

CHAPITRE I

CONVERSION ANALOGIQUE-NUMÉRIQUE SUR n BITS

1. NOTION DE CONVERSION ANALOGIQUE-NUMÉRIQUE

1.1 Définition de la conversion *analogique-numérique* (A/N) sur n bits

La conversion A/N sur n bits, est un processus de transformation d'un signal analogique u en un code binaire équivalent de n bits. La valeur numérique de ce code représente un nombre entier associé à u , dans une plage $[U_{ref}^-, U_{ref}^+]$ graduée en quantum q (unité de quantification). Les grandeurs U_{ref}^- et U_{ref}^+ désignent respectivement les tensions de référence inférieure et supérieure, avec $U_{Ref}^- < U_{Ref}^+$.

1.2 Intérêt de la conversion A/N en instrumentation

La conversion A/N intervient généralement au stade terminal d'un système d'acquisition de signaux. La figure 1 présente le schéma synoptique simplifié du système d'acquisition numérique d'un signal Φ , qui correspond à la grandeur de sortie d'un système physique.

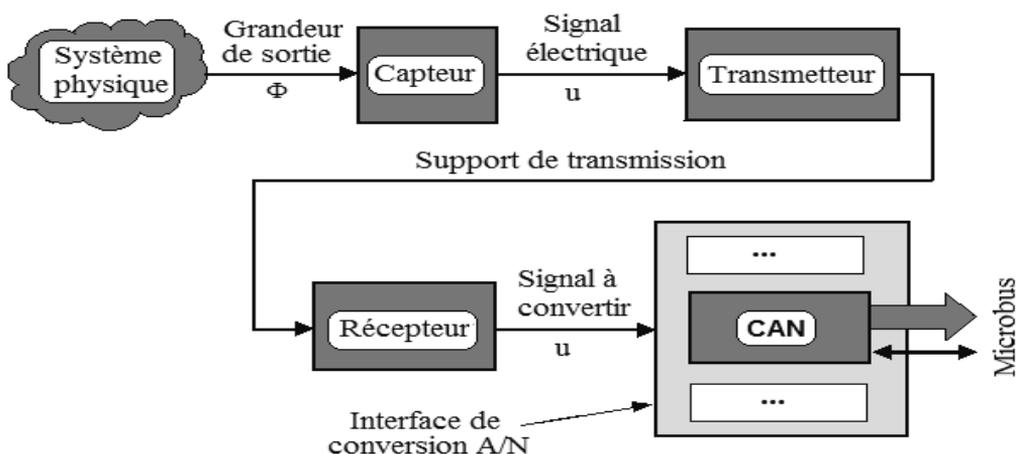


Fig. 1: Schéma synoptique d'un système d'acquisition numérique de signaux.

Un système d'acquisition numérique des signaux est constitué d'organes suivants:

- un capteur, permettant de produire l'image électrique u de la grandeur de sortie Φ à mesurer (température, pression, débit, vitesse, etc.),
- un transmetteur, qui permet de conditionner le signal u produit, en vue d'une bonne transmission vers le récepteur,
- un support de transmission du signal conditionné vers l'entrée du *convertisseur A/N* (CAN),
- un récepteur, qui reconstitue la tension u produite à l'origine, à partir du signal conditionné reçu,
- un CAN intégré, contenu dans une interface de conversion A/N ou dans un microcontrôleur. Il traduit le signal u reconstitué, en un code numérique de n bits appliqué au microbus d'un processeur numérique cible.

Par ailleurs, un programme de mesure, exécuté par le processeur numérique cible, permet de reconstituer numériquement la valeur mesurée de la grandeur physique Φ , connaissant la valeur de la tension u acquise numériquement. Cependant, la qualité du processus global de mesure numérique dépend des caractéristiques techniques des constituants du système d'instrumentation.

En considérant le cas particulier des CANs de n bits, on peut trouver sur le marché des composants intégrés, qui permettent de répondre aux exigences en bande passante allant jusqu'à plusieurs GHz, sous un rapport signal/bruit pouvant atteindre l'ordre de 100 dB. En général, les limites de performance des CANs de n bits, varient en fonction de la technique de mise en œuvre considérée.

2. MISE EN ŒUVRE DE LA CONVERSION A/N SUR n BITS

2.1 Etapes de la conversion A/N sur n bits

La conversion A/N sur n bits s'effectue en trois grandes étapes qui sont:

- l'*échantillonnage*, permettant de prélever la valeur d'un signal analogique u à l'instant considéré,
- la *quantification*, qui consiste à calculer le nombre entier N d'unités de mesure correspondant à u dans la plage de mesure,
- le *codage*, permettant de traduire le nombre entier N calculé sous forme d'un code numérique de n bits.

2.2 Techniques de conversion A/N sur n bits

Il existe une variété de techniques de conversion A/N, et à chaque technique correspond une technologie particulière de mise en œuvre, qui engendre des performances appropriées pour un domaine d'application spécifique.

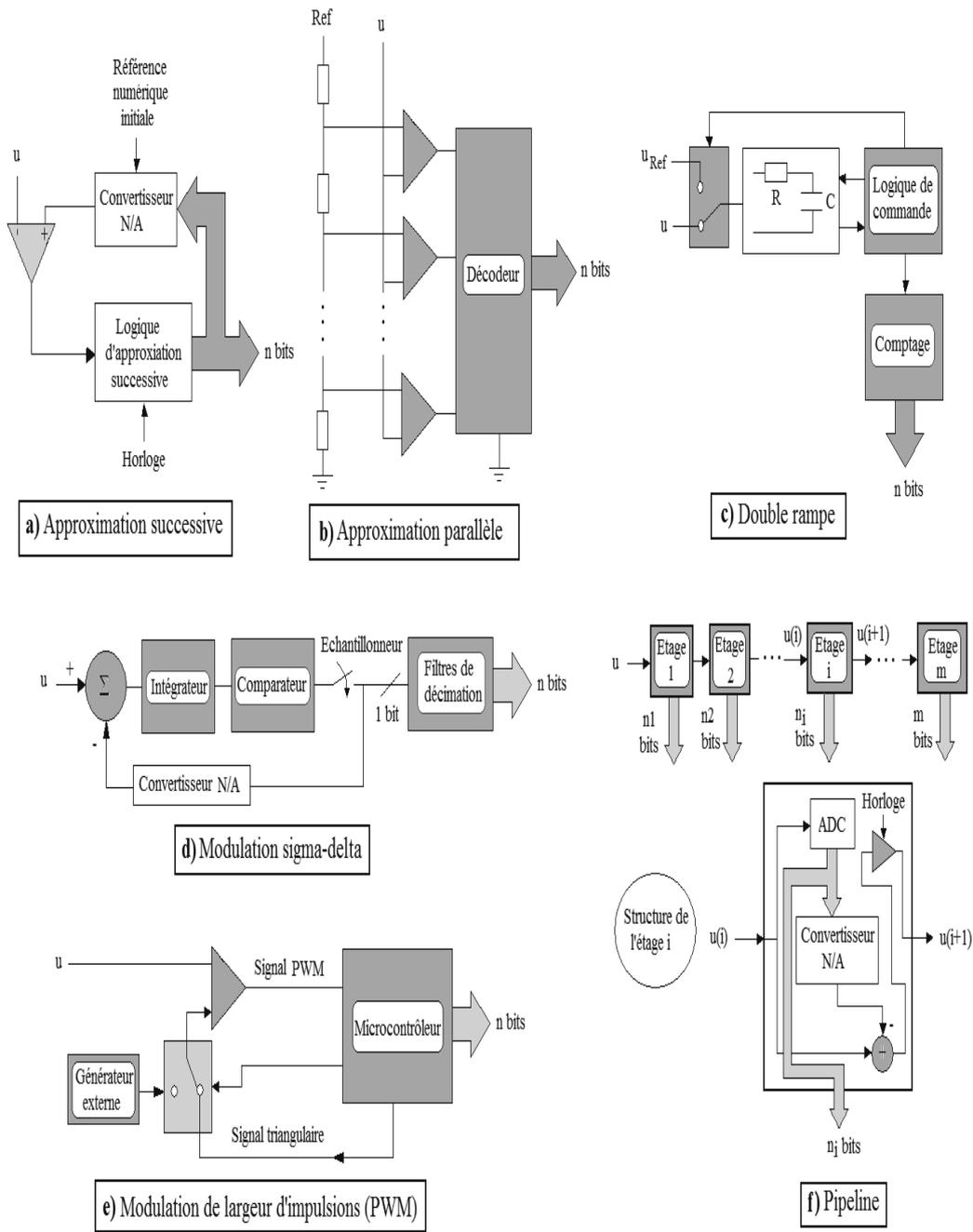


Fig. 2: Schémas synoptiques des techniques de conversion A/N.

Les schémas synoptiques simplifiés des principales techniques de mise en œuvre des CANs, sont représentés à la figure 2. Les techniques de conversion A/N sur n bits présentées sont ([1], [2], [Int 1]):

- *approximation successive* (figure 2(a)), basée sur la génération numérique d'un estimé de la tension à mesurer, suivie de la conversion A/N de la valeur estimée, qui est ensuite comparée avec la tension d'entrée à mesurer,
- *approximation parallèle* ou flash (figure 2(b)), fondée sur l'utilisation de $(2^n - 1)$ comparateurs, qui délivrent un code numérique de n bits, à partir de la comparaison de la tension à mesurer avec des références respectives fournies par 2^n résistances,
- *double rampe* (figure 2(c)), qui consiste à mesurer les temps respectifs requis T_u et T_R de charge d'un condensateur à la tension inconnue u , et de décharge du même condensateur avec une tension de référence négative u_R , de sorte qu'on ait
$$\frac{T_R - T_u}{T_u} = 2 \left(\frac{u}{u_R} + 1 \right),$$
- *modulation sigma-delta* (figure 2(d)), consiste à transformer la tension à convertir en un signal digital modulé de 1 bit qui est par la suite échantillonné, puis converti en un format de n bits par un processus de décimation sur n bits implémenté à l'aide des filtres numériques,
- *modulation de largeur d'impulsions* (figure 2(e)), consiste à comparer le signal d'entrée modulant u avec un signal porteur triangulaire de fréquence fixe, ce qui permet de générer un signal de sortie modulé rectangulaire, dont les largeurs d'impulsions sont proportionnelles à u ,
- *pipeline* figure 2(f), utilise m étages de cellules flash de n bits, chaque cellule étant précédée d'un échantillonneur bloqueur.

Le tableau 1 récapitule les principales caractéristiques des techniques de conversion A/N sur n bits présentées ci-dessus.

3. CARACTÉRISATION D'UN CAN DE n BITS

3.1 Caractéristique de transfert

On considère ici le cas d'un CAN intégré de n bits. Le schéma de transfert correspondant est représenté à la figure 3. On y observe les grandeurs V_{cc} (tension d'alimentation), U_{ref}^- et U_{ref}^+ (tensions de référence), u (tension d'entrée à convertir), ainsi que d'un bus de données de n bits et de contrôle.

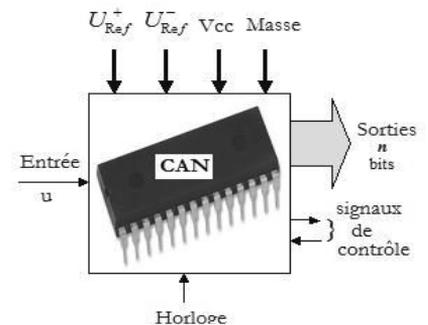


Fig. 3: Schéma de transfert d'un CAN.

Techniques	n (bits)	f (Mhz)	SNR (*) en dB	Signaux de contrôle	Applications	Date
Approximation successive	10-18	0,250 à 0,600	110	Oui	Servomécanismes, mesure de température	1946
Approximation parallèle ou Flash	8-14	0,100 à 1	33	Oui	Vidéo, oscilloscope numérique, radar,	1948
Double rampe	14-16	0,100		Oui	Mesure de température	1957
Sigma-Delta	16-64	1	40 à 140	Oui	Signaux audio, mesure de pression, instruments portables	1962
Pipeline	10-12	300	43 à 70	Oui	Télécommunications, imagerie, instruments portables, vidéo digitale, ultrasons.	1966
Quadruple rampe	8-16			Oui	Mesure de température, mesure de débit	1973
PWM	8-12	0,100		Non	Mesure température, servomécanisme	1991

(*) SNR: Signal-to-Noise Ratio ou Rapport signal/bruit - ordre de grandeur à la fréquence mentionnée.

Tableau 1: Techniques de conversion A/N sur n bits.

Une famille de CANs est caractérisée par les principales grandeurs suivantes:

- u (entrée analogique),
- U_{ref}^- (tension de référence inférieure),
- U_{ref}^+ (tension de référence supérieure),
- V_{cc} (tension d'alimentation),
- la masse,
- le bus de sorties de n bits,
- les signaux de contrôle (démarrage et fin de conversion),
- le signal d'horloge (si la source est externe).

La caractéristique de transfert d'un CAN de n bits, se présente sous forme d'une fonction en escalier, dont les paramètres dépendent de la plage de conversion $[U_{Ref}^- \ U_{Ref}^+]$ ainsi que du système de codage binaire utilisé.

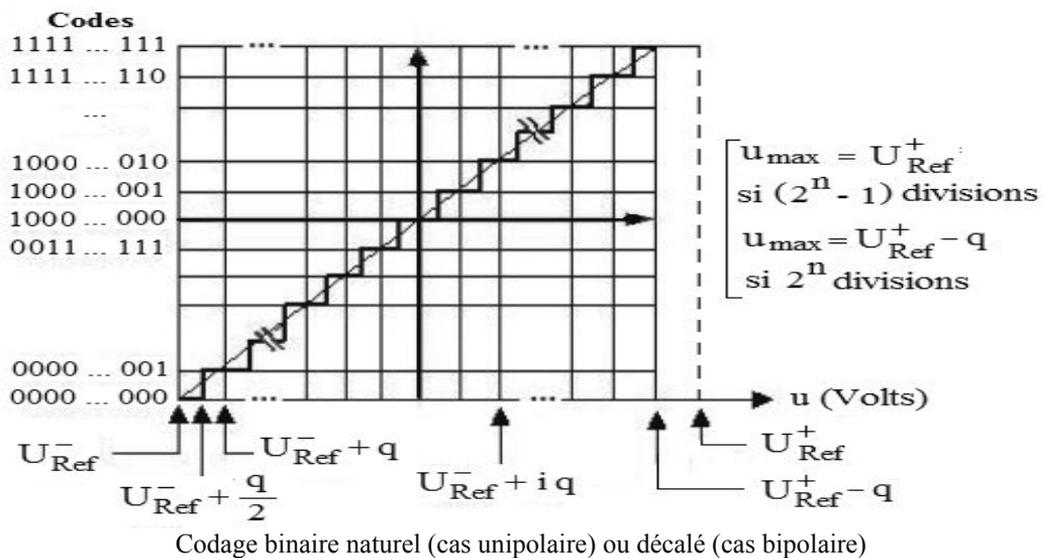


Fig. 4: Caractéristique de transfert d'un CAN de n bits.

La figure 4 présente un exemple de caractéristique d'un CAN dans le cas d'un système de codage *binnaire naturel* (si le CAN est unipolaire), ou *binnaire décalé* (si le CAN est bipolaire).

Dans la plage de conversion $[U_{Ref}^- \ U_{Ref}^+]$ subdivisée en Q valeurs, la valeur q du quantum de mesure est donnée par la relation:

$$q = \frac{U_{Ref}^+ - U_{Ref}^-}{Q} \text{ avec } Q = \begin{cases} 2^n - 1 & \text{si } u_{\max} = U_{Ref}^+ \\ 2^n & \text{si } u_{\max} = U_{Ref}^+ - q \end{cases} \quad (1)$$

Ainsi, la valeur quantifiée d'une tension analogique u dans cette plage vaut:

$$u_q = \frac{u - U_{\text{Ref}}^-}{q} \quad (2)$$

Donc, la valeur N du code binaire de sortie du CAN s'écrit:

$$N = E(u_q) = E\left(\frac{u - U_{\text{Ref}}^-}{q}\right), \text{ soit } (N)_2 = \beta\left(E\left(\frac{u - U_{\text{Ref}}^-}{q}\right)\right) \quad (3)$$

où $E(.)$ désigne le plus proche entier contenu dans l'argument, $\beta(.)$ étant l'opérateur de codage en binaire et q le quantum. Connaissant la valeur entière N lue à l'adresse du registre de données du CAN, la tension à mesurer u peut être reconstituée numériquement par un programme à partir de la relation suivante:

$$u = q N + U_{\text{Ref}}^-, \quad (4)$$

Partant de la relation (4) en tenant compte de (1), on peut conclure que si:

- $N = 0$, on obtient $u_{\min} = U_{\text{Ref}}^-$,
- $N = 1 + 2 + \dots + 2^{n-1} = 2^n - 1$, et $Q = 2^n$, on a $u_{\max} = U_{\text{Ref}}^+ - q$,
- $N = 1 + 2 + \dots + 2^{n-1} = 2^n - 1$, et $Q = 2^n - 1$, on a $u_{\max} = U_{\text{Ref}}^+$.

3.2 PERFORMANCES D'UN CAN de n BITS

Les principales grandeurs de performance de la plupart des CANs de n bits sont: la précision (η), la variance (σ^2) du bruit de quantification supposé uniforme dans $[-q/2 \ q/2]$ et le rapport signal/bruit (ρ). Ces grandeurs sont [2]:

- précision ou *résolution normalisée*,

$$\eta = \frac{q}{U_{\text{ref}}^+ - U_{\text{ref}}^-} = \frac{1}{2^n} \quad (5)$$

- variance du bruit de quantification,

$$\sigma_\varepsilon^2 = \int_{-\frac{q}{2}}^{\frac{q}{2}} \varepsilon^2 f_\varepsilon(\varepsilon) d\varepsilon = \frac{1}{q} \int_{-\frac{q}{2}}^{\frac{q}{2}} \varepsilon^2 f_\varepsilon(\varepsilon) d\varepsilon = \frac{q^2}{12} \quad (6)$$

- rapport signal sur bruit,

$$\rho = 10 \log_{10} \left(\frac{\sigma_u^2}{\sigma_\varepsilon^2} \right) = \underbrace{20 \log_{10}(2)}_{6,02} n + \underbrace{10 \log_{10}(12)}_{10,7918} + 10 \log_{10} \left(\frac{\sigma_u^2}{(U_{\text{ref}}^+ - U_{\text{ref}}^-)^2} \right) \quad (7)$$

3.3 Algorithme de programmation d'un CAN de n bits

L'algorithme de programmation d'un CAN de n bits se présente comme suit:

- a) transmission de l'ordre de démarrage de la conversion,
- b) attente du signal de fin de conversion,
- c) lecture du résultat de la conversion au bus de données du CAN,
- d) calcul de la grandeur physique Φ à mesurer, connaissant les caractéristiques du CAN ainsi que celles des constituants en amont.

4. EXEMPLES DE CANs DE n BITS ET CRITÈRES DE CHOIX

4.1 Exemples de CANs de n bits

Il existe des CANs admettant d'autres profils de caractéristique d'entrée-sortie en escalier (cas du type "*milieu de montée*"), ainsi que d'autres variantes de systèmes de codage (cas du codage binaire *complément à deux*).

En pratique, les données caractéristiques d'un CAN sont disponibles dans le manuel d'utilisation fourni par le constructeur. Quelques exemples de CANs intégrés de n bits sont présentés dans le tableau 2.

CANs	Technologie de mise en œuvre	n (bits)	Temps de conversion	Constructeur
ADC0800	Approximation successive	8	40 ms	National Semiconductor
Max1150	Flash	8	259 ps	Maxim
ADC0816	Double rampe	8	114 ms	National Semiconductor
AD7780	Sigma-delta	24		Analog Device
AD7870	Approximation successive	12	57 ns	Analog Device
AD7550	Quadruple intégration	13	40 ms	Analog Device
THS 1206	Pipeline	12	114 ms	Texas Instrument

Tableau 2 : Exemples de CANs intégrés de n bits.

4.2. CRITÈRES DE CHOIX D'UN CAN DE n BITS

Les critères de choix des CANs de n bits dépendent des exigences spécifiques des domaines d'application considérés. Ces exigences imposent les caractéristiques techniques des CANs à utiliser. Parmi les critères les plus importants, on distingue:

- le domaine d'application,
- le type de boîtier,
- la plage de conversion,
- la résolution,
- le rapport signal/bruit en dB,
- la bande passante,
- le débit pour une fréquence de base fixée,
- les tensions d'alimentation et de référence,
- la puissance consommée.