

CONVERSION analogique/numérique (CAN) et numérique analogique (CNA) des données

1. INTRODUCTION

De nombreux systèmes électroniques utilisent les techniques numériques, à base de microprocesseurs ou de microcontrôleurs.

Les avantages qu'elles présentent par rapport à aux techniques analogiques sont :

- facilité de traitements complexes de l'information (filtrage, compression...),
- mémorisation des informations sur support à faible coût,
- bonne immunité au bruit...

Lorsque les informations issues de capteurs sont des grandeurs analogiques ou que les actionneurs doivent être commandés par des signaux analogiques, il est nécessaire de procéder à des conversions de données :

**Conversion analogique→numérique (CAN) et numérique→analogique (CNA)**

La grandeur physique à convertir peut-être de nature quelconque : vitesse, température, force et le capteur convertit cette grandeur en un signal analogique (dynamo tachymétrique pour le captage de la vitesse, pont de jauges d'extensométrie pour le captage d'une force).

Le convertisseur analogique numérique (CAN) va convertir le signal analogique sous forme de mots numériques qui pourront être interprétés et traités par le calculateur (microprocesseur).

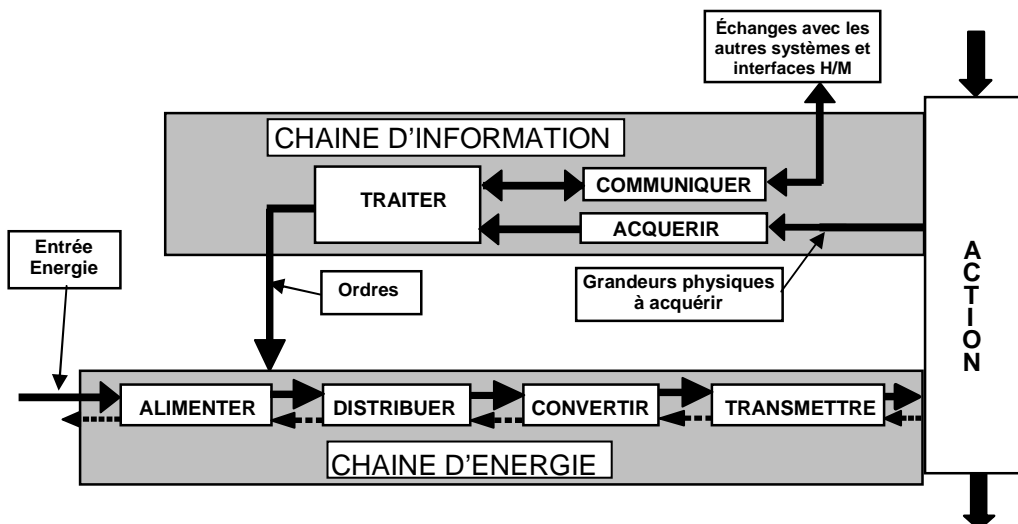
De même, le calculateur pourra générer en entrée du CNA des mots numériques qui seront convertis en un signal analogique par le CNA (convertisseur Numérique Analogique).

**Exemple de chaîne de traitement numérique pour le signal audio** (enregistrement et restitution MP3, pédalier multi effets pour guitare...).

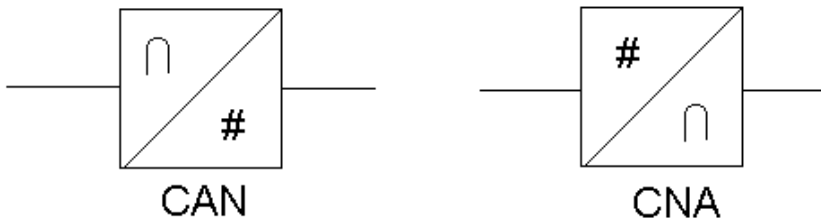


- **Passage analogique numérique** : (vibrations acoustiques → microphone → CAN → compression numérique → enregistrement en mémoire ou sur disque dur).
- **Passage numérique analogique** : (lecture des fichiers numériques stockés → filtrage numérique → CNA → amplification → écouteurs ou baffles → vibrations acoustiques).

Situer sur le synoptique ci-dessous les différentes conversions CAN ou CNA envisageables.



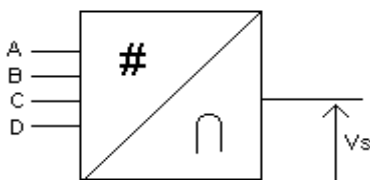
**2. SYMBOLISATION et EXEMPLES DE CONVERTISSEURS**



<p><b>Exemples de convertisseurs CAN :</b>                  CAN flash                  CAN à simple rampe                  CAN à double rampe                  CAN à approximations successives</p>	<p><b>Exemples de convertisseurs CNA :</b>                  CNA à réseau de résistances pondérée                  CNA à échelle de résistances R-2R</p>
---	---

**3. Principe général de la conversion numérique analogique ou CNA :**

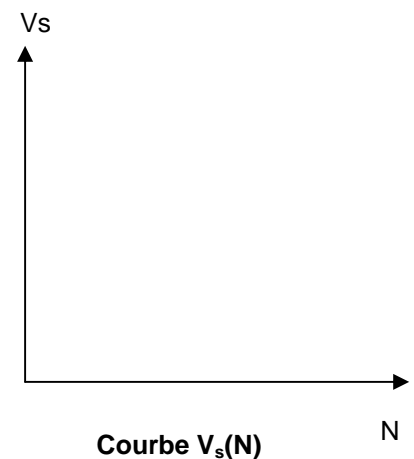
**Exemple 1 :** Convertisseur numérique - analogique 4 bits.



Si le signal numérique en entrée est composé de 4 bits (mot de 4 bits) ; il existe  $2^4 = 16$  nombres binaires distincts. Pour chacun de ces nombres, la tension de sortie  $V_s$  est différente. La plage de tension de sortie  $V_s$  est comprise entre 0 et 8 V.

D	C	B	A	N	$V_s$

Quand le mot en entrée est à 1111 la tension de sortie du CNA est maximale.  
 Sortie analogique =  $q \times$  valeur de l'entrée numérique  
 $V_s = q \times N$   
 La quantité **q quantum**, représente la plus petite variation de la tension de sortie obtenu pour un incrément de l'entrée numérique **N**.  
**Calculer le quantum q :**  
**Compléter le tableau et Tracer l'allure de la courbe  $V_s(N)$**



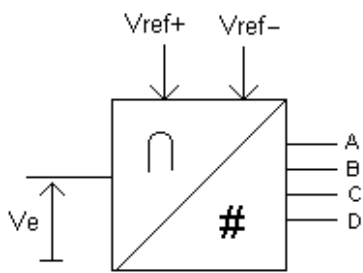
**Exemple 2 :** CNA 8 bits, quantum et résolution, MSB, LSB.

Sachant que  $V_{smax} = 10V$  et  $V_{smin} = 0V$  pour un CNA de 8 bits, définir la valeur de  $q$  et calculer la tension en sortie, pour les octets d'entrée 10010001 puis 00010110.

Préciser ce que signifie LSB et MSB et donner pour ce convertisseur les tensions  $V_{sLSB}$  et  $V_{sMSB}$  correspondantes.

**Exemple 3 : Convertisseur analogique numérique CAN**

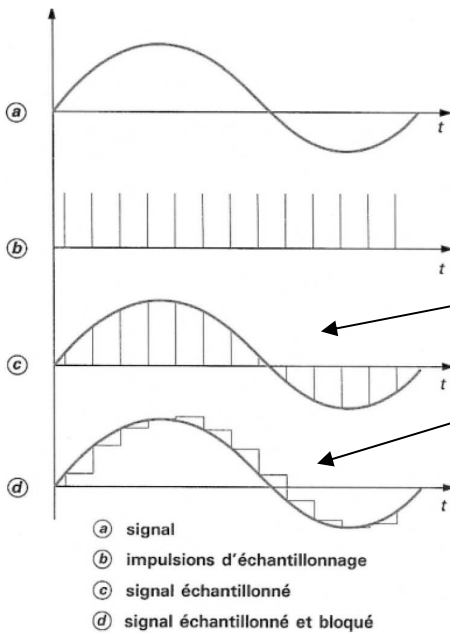
Un convertisseur analogique / numérique (CAN) est un circuit hybride qui transforme une grandeur analogique d'entrée  $V_e$  (souvent une tension) en une valeur numérique  $N$  exprimée sur  $n$  bits.



Exemple de CAN 4 bits :  $V_{ref+}$  et  $V_{ref-}$  représentent les tensions de références du convertisseur. Elles permettent de fixer les amplitudes maximales et minimales de la grandeur d'entrée à convertir.

L'opération de conversion se déroule en 2 étapes : LA QUANTIFICATION puis LE CODAGE

La **quantification** consiste à prélever à divers instants ( $t_1, t_2, t_3 \dots$ ) la valeur de la tension  $V_e$  : c'est ce qu'on appelle aussi **l'échantillonnage ou discrétisation** de  $V_e$  (le signal continu  $V_e$  est réduit en un nombre fini de valeurs).



Le **codage** consiste à faire correspondre à ces échantillons (les diverses valeurs de  $V_e$  prélevées aux temps  $t_1, t_2, t_3 \dots$ ) un mot binaire, en respectant une logique précise.

La figure ci-contre illustre le problème de l'échantillonnage d'une grandeur analogique et de sa valeur numérique convertie en tension.

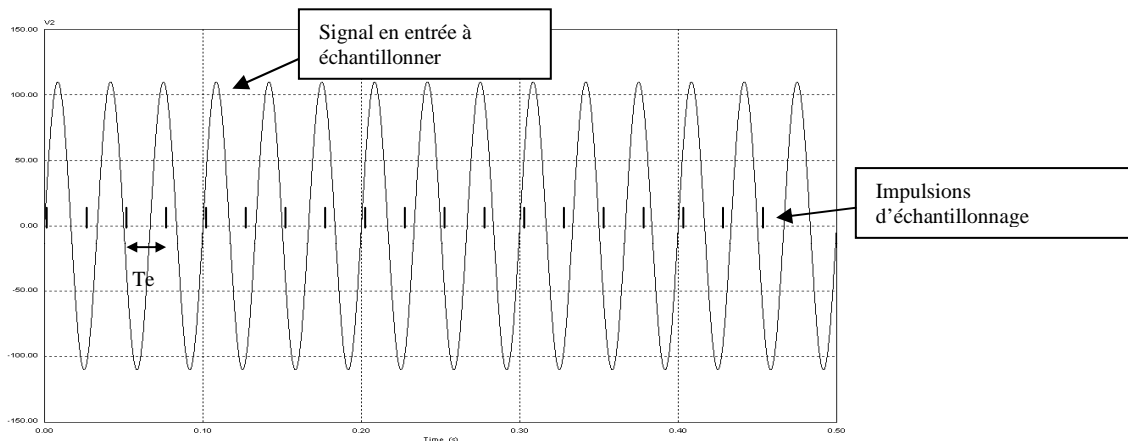
L'horloge interne du CAN prélève des échantillons tous les instants  $n.T_e$  ( $T_e$  étant la période d'échantillonnage).

Cette valeur sous sa forme analogique est bloquée (**fonction échantillonneur bloqueur**) de façon à permettre la conversion numérique.

La période d'échantillonnage  $T_e$  est donc une caractéristique essentielle de ce type de convertisseur.

Pour montrer son importance nous allons envisager la situation suivante.

**A partir du graphe ci-dessous, esquisser l'allure du signal échantillonné et bloqué et commenter l'allure de ce signal sur sa fréquence apparente.**



Si la fréquence du signal échantillonné est inférieure à celle du signal réel, on dit qu'il y a « **repliement du spectre** ».

On vient de montrer que pour échantillonner correctement un signal d'entrée de fréquence  $F$ , il faut que la fréquence d'échantillonnage  $F_e = 1 / T_e$  soit plus grande que  $F$ .

A la limite un coefficient  $F_e / F = 2$  est retenu, il s'agit du **théorème de Shannon**.

**Tableau clés des CAN et CNA (extrait des techniques de l'ingénieur)**

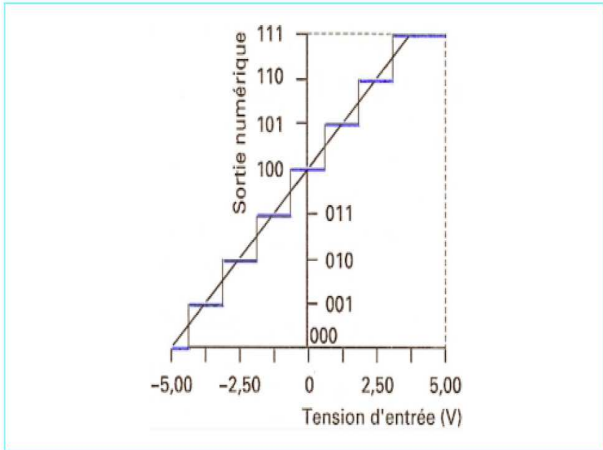


Figure 13 - Caractéristique de transfert d'un CAN bipolaire 3 bits

Tableau 1 – Résolution, nombre d'états, poids du LSB et dynamique des CAN et CNA			
Résolution $n$ (bits)	Nombre d'états $2^n$	Poids du LSB $2^{-n}$	Dynamique (dB)
0	1	1	0
1	2	0,5	6
2	4	0,25	12
3	8	0,125	18,1
4	16	0,062 5	24,1
5	32	0,031 25	30,1
6	64	0,015 625	36,1
7	128	0,007 812 5	42,1
8	256	0,003 906 25	48,2
9	512	0,001 953 125	54,2
10	1 024	0,000 976 562 5	60,2
11	2 048	0,000 488 281 25	66,2
12	4 096	0,000 244 140 625	72,2
13	8 192	0,000 122 070 312 5	78,3
14	16 384	0,000 061 035 156 25	84,3
15	32 768	0,000 030 517 578 125	90,3
16	65 536	0,000 015 258 789 062 5	96,3
17	131 072	0,000 007 629 394 531 25	102,3
18	262 144	0,000 003 814 697 265 625	108,4
19	524 288	0,000 001 907 348 632 812 5	114,4
20	1 048 576	0,000 000 953 674 316 640 625	120,4

Tableau 2 – Codes binaires pour des convertisseurs 8 bits unipolaires			
Fraction de la pleine échelle PE	Valeurs correspondantes pour une pleine échelle de 10 V (V)	Binaire naturel	Binaire complété
+ PE – 1 LSB	+ 9,961	1111 1111	0000 0000
+ 3/4 PE	+ 7,500	1100 0000	0011 1111
+ 1/2 PE	+ 5,000	1000 0000	0111 1111
+ 1/4 PE	+ 2,500	0100 0000	1011 1111
+ 1/8 PE	+ 1,250	0010 0000	1101 1111
+ 1 LSB	+ 0,039	0000 0001	1111 1110
0	0,000	0000 0000	1111 1111

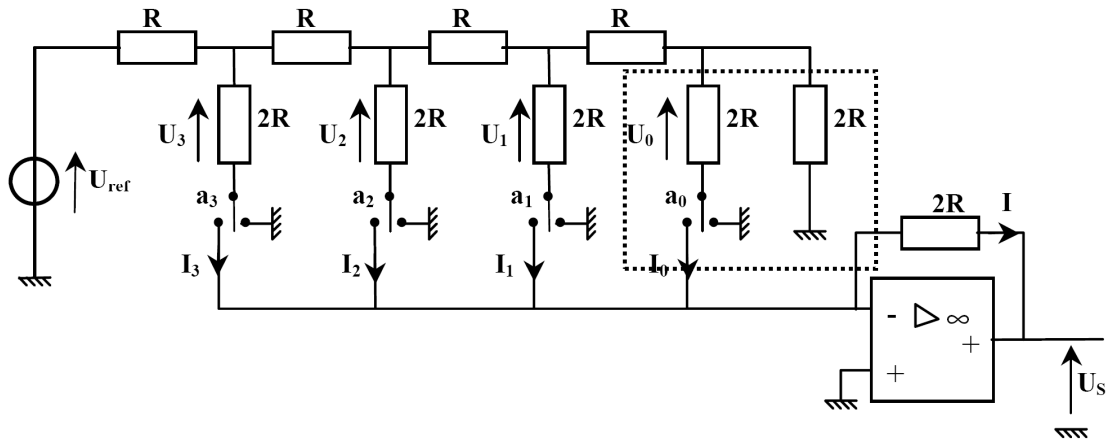
Tableau 3 – Codes binaires usuels en conversion de données					
Fraction de la pleine échelle PE	Valeurs correspondantes pour une pleine échelle de 10 V (-5 à +5 V) (V)	Binaire décalé	Binaire décalé complété	Complément à 2	Binaire signe (1)
+ $\frac{PE}{2}$ – 1LSB	+ 4,997 6	1111 1111	0000 0000	0111 1111	1111 1111
+ $\frac{3}{4} \frac{PE}{2}$	+ 3,750 0	1110 0000	0001 1111	0110 0000	1110 0000
+ $\frac{1}{2} \frac{PE}{2}$	+ 2,500 0	1100 0000	0011 1111	0100 0000	1100 0000
+ $\frac{1}{4} \frac{PE}{2}$	+ 1,250 0	1010 0000	0101 1111	0010 0000	1010 0000
0	0,000 0	1000 0000	0111 1111	0000 0000	1000 0000
- $\frac{1}{4} \frac{PE}{2}$	- 1,250 0	0110 0000	1001 1111	1110 0000	0010 0000
- $\frac{1}{2} \frac{PE}{2}$	- 2,500 0	0100 0000	1011 1111	1100 0000	0100 0000
- $\frac{3}{4} \frac{PE}{2}$	- 3,750 0	0010 0000	1101 1111	1010 0000	0110 0000
- $\frac{PE}{2}$ + 1LSB	- 4,997 6	0000 0001	1111 1110	1000 0001	0111 1111
- $\frac{PE}{2}$	- 5,000 0	0000 0000	1111 1111	1000 0000	

(1) En binaire signe il y a deux codes pour représenter zéro : 0<sup>+</sup> : 1000 0000 0000  
0<sup>-</sup> : 0000 0000 0000

**3 EXEMPLES DE REALISATION TECHNOLOGIQUE DES CNA /CAN :**

**3.1. CNA à réseau R-2R à sortie en tension :**

■ Schéma pour n = 4 :

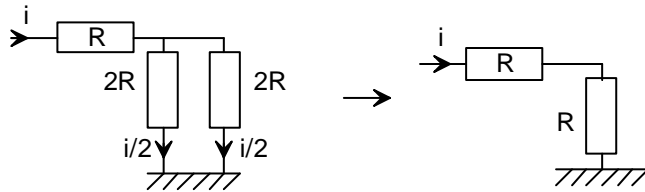


L'interrupteur  $a_i$  à la masse fixe un 0 logique, le cas contraire fixe un 1 logique.

Ce type de montage utilise une propriété de récurrence que l'on peut mettre en évidence à partir des 2 résistances les plus à droite (dans le cadre en pointillés).

On remarque tout d'abord que quelle que soit la position de l'interrupteur  $a_i$ , le point inférieur est relié à la masse : masse réelle à droite ou masse virtuelle à gauche grâce à la contre réaction de l'A.Op.

Les 2 résistances dans le cadre sont donc toujours en parallèle et la résistance équivalente est R, soit le schéma :



On peut ainsi de proche en proche établir que la résistance vue de la source de tension  $U_{ref}$  est égale à  $2R$ .

Le courant sortant de cette source est  $I_{ref} = U_{ref} / 2.R$  et il se partage en deux pour donner  $I_3 = I_{ref} / 2$ .

Exprimer les différents courants  $I_i$  en fonction de  $I_{ref}$  et de  $a_i$  correspondant.

Exprimer  $I$  en sortie en fonction des  $a_i$ ,  $I_{ref}$  et des  $a_i$ .

Déduire finalement la relation entre les  $a_i$ ,  $U_{ref}$  et  $U_s$ .

Donner la valeur et le signe de  $U_{ref}$  pour obtenir  $U_s = 10V$  à pleine échelle.

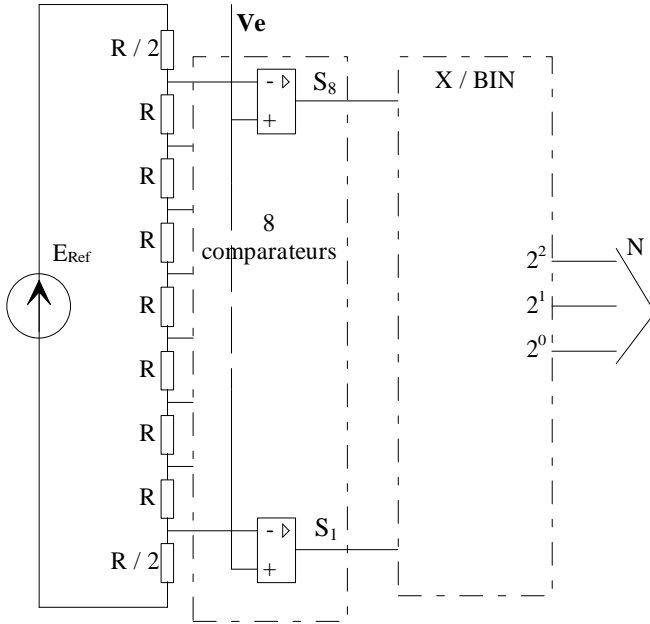
Pour ce montage, les résistances ont les mêmes valeurs ( $R$  ou  $2R$ ) ce qui est facile à obtenir en microélectronique.

**3.2. CAN de type flash :**

Dans un convertisseur flash, toutes les conversions sont obtenues simultanément en utilisant autant de comparateurs qu'il y a de tensions à comparer. On dispose ainsi de N informations binaires dont l'état est caractéristique de la grandeur à convertir. Un transcodeur permet ensuite de restituer la valeur en code binaire naturel pondéré.

Le convertisseur flash est très rapide, c'est un système combinatoire fonctionnant à la vitesse des composants eux-mêmes, mais il est très coûteux car il nécessite autant de convertisseurs que de tensions possibles ( $2^n$ , pour une conversion sur n bits). On l'utilise lorsque les variations de la grandeur analogique sont rapidement variable et que le temps de conversion doit être le plus court possible (ex : oscilloscopes numériques, 1 cycle unique de comparaison).

Convertisseur flash 3 bits



**3.2.1 Etablir le tableau de vérité entre X et N<sub>2</sub>.**

Pour le remplir, penser que le potentiel  $V_e$  augmente progressivement de 0V à  $E_{Ref}$ .

X (état de sortie des 7 comparateurs repérés de bas en haut)							Etats des bits de sortie		
S <sub>7</sub>	S <sub>6</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>1</sub>	2 <sup>2</sup>	2 <sup>1</sup>	2 <sup>0</sup>

**3.2.2** Pour le convertisseur flash ci-dessus  $E_{ref} = 5V$ .

Déterminer les potentiels de basculement des différents comparateurs S<sub>1</sub> à S<sub>8</sub>.

Représenter la caractéristique de transfert  $N = f(V_e)$

**3.3.3** Pour  $V_e = 3,3V$ , donner le code X en sortie des comparateurs et la sortie N<sub>2</sub> binaire correspondante.