante continue de la grandeur.

L'erreur de réversibilité est égale à l'écart maximal constaté sur ces deux valeurs dans l'étendue de mesure. Pratiquement, la valeur retenue pour l'erreur d'hystérésis est égale à la moitié de l'erreur de réversibilité. Elle s'exprime en pourcentage de la valeur de l'étendue de mesure.



$$e_H = \frac{e_{max}}{2(S_{max} - S_0)}$$

Erreur de zéro :

Ecart entre la valeur mesurée et la valeur théorique de l'information de sortie d'un capteur, pour la valeur zéro ou la valeur prise comme origine de la grandeur mesurée.

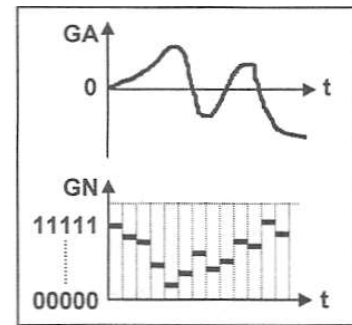
Rapidité : Qualité qui exprime la manière de suivre dans le temps les variations de la grandeur à mesurer.

Répétabilité et erreur de répétabilité : indice de dispersion des indications d'un capteur pour une série d'indications consécutives effectuées dans les mêmes conditions, par un même observateur, avec les mêmes méthodes, et à des intervalles de temps assez courts.

4. Généralités des CAN/CNA

L'électronique est divisée en deux domaines distincts :

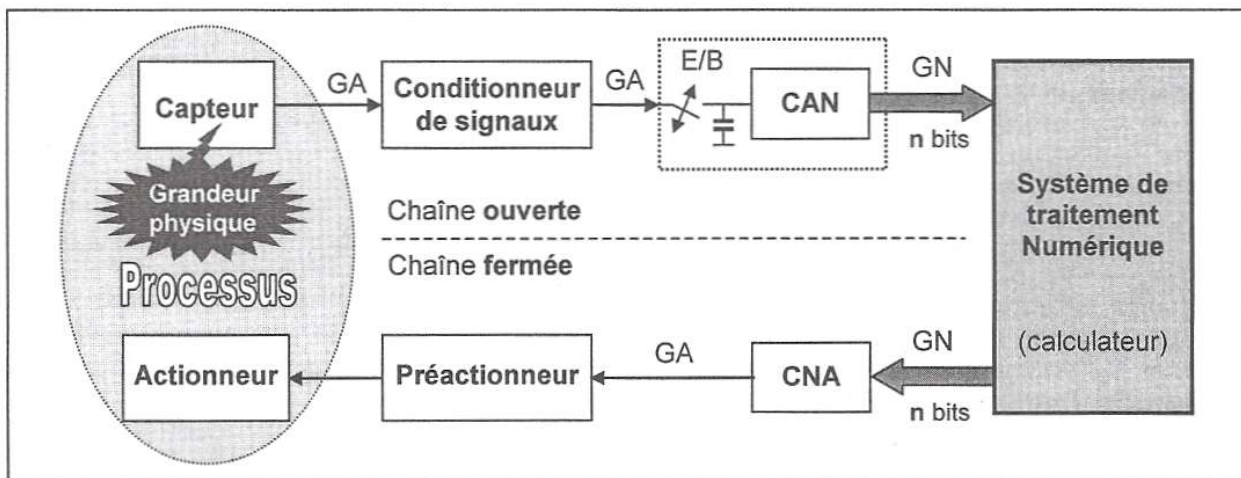
- le **domaine analogique** où les grandeurs (GA) peuvent prendre une infinité de valeurs différentes. La plupart des grandeurs issues des capteurs, par exemple, sont analogiques et traduisent des phénomènes physiques variant continûment dans le temps.
- le **domaine numérique** où les grandeurs (GN) prennent un nombre fini d'états. On associe à chaque état un nombre binaire codé sur n bits. Son équivalent décimal évolue entre 0 et $2^n - 1$.



Le domaine numérique est maintenant prédominant. Il s'est beaucoup développé grâce aux progrès faits par les microprocesseurs. Néanmoins, on est souvent amené à convertir une GA en une GN pour y effectuer un traitement numérique ou inversement, de convertir une GN en une GA.

□ **Exemple** : Chaîne de mesure numérique

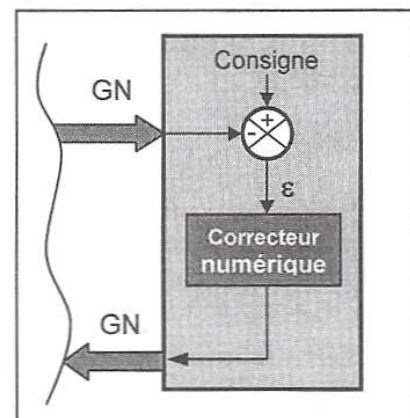
La mesure a de nos jours envahi le domaine industriel et joue un rôle actif dans la production en assurant la surveillance, l'optimisation de processus, le contrôle de la qualité ... Sa mise en œuvre est facilitée par les **systèmes d'acquisition de données industrielles**. Si la finalité du système se réduit à l'affichage ou la mémorisation, pour un traitement ultérieur, de la grandeur à mesurer, la chaîne de mesure est **ouverte**. Elle est **fermée** lorsque le résultat de cette mesure doit agir sur une commande de **processus** pour réguler la grandeur observée par exemple.



Le signal issu du **capteur** est mis en forme et amplifié par le **conditionneur** de signaux. Un **CAN** (Convertisseur Analogique / Numérique) effectue la **numérisation** du signal fourni par le conditionneur, après un échantillonnage (E/B) éventuel.

La sortie du CAN est alors traitée par un **calculateur**. Dans le cas d'une régulation de la grandeur observée par exemple, le calculateur effectue une **correction numérique** à partir de la consigne et du signal numérisé issu du capteur.

Il élabore alors le signal de commande du préactionneur, qui est ensuite reconverti en signal analogique. Cette opération est réalisée par un **CNA** (Convertisseur Numérique / Analogique).



a. Relation entre grandeur analogique et numérique

Le but de la conversion A/N ou N/A est de faire correspondre un nombre binaire $N_{(2)}$ de n bits à une tension analogique V le plus souvent ou inversement. Le nombre binaire est défini par :

$$N_{(2)} = [a_{n-1} \ a_{n-2} \ \dots \ a_1 \ a_0]$$

Il est écrit généralement en **binaire naturel**. a_0 est le bit de poids faible ou LSB (Least Significant Bit) et a_{n-1} le bit de poids fort ou MSB (Most Significant Bit). Son équivalent décimal est :

$$N_{(10)} = a_{n-1} \cdot 2^{n-1} + a_{n-2} \cdot 2^{n-2} + \dots + a_1 \cdot 2^1 + a_0 \cdot 2^0$$

La valeur de la tension V à traduire (CAN) ou traduite (CNA) est discrète et multiple d'une valeur de base, appelée le **quantum de conversion q** (ou pas de progression) :

$$V = q \cdot N_{(10)} = q \cdot (a_{n-1} \cdot 2^{n-1} + a_{n-2} \cdot 2^{n-2} + \dots + a_1 \cdot 2^1 + a_0 \cdot 2^0)$$

La valeur maximale de V est donc :

$$V_{\max} = q \cdot (2^n - 1)$$

b. Fonction de transfert

Le CAN

Il délivre en sortie un nombre fini de codes numériques, correspondant à une gamme de tension analogique d'entrée bornée : c'est la plage de conversion (ou tension de pleine échelle **PE**). Elle est souvent de 0 - 5 V, 0 - 10 V pour un CAN unipolaire et ± 5 V, ± 10 V pour un CAN bipolaire.

Le quantum se déduit de la relation :
 n est le nombre de bits du CAN.

$$q = \frac{PE}{2^n}$$

La courbe de transfert théorique donnant le mot binaire de sortie $N_{(2)}$ en fonction de la tension d'entrée V_E , est une **courbe en escalier**. On peut lui associer l'erreur de conversion ou **erreur de quantification ε_q** en dents de scie. Celle-ci est comprise entre $-q/2$ et $q/2$.

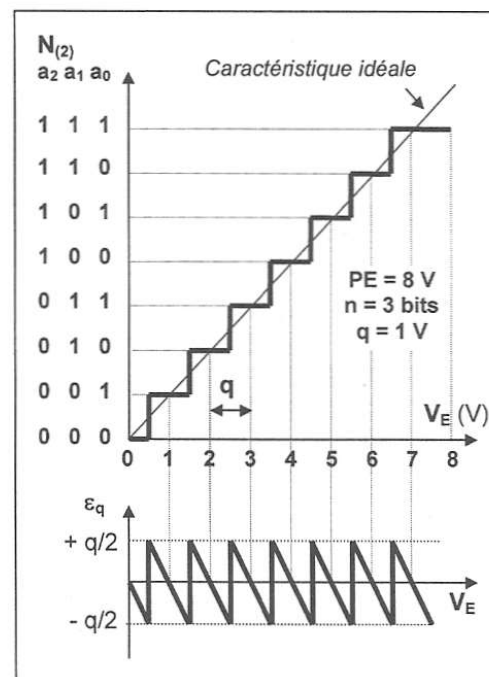
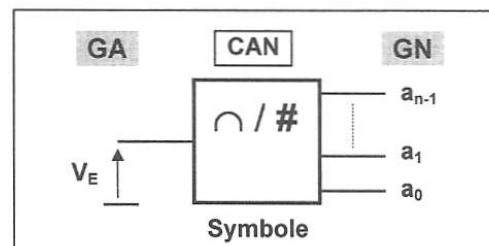
En effet, en **quantification centrée**, le mot binaire de sortie $N_{(2)}$ correspond à une tension d'entrée V_E telle que :

$$N_{(10)} \cdot q - \frac{q}{2} \leq V_E < N_{(10)} \cdot q + \frac{q}{2}$$

Le quantum q représente la plus petite variation de V_E que le CAN peut coder.

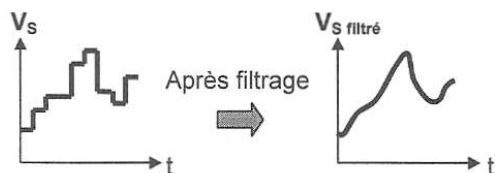
Autre exemple :

Si $n = 8$ et $PE = 10$ V alors $q = 39$ mV.



Le CNA

Il génère une tension V_S proportionnelle au mot binaire $N_{(2)}$ fourni en entrée. A chaque mot correspond une valeur analogique et une seule. La tension de sortie V_S varie par "bonds" et non plus continûment.



$$V_{Smax} = q \cdot (2^n - 1) = \frac{PE}{2^n} \cdot (2^n - 1)$$

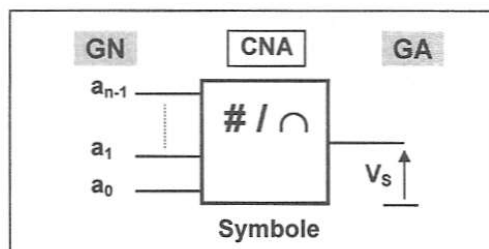
On notera que pour $n \geq 8$, $V_{Smax} \approx PE$.

Le quantum q représente la plus petite variation de la tension de sortie V_S à la suite d'une variation d'un LSB de $N_{(2)}$.

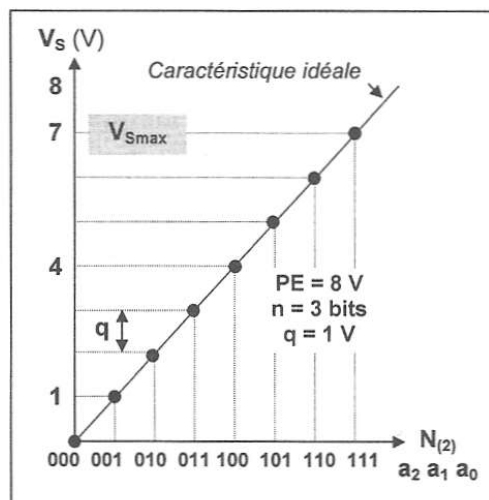
Toutes ces caractéristiques sont traduites par la figure ci-contre qui montre la caractéristique de transfert théorique d'un CNA unipolaire de 3 bits.

Autre exemple :

Si $n = 8$ et $PE = 10 \text{ V}$ alors $V_{Smax} = 9,96 \text{ V}$.



V_S peut prendre 2^n valeurs différentes de 0 à V_{Smax} , où n est le nombre de bits.



5. Spécifications des CAN / CNA

a. Caractéristiques principales

Les principales caractéristiques des CAN et CNA sont :

- le quantum q ;
- le nombre de bits n ;
- la plage de conversion (ou tension de pleine échelle **PE**) ;

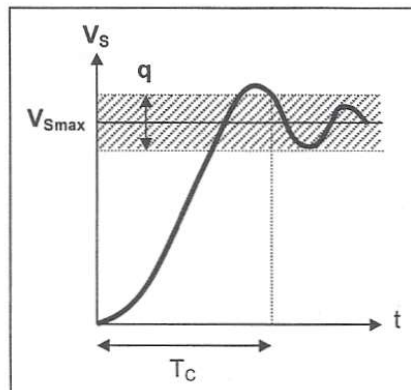
A ces trois paramètres de base s'ajoutent deux autres éléments importants :

- la résolution \mathfrak{R} : elle est définie par le pourcentage de la pleine échelle soit $\mathfrak{R} = \frac{1}{2^n}$ (elle peut aussi être définie par le nombre de bits n).
- le temps de conversion T_C :

Pour un **CNA**, c'est le temps qui s'écoule entre l'instant où l'ordre de conversion est envoyé, et l'instant où la tension de sortie V_S atteint sa valeur finale et ne s'écarte pas de celle-ci de plus de $q/2$.

Il est donné dans le **cas plus défavorable**, c'est à dire lors du passage de $V_S = 0$ à V_{Smax} (cf. figure).

Pour un **CAN**, c'est le temps minimum nécessaire pour stabiliser le mot binaire en sortie après qu'une tension V_E stable ait été appliquée à l'entrée.

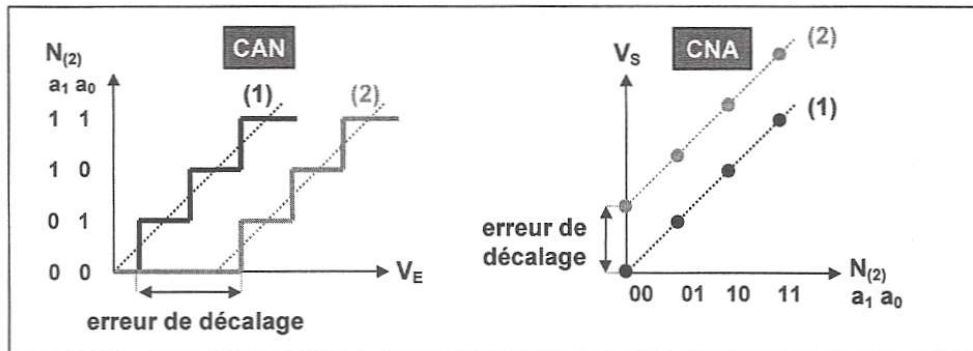


b. Les erreurs de conversion

La réalisation électronique des convertisseurs utilise des amplificateurs linéaires intégrés, des interrupteurs analogiques, des résistances, etc. Leurs imperfections (dérive en température, tension de décalage, ...) provoquent une distorsion de la caractéristique de transfert théorique.

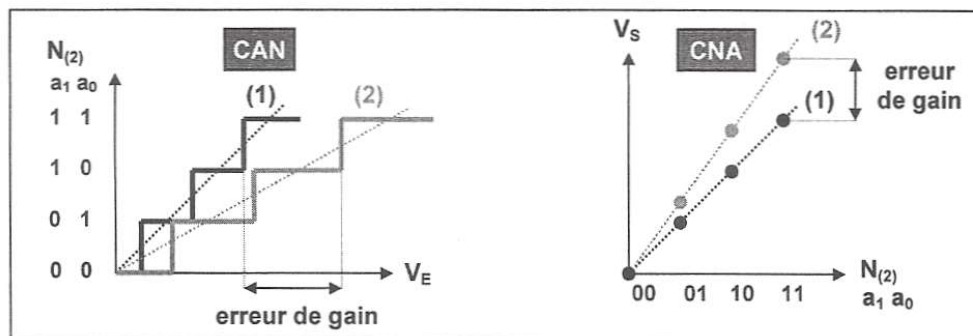
Erreur de décalage

C'est l'écart entre les caractéristiques de transfert théorique (1) et réelle (2).



Erreur de gain

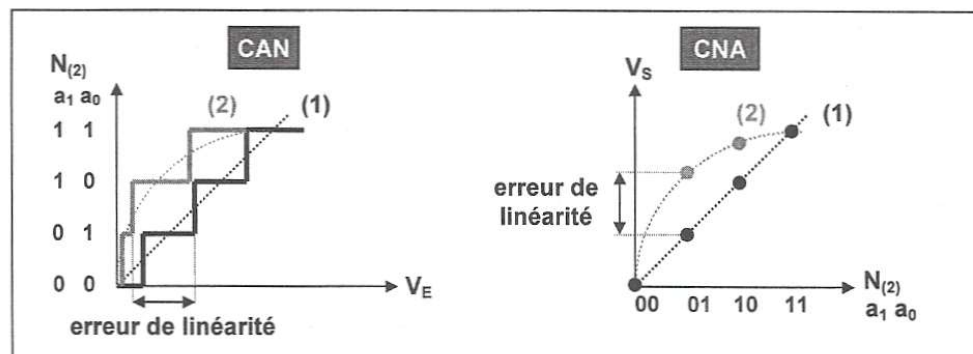
C'est la différence de pente de conversion, après correction de l'erreur de décalage, entre les caractéristiques de transfert théorique (1) et réelle (2). Le fabricant l'exprime sur la dernière transition du convertisseur.



Des réglages externes permettent d'annuler les deux erreurs précédentes.

Erreur de linéarité

C'est l'écart maximal entre la courbe réelle (2) et la courbe idéale (1) de la fonction de transfert, après annulation des erreurs de décalage et de gain.



6. Utilisation des CAN / CNA

a. CAN

Les principales caractéristiques techniques des CAN, reportées dans le tableau ci-dessous, sont classées selon des valeurs minimum, typiques et maximum :

Caractéristiques	Min.	Typ.	Max.
Nombre de bits	6	8/12	24
Temps de conversion	10 ns	20 μ s	> 0,1 s
Entrée analogique	<ul style="list-style-type: none"> unipolaire (0 à 10 V ou 0 à 20 V) bipolaire (± 5 V ou ± 10 V) 		
Sorties numériques	TTL, TTL 3 états ou ECL*		
Alimentation	<ul style="list-style-type: none"> symétrique (- 15 V, + 15 V) ou unique (0 V, 5 V) 		
Puissance consommée	200 mW	400 mW	> 1 W

* ECL : famille à transistors bipolaires appelée **logique à couplage par l'émetteur** dans laquelle les transistors ne sont jamais saturés (\Rightarrow vitesse de commutation très élevée)

D'une façon générale, un CAN est utilisé chaque fois que l'information disponible sous forme analogique doit subir une opération telle que :

- le **traitement numérique** (transformée de Fourier, filtrage numérique, ...) ;
- la **transmission numérique** (de la parole par exemple) ;
- la **visualisation numérique** (affichage d'une tension dans le cas d'un voltmètre numérique) ;
- la **mémorisation numérique** des signaux (signaux transitoires, audio, vidéo, ...).

b. CNA

Les principales caractéristiques techniques des CNA, reportées dans le tableau ci-dessous sont classées selon des valeurs minimum, typiques et maximum :

Caractéristiques	Min.	Typ.	Max.
Nombre de bits	8	8/12	18
Temps de conversion	10 ns	500 ns	250 μ s
Sortie analogique	<ul style="list-style-type: none"> unipolaire ou bipolaire courant (5 mA) ou tension (5 V, 10 V) 		
Entrées numériques	TTL ou TTL 3 états		
Alimentation	<ul style="list-style-type: none"> symétrique (- 15 V, + 15 V) ou unique (0 V, 5 V) 		
Puissance consommée	20 mW	200 mW	> 1 W

Outre la commande de divers actionneurs ou récepteurs (moteurs, électrovannes ...), les CNA peuvent être utilisés pour réaliser :

- des **amplificateurs à gain programmable** : les montages étudiés s'apparentent en fait à des amplificateurs de tension (V_{ref}) dont le gain est ajustable par une commande numérique ;
- des **filtres analogiques programmables**, dont la fréquence de coupure est modifiable par une commande numérique ;