

Chapitre V

Les convertisseurs CAN, CNA

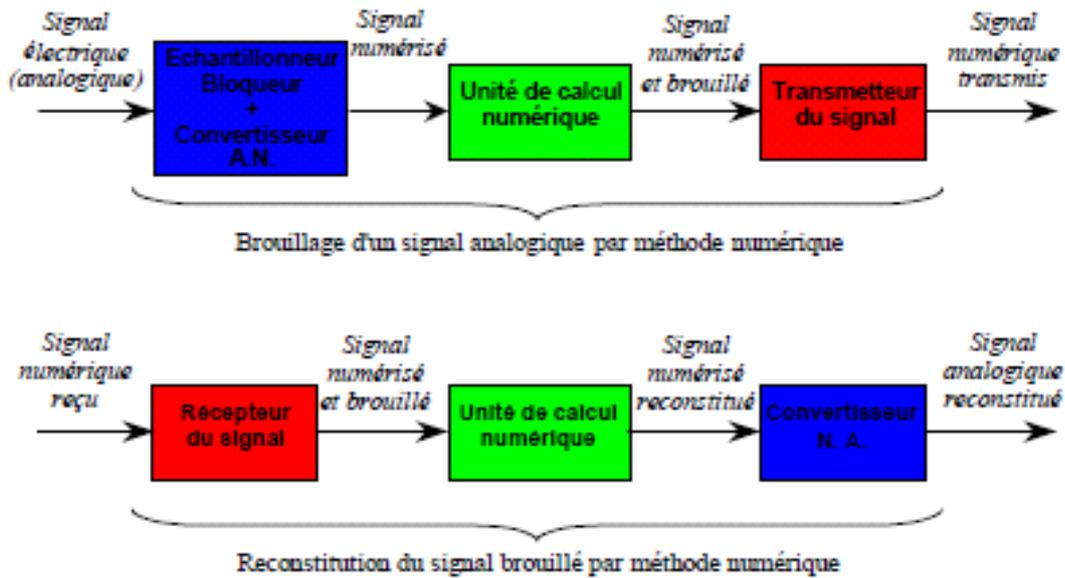
ECHANTILLONNAGE ET CONVERSION DU SIGNAL

I- GÉNÉRALITÉS :

Les traitements modernes des signaux sont le plus souvent numériques.

Il faut donc transformer les grandeurs analogiques en grandeurs numériques et inversement.

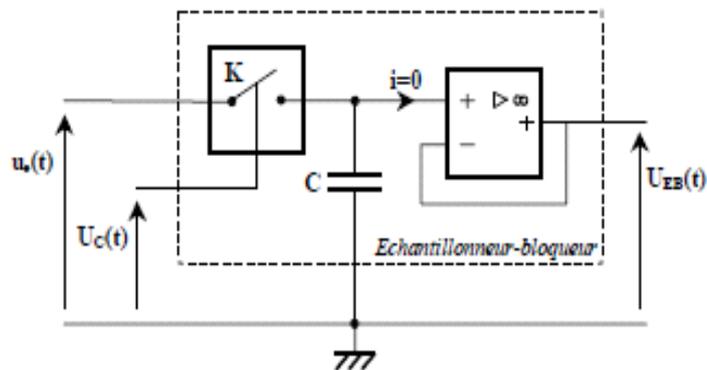
Exemple : Brouillage et restitution d'un signal par méthode numérique (schéma ci-dessous)



II- ÉCHANTILLONNAGE

1- L'échantillonneur bloqueur

a) Schéma :



b) Principe de fonctionnement :

- Phase d'échantillonnage

L'échantillonnage consiste à prélever périodiquement la valeur de la tension $U_e(t)$.

Cette opération non linéaire est réalisée en utilisant un interrupteur électronique **K** commandé au rythme d'un signal d'horloge $U_C(t)$ dont la période T_E : est la période d'échantillonnage.

- Phase de maintien

A l'instant kT_E , le condensateur C se charge avec la tension $U_e(kT_E)$.

Entre les instants kT_E et $(k+1)T_E$, le condensateur ne se décharge pas ($i = 0$) et maintient constante la tension ($U_{EB}(t) = U_e(kT_E)$).

La présence de l'amplificateur suiveur permet d'avoir $i = 0$.

A l'instant $(k+1)T_E$, le condensateur C se charge avec la tension $U_e. [(k+1)T_E]$.

Le signal $U_{EB}(t)$ est appelé **signal échantillonné bloqué**.

- Conversion

A l'entrée du convertisseur analogique-numérique, la tension échantillonnée bloquée est maintenue constante pendant la période d'échantillonnage T_E .

La conversion est possible dans la mesure où le temps de conversion T_c est inférieur à T_E .

L'évolution des signaux est représentée à la figure 51 :

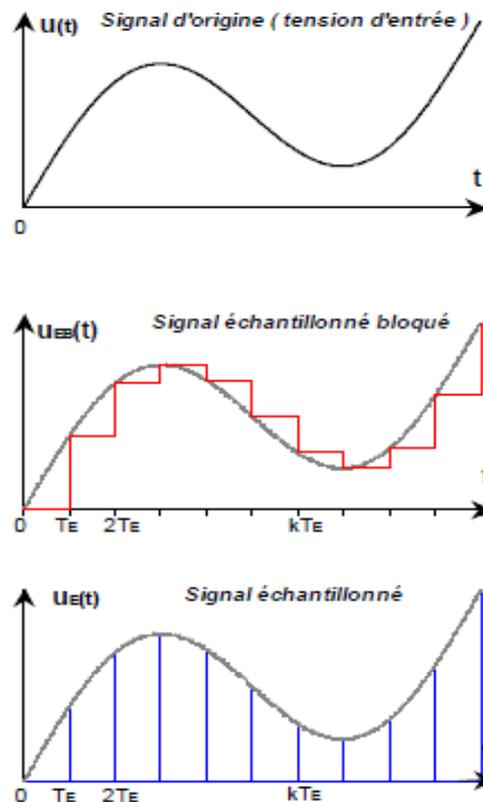


Figure 51- Conversion analogique numérique

Remarque : Le signal échantillonné $U_E(t)$ est un signal théorique qui ne représente que les valeurs aux instants d'échantillonnage.

2- Fréquence d'échantillonnage

La valeur maximale de la fréquence d'échantillonnage F_E ($F_E = 1/T_E$) dépend surtout de la rapidité de conversion du CAN.

La valeur minimale de F_E dépend du signal u_e à échantillonner.

Théorème de Shannon

La reconstitution d'un signal analogique $U(t)$ à partir d'échantillons prélevés à la fréquence F_{max} n'est possible que si F_E est au moins deux fois supérieure à la plus grande fréquence F_{max} contenue dans le signal.

$$F_E \geq 2 F_{max}$$

Application :

Dans la pratique, la règle de Shannon a donné les choix suivants :

- Téléphonie : $F_{max} = 3kHz$ et $F_E = 8kHz$.

Chaque échantillon est codé sur 8 bits ce qui donne un débit de $8 \times 8000 = 64 \text{ kbits/s}$

- Son hi-fi : $F_{max} = 20kHz$ et $F_E = 44,1kHz$

Chaque échantillon pour une voie (stéréo) est codé sur 16 bits ce qui donne un débit de $16 \times 2 \times 44100 = 1,41 \text{ Mbits/s}$.

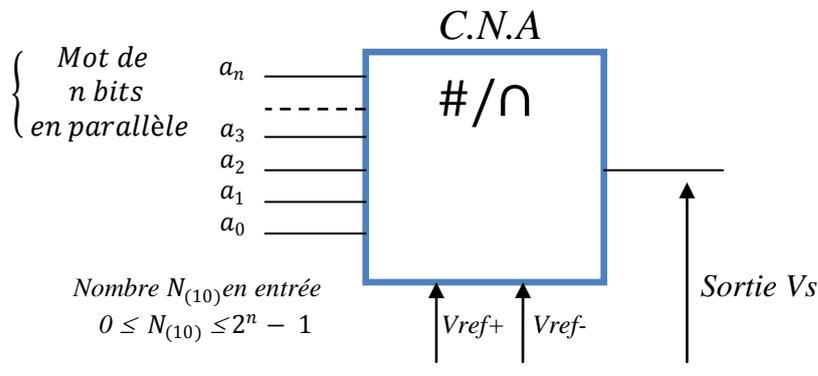
III- CONVERSION NUMÉRIQUE-ANALOGIQUE

1- Définition

Un convertisseur numérique-analogique ou CNA est chargé de transformer une grandeur numérique représentée par un nombre N en une tension proportionnelle V_s de sortie.

Sur la Figure 3, le symbole # marque le signal numérique et le \cap une grandeur analogique.

Un convertisseur numérique analogique (CNA) reçoit une information numérique (mot de n bits) et le transforme en un niveau analogique (tension ou courant).



Acquisition et Conditionnement du signal figure53- CNA

2- Relation entre V_s et $N_{(10)}$

Il est nécessaire de connaître la plage de tension utilisée par le CNA; cette plage est définie par les deux tensions V_{ref+} et V_{ref-} :

- Pour le nombre $N_{(10)} = 0$ en entrée, V_s sera minimale ($V_s = V_{ref-}$),
- Pour le nombre $N_{(10)} = 2^n$ en entrée, V_s sera maximale ($V_s = V_{ref+}$).

Remarque : le nombre maximal en entrée est $N_{max} = 2^n - 1$ on ne pourra donc pas avoir $V_{max} = V_{ref+}$

- La relation reliant V à $N_{(10)}$ est donc la suivante :

$$V_s = V_{ref-} + \frac{V_{ref+} - V_{ref-}}{2^n} \cdot N_{(10)} = V_{ref-} + Q \cdot N_{(10)} \text{ Avec :}$$

$$Q = \frac{V_{ref+} - V_{ref-}}{2^n}$$

Q est le quantum du convertisseur (plus petite variation de tension en sortie).

- La tension maximale en sortie est donc :

$$V_{smax} = V_{ref-} + \frac{V_{ref+} - V_{ref-}}{2^n} \cdot (2^n - 1) = V_{ref-} + (V_{ref+} - V_{ref-}) - \frac{V_{ref+} - V_{ref-}}{2^n}$$

$$\text{Soit: } V_{smax} = V_{ref+} - Q$$

3- Définitions

- *quantum* Q : résolution analogique (plus petite variation de tension en sortie).
- $\frac{1}{2^n}$: résolution numérique.

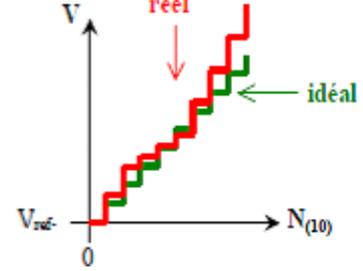
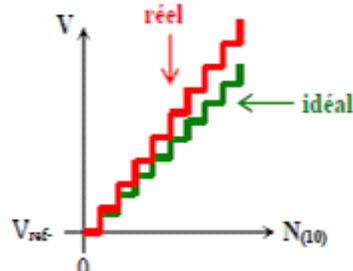
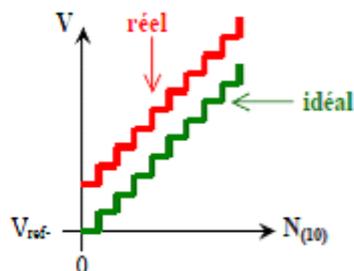
4- Caractéristique des CNA réels

- Temps de conversion : le temps de conversion est limité par la vitesse de commutation des interrupteurs électroniques. Ce temps limite la *fréquence d'échantillonnage*.

*Erreur de décalage :

* Erreur de gain :

* Erreur de linéarité :



5- Exemples de CNA

a) CNA à résistances pondérées :

Schéma pour $n = 4$:

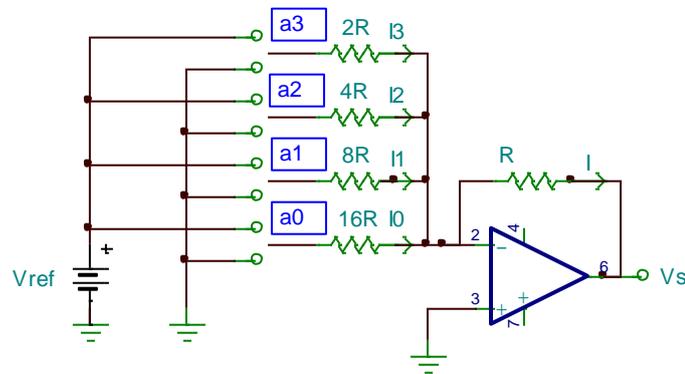


Figure 54- CNA à 4 bits

$(a_0 a_1 a_2 a_3)_2$ représente **le mot binaire** à l'entrée du convertisseur.

$N_{(10)} = a_3 + a_2 + a_1 + a_0 = 8a_3 + 4a_2 + 2a_1 + a_0$ est **le nombre décimal**.

Si le bit a_i est égal à 0 alors l'interrupteur est relié à la masse.

Si le bit a_i est égal à 1 alors l'interrupteur est relié à V_{ref} .

Relation $V_s = f(N_{(10)})$

$$I = I_3 + I_2 + I_1 + I_0 = a_3 \frac{V_{ref}}{2R} + a_2 \frac{V_{ref}}{4R} + a_1 \frac{V_{ref}}{8R} + a_0 \frac{V_{ref}}{16R}$$

$$V_s = -RI = -\frac{V_{ref}}{16} (8a_3 + 4a_2 + 2a_1 + a_0)$$

$$V_s = Q \cdot N_{(10)} \text{ avec } Q = -\frac{V_{ref}}{16}$$

Remarque :

- La relation générale des CNA est vérifiée avec $V_{ref-} = 0$; $V_{ref+} = V_{ref}$ et $Q < 0$.
- L'inconvénient de ce type de convertisseur est la difficulté à fabriquer des résistances pondérées précises.

b) CNA à réseau R-2R avec sortie en tension :

Schéma pour $n = 4$

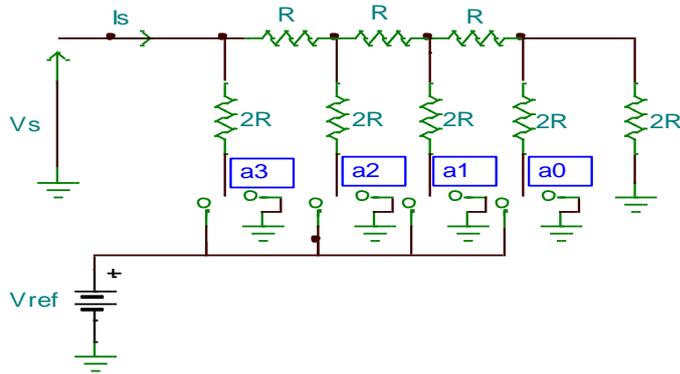


Figure 55- CNA à réseau R-2R avec sortie en tension

$(a_0 a_1 a_2 a_3)_2$ représente le mot binaire à l'entrée du convertisseur.

$N_{(10)} = a_3 + a_2 + a_1 + a_0 = 8a_3 + 4a_2 + 2a_1 + a_0$ est le nombre décimal.

Si le bit a_i est égal à 0 alors l'interrupteur est relié à la masse.

Si le bit a_i est égal à 1 alors l'interrupteur est relié à V_{ref} .

Relation $V_s = f(N_{(10)})$:

$$V_s = V_{ref} \left(\frac{a_3}{2} + \frac{a_2}{4} + \frac{a_1}{8} + \frac{a_0}{16} \right) = \frac{V_{ref}}{16} (8a_3 + 4a_2 + 2a_1 + a_0)$$

$$\text{Donc : } V_s = Q \cdot N_{(10)} \text{ avec } Q = \frac{V_{ref}}{16}$$

Remarque :

- La relation générale des CNA est vérifiée avec $V_{ref}^- = 0$; $V_{ref}^+ = V_{ref}$ et $Q > 0$.
- L'inconvénient de ce type de convertisseur est l'existence de régimes transitoires de durées non négligeables (commutation de tension pour les interrupteurs).

c) CNA à réseau R-2R avec sortie en courant :

Schéma pour $n = 4$:

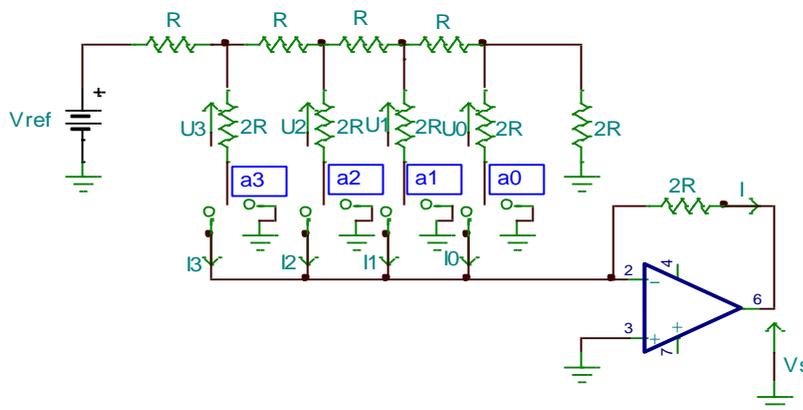


Figure 56- CNA à réseau R-2R avec sortie en courant

Le fonctionnement des interrupteurs est identique aux deux CNA déjà étudiés.

$(a_0 a_1 a_2 a_3)_2$ représente le mot binaire à l'entrée du convertisseur.

$N_{(10)} = a_3 + a_2 + a_1 + a_0 = 8 a_3 + 4 a_2 + 2 a_1 + a_0$ est le nombre décimal.

Si le bit a_i est égal à 0 alors l'interrupteur est relié à la masse.

Si le bit a_i est égal à 1 alors l'interrupteur est relié à V_{ref} .

Relation $US = f(N_{(10)})$:

$$\text{On a } I = a_3 \frac{V_{ref}/2}{2R} + a_2 \frac{V_{ref}/4}{2R} + a_1 \frac{V_{ref}/8}{2R} + a_0 \frac{V_{ref}/16}{2R}$$

$$\text{Et } V_s = -2R.I = V_{ref} \left(\frac{a_3}{2} + \frac{a_2}{4} + \frac{a_1}{8} + \frac{a_0}{16} \right) = -\frac{V_{ref}}{16} (8a_3 + 4a_2 + 2a_1 + a_0)$$

$$\text{Donc : } V_s = Q \cdot N_{(10)} \quad \text{avec } Q = -\frac{V_{ref}}{16}$$

Remarque :

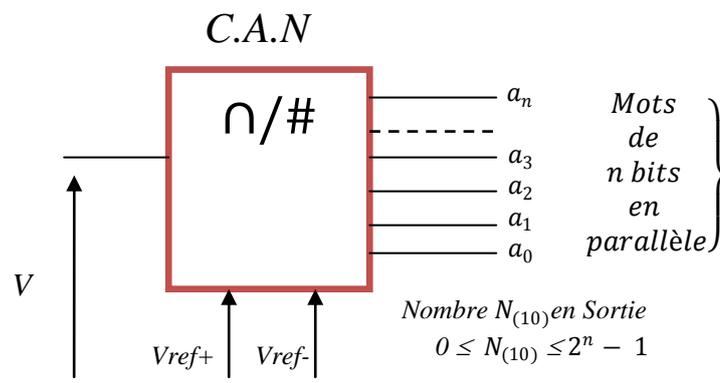
- La relation générale des CNA est vérifiée avec $V_{ref-} = 0$; $V_{ref+} = V_{ref}$ et $Q < 0$.
- Les courants dans les résistances sont constants.
- Les interrupteurs commutent des courants (peu de régime transitoire).

II- CONVERSION ANALOGIQUE-NUMÉRIQUE

1- Définition

Un convertisseur analogique numérique (CAN) reçoit une information analogique (tension ou courant) et la transforme en un code de sortie numérique (mot de n bits).

Schéma :



2- Relation entre V et $N_{(10)}$:

Il est nécessaire de connaître la plage de tension convertie en entrée du CAN; cette plage est définie par les deux tensions V_{ref+} et V_{ref-} :

- pour la tension V minimale ($V = V_{ref-}$), le nombre en sortie sera $N_{(10)} = 0$,
- pour la tension V maximale ($V = V_{ref+}$), le nombre en sortie sera $N_{(10)} = 2^n$,

Remarque : le nombre maximal en sortie est $N_{max} = 2^n - 1$ on ne pourra donc pas convertir une tension égale à V_{ref+} .

La relation reliant V à $N_{(10)}$ est identique à celle du CAN :

$$V = V_{ref-} + \frac{V_{ref+} - V_{ref-}}{2^n} \cdot N_{(10)} = V_{ref-} + Q \cdot N_{(10)}$$

Exprimons plutôt $N_{(10)}$ en fonction de V :

$$Q = \frac{V_{ref+} - V_{ref-}}{2^n}$$

$$\text{Avec } N_{(10)} = \frac{V - V_{ref-}}{Q}$$

Q est le quantum du convertisseur (plus petite variation de tension en sortie).

La tension maximale en entrée est donc :

$$V_{max} = V_{ref-} + \frac{V_{ref+} - V_{ref-}}{2^n} \cdot (2^n - 1) = V_{ref-} + (V_{ref+} - V_{ref-}) - \frac{V_{ref+} - V_{ref-}}{2^n}$$

$$\text{Soit: } V_{max} = V_{ref+} - Q$$

3- Définitions

Quantum Q : Résolution analogique (plus petite variation de tension mesurable en entrée).

$\frac{1}{2^n}$: Résolution numérique.

4- Caractéristique des CAN réels

Le temps de conversion d'un CAN est généralement plus long que pour un CNA car la conversion utilise des opérations de comptage.

Les défauts d'un CAN réel sont de mêmes types que ceux d'un CNA :

- Erreur de décalage - Erreur de linéarité - Erreur de gain.

5- Exemples de CAN

a) CAN à simple rampe :

Schéma :

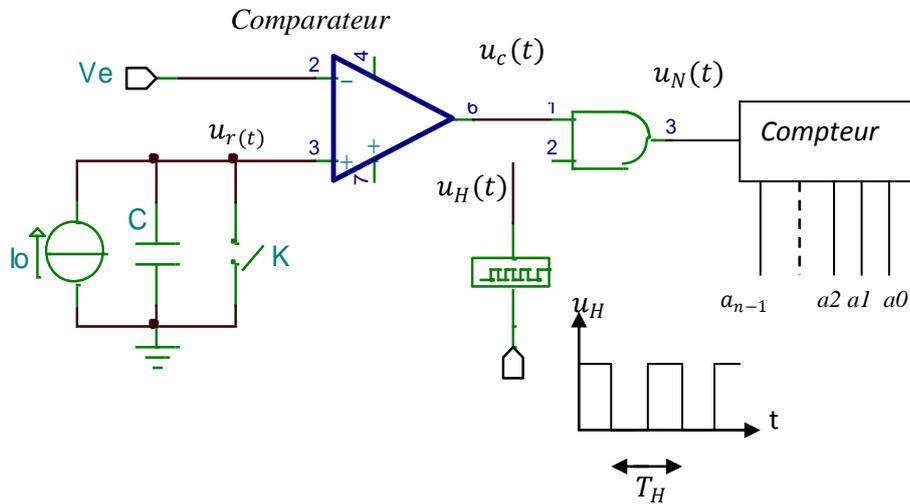


Figure 58- CAN à simple rampe

Principe de fonctionnement :

La tension Ve à convertir est comparée à une rampe de tension $u_r(t)$ (charge d'un condensateur à courant constant I_0).

Tant que $Ve > u_r(t)$, le compteur binaire s'incrémente.

Dès que $Ve = u_r(t)$, le compteur s'arrête et son contenu est :

$$N_{(10)} = K \cdot Ve \quad \text{avec } K = \frac{C}{I_0 \cdot T_H}$$

Limitation : La précision dépend de la valeur de C_0 et de la stabilité du signal d'horloge $u_H(t)$.

On peut améliorer la précision en réalisant un convertisseur à double rampe.

b) CAN à comparaison directe :

Schéma :

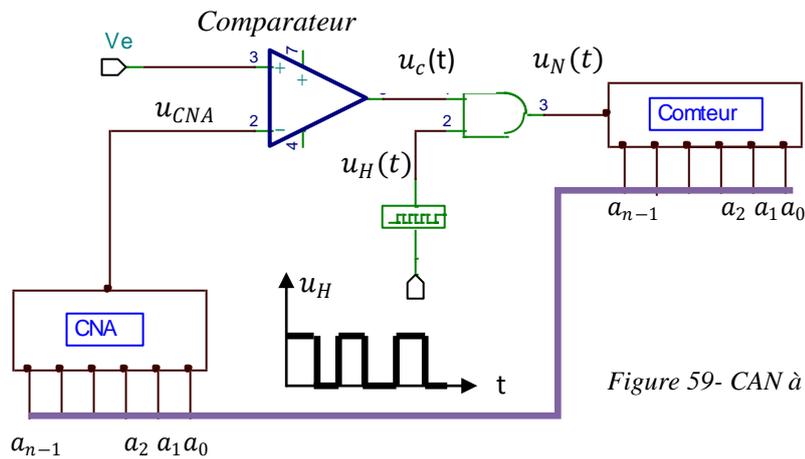


Figure 59- CAN à comparaison directe

Principe de fonctionnement :

La tension u_e à convertir est comparée à une rampe "numérique" tension $u_{CNA}(t)$ (tension de sortie du CNA dont l'entrée est la sortie du compteur).

Tant que $V_e > u_{CNA}$, le compteur binaire s'incrémente.

Dès que $V_e = u_{CNA}$, le compteur s'arrête et son contenu est :

(q_{CNA} = quantum du CNA).

$$N_{(10)} = K \cdot V_e \quad \text{avec } K = \frac{C}{q_{CNA}}$$

Limitations : Comme pour le CAN à rampe, le temps de conversion est long.

La précision dépend de celle du CNA utilisé pour produire u_{CNA} .

c) CAN à comparateur en échelle (flash)

Le montage comporte un ensemble de comparateurs.

Les entrées "+" sont reliées entre elles et on leur applique la tension V_e à convertir.

Une tension de référence V_{ref} est divisée par un réseau de résistances R et les fractions de V_{ref} sont appliquées aux entrées "-" des comparateurs.

Enfin, un circuit de logique combinatoire délivre le nombre $N_{(2)}$ à partir des sorties des comparateurs.

Schéma :

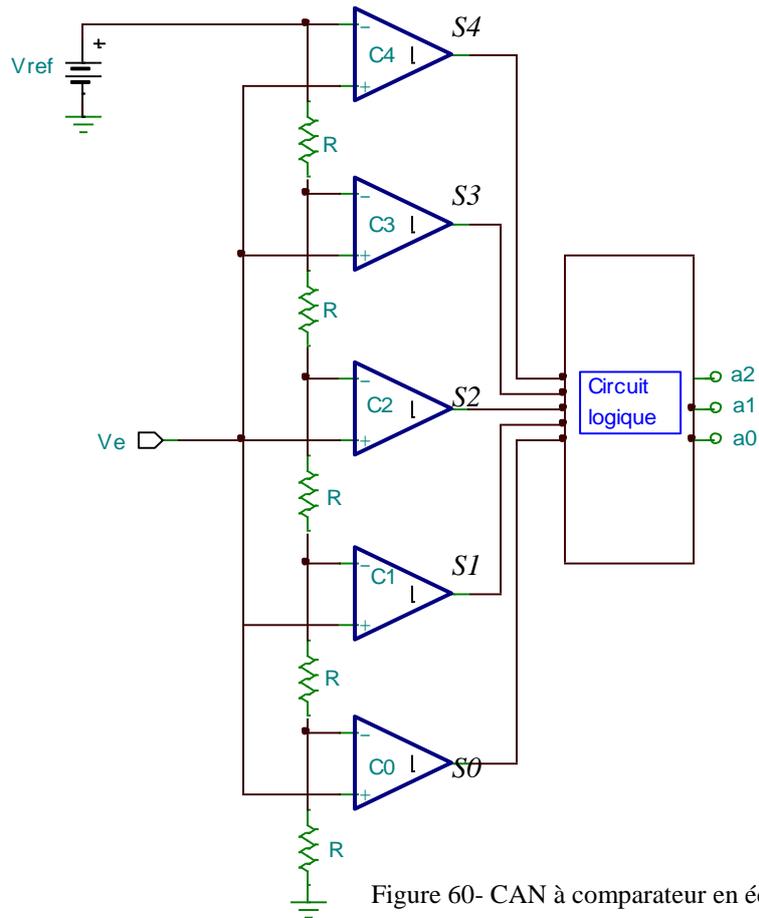


Figure 60- CAN à comparateur en échelle (flash)

Principe de fonctionnement : (prenons par exemple $V_{ref} = 5V$)

- Les tensions appliquées aux entrées "-" des comparateurs sont :

$$V_{0-} = V_{ref} / 5 = 1V ; V_{1-} = 2V ; V_{2-} = 3V ; V_{3-} = 4V ; V_{4-} = 2V.$$

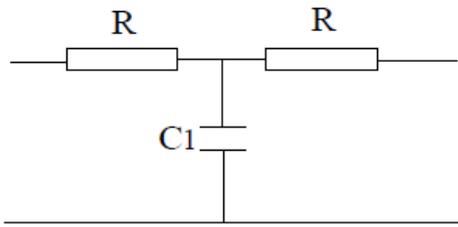
- Les tensions en sortie des comparateurs sont inscrites dans le tableau ci-dessous :

V_e	<i>Sorites</i> <i>Compareurs</i>					<i>Nombre</i> $N_{(2)}$			$N_{(10)}$
	<i>S4</i>	<i>S3</i>	<i>S2</i>	<i>S1</i>	<i>S0</i>	<i>a2</i>	<i>a1</i>	<i>a0</i>	
$0V < V_e < 1V$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$1V < V_e < 2V$	0	0	0	0	1	0	0	1	1
$2V < V_e < 3V$	0	0	0	1	1	0	1	0	2
$3V < V_e < 4V$	0	0	1	1	1	0	1	1	3
$4V < V_e < 5V$	0	1	1	1	1	1	0	0	4
$5V < V_e$	1	1	1	1	1	1	0	1	5

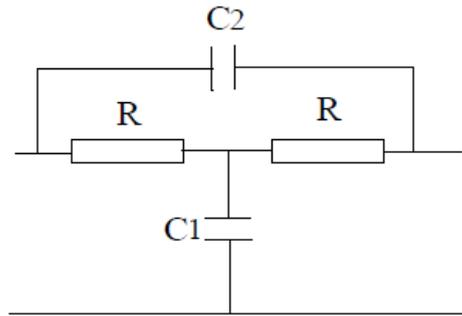
La résolution du *CAN* étudié est de *IV*, il faudra donc un grand nombre de comparateurs pour avoir une bonne résolution.

La conversion est très rapide (pas de comptage).

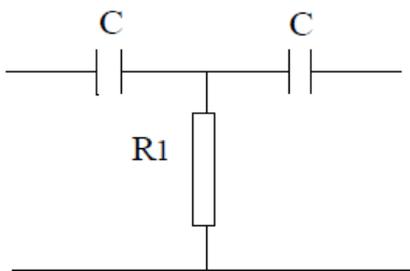
ANNEXE 1



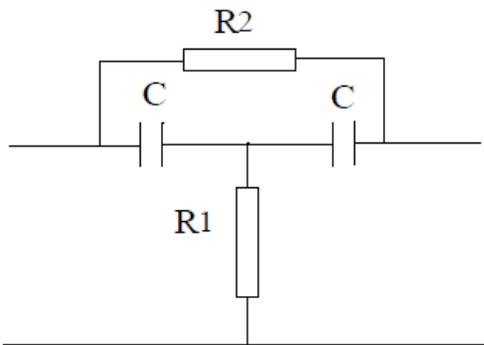
$$y_{12} = y_{21} = \frac{-1}{R(2 + RC_1p)}$$



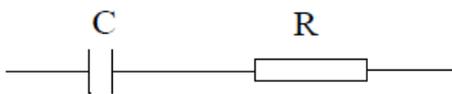
$$y_{12} = y_{21} = -\frac{R^2C_1C_2p^2 + 2RC_2p + 1}{2R + R^2C_1p}$$



$$y_{12} = y_{21} = \frac{-R_1C^2p^2}{2R_1Cp + 1}$$

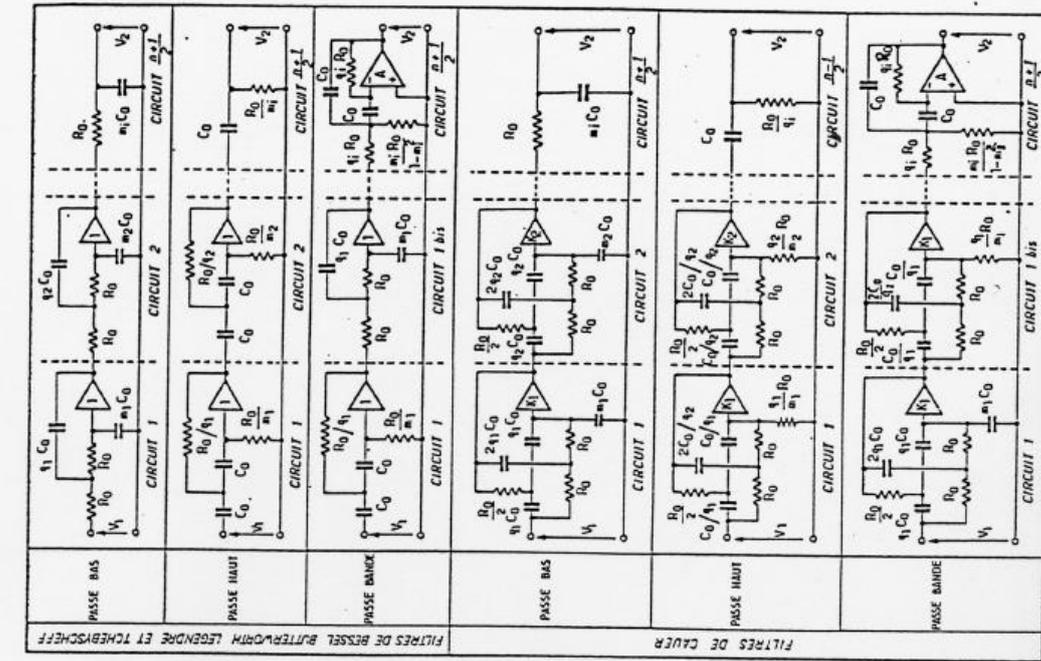


$$y_{12} = y_{21} = -\frac{R_1R_2C^2p^2 + 2R_1Cp + 1}{R_2(2R_1Cp + 1)}$$



$$y_{12} = y_{21} = \frac{-Cp}{1 + RCp}$$

ANNEXE 2



FILTRES DE BESSEL BUTTERWORTH LEGENDE ET TCHERBSCHEFF

FILTRES DE CAUER

— Les six schémas des filtres dont les valeurs des éléments figurent dans les tables numériques.

CIRCUITS ÉLÉMENTAIRES	FONCTIONS DE TRANSFERT	PARAMÈTRES CARACTÉRISTIQUES	COURBES DE RÉPONSE
	$\frac{1}{m p + 1}$	—	
	$\frac{1}{p + 1}$	—	
	$\frac{1}{m^2 p^2 + 2 m p + 1}$	$Q = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{m}{m^2 + 1}}$ $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{m^2 + 1}}$	
	$\frac{p^2}{m^2 p^2 + 2 p + 1}$	$Q = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{m}{m^2 + 1}}$ $\omega_0 = \sqrt{m}$	
	$\frac{K(1 + p^2)}{(p^2 + 2m)p^2 + 2p + 1}$	$Q = \frac{\sqrt{p^2 + 2m}}{2(m + 2\sqrt{1-K})}$ $\omega_0 = \sqrt{p^2 + 2m}$ $\omega_{max} = \frac{1}{2} > \omega_0$	
	$\frac{K(p^2 + p^2)}{p^2 + 2p + 2(1-K)p^2 + 2m}$	$Q = \frac{\sqrt{p^2 + 2m}}{2(m + 2\sqrt{1-K})}$ $\omega_0 = \sqrt{p^2 + 2m}$ $\omega_{max} = 1 < \omega_0$	
	$\frac{m p^2}{1 + 2m p + p^2}$	$Q = \frac{1}{2m}$ $\omega_0 = 1$	

RAUCH (PASSE-BANDE)
SALLEN KEY-DOUBLE T (FILTRES à zéro de transmission)
SALLEN KEY-PASSE-HAUT
SALLEN KEY-PASSE-BAS

— Les sept filtres élémentaires dont la mise en cascade permet de réaliser tous les filtres : 1 et 2 passe-bas et passe-haut du premier ordre, 3 et 4 passe-haut et passe-bas du second ordre sans zéro de transmission, 5 et 6 passe-bas et passe-haut du deuxième ordre avec zéro de transmission, 7 passe-bande