

CONVERSION DE SIGNAUX

9



Dans un appareil photo numérique, la lumière émise par une petite zone de la vue photographiée est convertie en tension, puis numérisée par un convertisseur analogique-numérique et mise en mémoire.

- ◆ Quel est le rôle de l'interface dans la chaîne de mesure en EXAO ?
- ◆ Qu'est-ce qui permet de transformer les signaux numériques dans un ordinateur en signaux analogiques au niveau des périphériques tels que l'écran de son moniteur et les hauts-parleurs ?

CONVERSION DE SIGNAUX

Aujourd'hui, on peut dire « Fini, le temps de l'analogique » en voyant le numérique envahir le monde scientifique et technologique, l'industrie et la vie courante. En effet, partout, que ce soit pour percevoir le son ou l'image, que ce soit pour acquérir ou traiter les données, les appareils analogiques laissent de plus en plus la place à ce qui est numérique : les appareils photos, les caméscopes, la télévision, les ordinateurs... Tout est numérique. Cependant, les phénomènes physiques courants sont analogiques et nos sens d'ouïe et de vision sont adaptés à ce qui est analogique (son et image). C'est pour cette raison que les appareils numériques cités plus haut sont tous munis de montages à base de circuits intégrés jouant le rôle de convertisseurs : analogique-numérique (C.A.N.) ou numérique-analogique (C.N.A.).

1 SIGNAUX ANALOGIQUES, LOGIQUES ET NUMÉRIQUES

1.1- SIGNAL ANALOGIQUE

Un signal est analogique si sa valeur varie dans le temps de façon continue (Fig.1 par exemple).

L'information transportée par le signal à un instant t donné est sa valeur à cet instant. La variation des grandeurs physiques telles que la température T , la pression p , la vitesse v , est continue dans le temps. Ainsi, toutes ces grandeurs physiques sont des exemples de grandeurs analogiques.

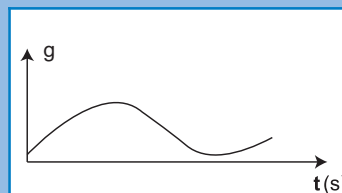


Fig.1 : Un signal analogique

1.2- SIGNAL LOGIQUE

Un signal (une tension électrique par exemple) est logique si sa valeur varie de façon discrète au cours du temps (Fig.2 par exemple). Il est constitué par la succession de deux valeurs possibles V_{CC} et 0 V appelées niveaux haut et bas : le niveau haut V_{CC} correspondant à l'état logique **1** et le niveau bas 0 V correspondant à l'état logique **0**.

L'information transportée par le signal à un instant t donné est V_{CC} ou 0 V .

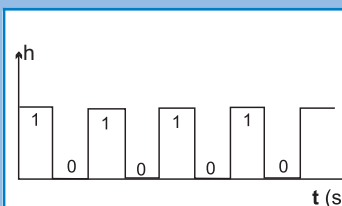


Fig.2 : Un signal logique

1.3- SIGNAL NUMÉRIQUE

Un signal est numérique lorsqu'il est défini comme une suite de valeurs numériques représentées par un nombre ou un mot binaire $[N]$ de n bits.

Le mot binaire $[N]$ est constitué par un ensemble de signaux logiques formant les éléments binaires du mot. La figure 3 représente un signal logique à 4 bits avec a_0 , a_1 , a_2 et a_3 qui sont les éléments binaires du mot.

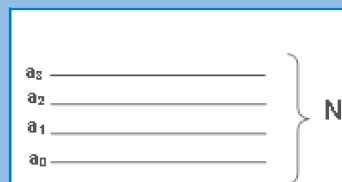


Fig.3 : Signal numérique à 4 bits.

1.4- COMPARAISON DES SIGNAUX ANALOGIQUES ET NUMÉRIQUES

◆ Les signaux analogiques traduisent la variation continue des différentes grandeurs physiques. Ainsi, tous les signaux issus des capteurs sont analogiques. Cependant, un signal analogique est très sensible à son environnement. Sa dégradation est facile et la correction de cette dégradation est difficile, voire impossible. D'autre part, un signal analogique est difficile à mémoriser ou à traiter mathématiquement.

◆ Les signaux numériques prennent uniquement deux états, un état haut et un état bas. Un signal numérique est insensible au bruit. Ainsi, on peut mémoriser, traiter mathématiquement et transformer un signal numérique sans qu'il soit altéré. On peut par exemple faire transiter un signal sonore de qualité HI-FI par une ligne téléphonique sans que la bande passante réduite ou le bruit de cette ligne ne soient gênants, ce qui aurait été impensable avec un signal analogique !

◆ Si un signal numérique est plus facile à stocker et à manipuler, il faut tout de même pouvoir l'exploiter. Ainsi, après un transport et un stockage en numérique, tout signal vidéo ou audio, devra revenir à sa forme analogique de départ. En effet, nos oreilles ne savent pas entendre en numérique !

1.5- NUMÉRISATION DÉCIMALE ET BINAIRE (RAPPEL)

Le "numérique" repose sur le système binaire dans lequel il ne peut exister que les deux valeurs **0** et **1**. Ce choix du système binaire s'explique par la facilité à reproduire électriquement ces deux valeurs :

- la valeur **0** qui signifie l'absence de tension (0V),
- la valeur **1** signifiant la présence d'une tension (5 V par exemple).

On compte en binaire de la même façon que l'on compte en décimal, sauf que l'on n'utilise que le 0 et le 1. Ainsi, on a :

décimal	binaire
0	0
1	1
2	10
3	11
4	100

Un mot binaire $[N]$ de n bits s'écrit avec n éléments binaires a_j , j variant de 0 à $(n-1)$. $[N] = [a_{n-1}a_{n-2}a_{n-3}\dots\dots\dots a_2a_1a_0]$

Son équivalent décimal en code binaire naturel s'écrit :

$$N = 2^{n-1}a_{n-1} + 2^{n-2}a_{n-2} + 2^{n-3}a_{n-3} + \dots + 2^0a_0$$

La valeur maximale d'un nombre binaire de n bits, exprimé en décimal est :

$$N_{\max} = 2^n - 1$$

Exemple : Ecrivons le nombre décimal 9 dans la base binaire à quatre bits.

$$9 = 2^3a_3 + 2^2a_2 + 2^1a_1 + 2^0a_0, \text{ avec } a_3=1, a_2=0, a_1=0 \text{ et } a_0=1.$$

Le nombre 9 s'écrira ainsi en base binaire à quatre bits : 1001.

2 CONVERTISSEURS NUMÉRIQUES-ANALOGIQUES (C.N.A.) ET CONVERTISSEURS ANALOGIQUES-NUMÉRIQUES (C.A.N.)

Le grand avantage apporté par la numérisation des signaux est la possibilité de stockage, de transformation et de restitution des données sans qu'elles ne soient altérées. Cependant, à la base, les signaux ont une nature analogique. De même, le monde extérieur est généralement analogique. Il faut donc créer des passerelles qui peuvent assurer le passage d'un type de donnée à l'autre. Ces passerelles sont des composants électroniques appelés convertisseurs. Il existe deux catégories : les convertisseurs numériques-analogiques (C.N.A.) et les convertisseurs analogiques-numériques (C.A.N.).

2.1- CONVERTISSEUR NUMÉRIQUE-ANALOGIQUE (C.N.A.)

2.1.1- Définition et symbole

Un convertisseur numérique-analogique, ou C.N.A. est un montage électronique transformant une information numérique (un nombre binaire [N]) en un signal analogique (tension ou courant) (Fig.4a et Fig.4b) proportionnel à la valeur décimale du nombre binaire converti.

- Si la grandeur de sortie est une tension, elle s'écrit : $u_S = k.N$, avec k en volt.
- Si la grandeur de sortie est un courant, son intensité s'écrit : $i_S = k'.N$ avec k' en ampère.

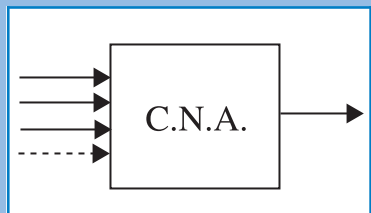


Fig.4a : Schéma d'un C.N.A.

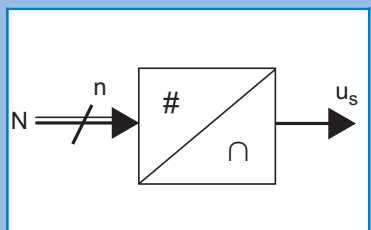


Fig.4b : Symbole d'un C.N.A.

2.1.2- Intérêt d'un C.N.A.

Les convertisseurs numériques-analogiques (C.N.A.) permettent de convertir un signal numérique en signal analogique exploitable. En effet, si une donnée numérique est plus facile à stocker et à manipuler, il faut tout de même pouvoir l'exploiter. A quoi servirait un son numérique si l'on ne pouvait pas l'entendre ?

Ainsi, dans un ordinateur multimédia, on trouve des C.N.A. pour la plupart des sorties telles que :

- sortie audio des cartes son,
- synthétiseur musical,
- imprimante,
- le modem (à la réception).

2.2- CONVERTISSEUR ANALOGIQUE-NUMÉRIQUE C.A.N.

2.2.1- Définition et symbole

Un convertisseur analogique-numérique, ou C.A.N. (Fig.5) est un montage électronique transformant un signal analogique (une tension u_E) appliqué à son entrée en un nombre binaire $[N]$ de sorties, proportionnel à cette grandeur u_E (fig.6a et 6b).

$$N = K.u_E \text{ avec } k \text{ en } v^{-1}$$

2.2.2- Intérêt d'un C.A.N.

Un convertisseur analogique-numérique permet de transformer en valeurs numériques un phénomène variant dans le temps pour assurer son stockage ou son traitement. Un ordinateur « multimédia » est une machine capable de numériser des documents (papier, audio, vidéo...). Ainsi, l'ensemble des principaux périphériques d'un ordinateur comportant des C.A.N. sont :

- les cartes d'acquisition vidéo,
- les scanners,
- les cartes de capture sonore,
- les lecteurs (optiques comme le lecteur de cédérom),
- les modems (à l'émission).



Fig.5 : Convertisseurs analogiques-numériques

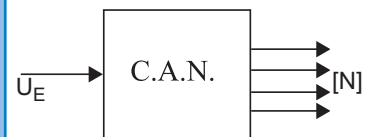


Fig.6a : Schéma d'un C.A.N.



Fig.6b : Symbole d'un C.A.N.

2.3- EXEMPLES DE CHAÎNES DE TRAITEMENT DE SIGNAUX

2.3.1- La chaîne de traitement du son

Un exemple de conversion et de traitement de données est la chaîne de transformation du son, de l'enregistrement de la musique à sa restitution par les enceintes acoustiques (baffles). Le son est capté par un micro (capteur analogique) dont la très faible tension de sortie est amplifiée (Fig.7a).

Le signal peut être numérisé directement à ce niveau à l'aide d'un convertisseur analogique-numérique (C.A.N.) et sera alors traité de façon entièrement numérique (mixage...). Il peut aussi être stocké de façon analogique sur bande magnétique, mixé et ensuite numérisé. Le stockage est presque toujours numérique (compact disk CD). Le lecteur de CD contient des convertisseurs numériques-analogiques (C.N.A.) qui vont retransformer les informations numériques en signal analogique qui sera amplifié avant d'être envoyé aux enceintes (Fig.7b).



Fig.7a : Le micro capte le son.

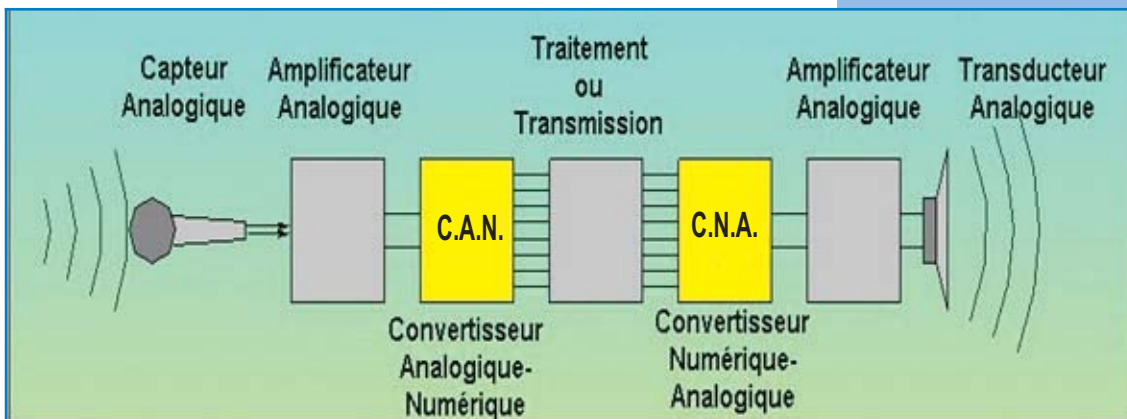


Fig.7b : Chaîne de traitement du son

2.3.2- Cas de l'appareil photo-numérique

Numérisation du signal

La lumière émise par une petite zone de la vue photographiée est convertie en tension par un photo-capteur, puis numérisée par un convertisseur analogique-numérique (C.A.N.) et mise en mémoire.

L'appareil photo (Fig.8) contient un très grand nombre de capteurs formant un quadrillage pour capturer l'ensemble de la vue photographiée. L'ensemble des valeurs numériques obtenues constitue les données du fichier image (Fig.9).



Fig.8 : Appareil photo numérique.

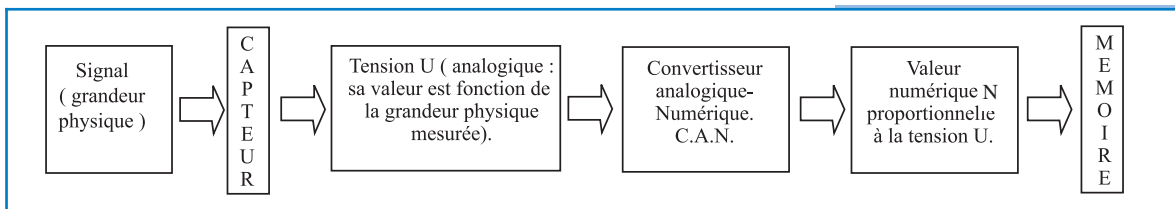


Fig.9 : Chaîne de traitement du son

Restitution du signal (Fig.10).

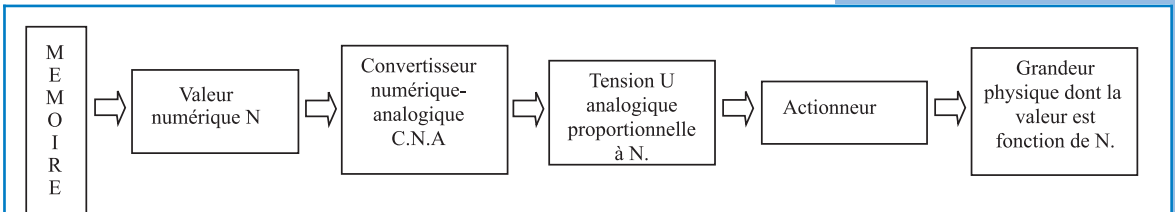


Fig.10 : Chaîne de traitement d'un signal numérique

Lors de l'affichage de la photographie sur l'écran d'un ordinateur, on exploite le fichier image. Chacune des données numériques de ce fichier est convertie par un convertisseur numérique-analogique (C.N.A.) en une tension commandant l'éclairage plus ou moins intense d'un point (pixel) de l'écran. L'image observée sur l'écran est reconstituée par l'ensemble de ces points.

3 CONVERTISSEUR NUMÉRIQUE-ANALOGIQUE (C.N.A.)

■ Cas d'un convertisseur numérique-analogique à réseau de résistances pondérées.

3.1- SCHÉMA DU MONTAGE

La réalisation du montage de principe d'un convertisseur numérique-analogique (C.N.A.) à réseau de résistances pondérées nécessite essentiellement :

- une tension de référence U_{ref} ,
- un ensemble de n résistors de résistances pondérées à la puissance de 2 ($R, 2R, 4R, \dots, 2^{n-1} R$),
- des interrupteurs commandés par les variables logiques a_j du signal à transformer,
- un amplificateur opérationnel fonctionnant en régime linéaire.

Dans le cas du convertisseur numérique-analogique à quatre bits, on utilise 4 résistors de résistances respectives $R, 2R, 4R$ et $8R$. Le schéma du montage d'un C.N.A. à 4 bits est représenté sur figure 11.

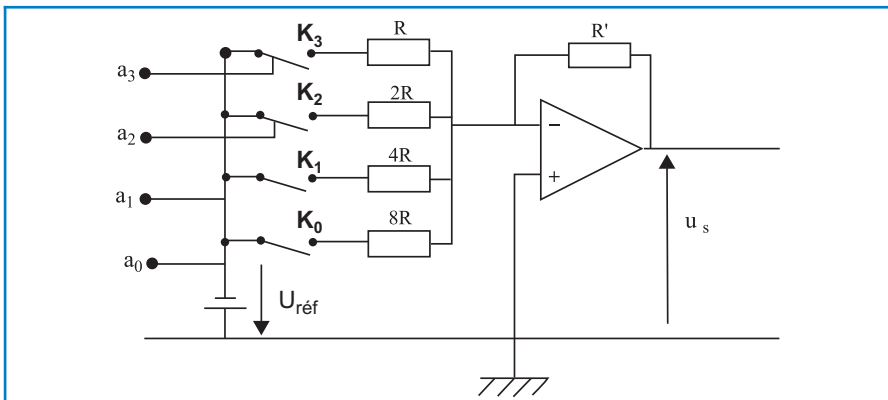


Fig.11 : Schéma de principe d'un C.N.A. à réseau de résistances pondérées (R , $2R$, $4R$, $8R$)

L'amplificateur opérationnel fonctionnant en régime linéaire est associé au réseau de résistances pondérées de R à $8R$. La tension de référence U_{ref} fixe le potentiel d'entrée. Les interrupteurs sont commandés par les variables logiques a_j .

Remarque :

Pour obtenir une conversion de qualité, il faut s'assurer que la tension constante U_{ref} n'est pas affectée par une diminution de la température ou autre.

3.2- PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

D'après le schéma du montage du convertisseur (Fig.11), pour $a_j = 1$, l'interrupteur k_j est fermé. Le résistor correspondant de résistance $R_j = 2^{(n-j-1)}R$ est parcouru par un courant I_j qui dépend de sa propre valeur (avec $n = 4$).

En revanche, pour $a_j = 0$, l'interrupteur k_j est ouvert. Le même résistor n'est alors parcouru par aucun courant.

Questions

1°) Ecrire le mot binaire d'entrée $[N]$ de ce convertisseur.

2°) a) Etablir l'expression de l'intensité du courant I_3 qui parcourt le circuit :

- ♦ pour $a_3 = 1$ et $a_2 = a_1 = a_0 = 0$,
- ♦ pour $a_3 = a_2 = a_1 = a_0 = 0$,
- ♦ exprimer I_3 en fonction de U_{ref} , R et a_3 .

b) Etablir l'expression de la tension u_s en fonction de R, R', a_3 et U_{ref} .

3°) Préciser le rôle de l'amplificateur opérationnel dans ce montage.

Pour ce C.N.A. à quatre bits, le mot binaire d'entrée est :

$$[N] = [a_3 a_2 a_1 a_0]$$

Son équivalent décimal en code binaire naturel s'écrit :

$$N = 2^3 a_3 + 2^2 a_2 + 2^1 a_1 + 2^0 a_0$$

♦ Pour $a_3 = 1$ et $a_2 = a_1 = a_0 = 0$, le schéma du circuit d'entrée est équivalent à celui de la figure 12.

L'amplificateur opérationnel étant supposé idéal, ainsi $u^+ = u^- = 0$.

Par suite, on écrit en convention récepteur :

$$U_R = -U_{\text{ref}}, \text{ ce qui donne : } I_3 = -\frac{U_{\text{ref}}}{R}.$$

♦ Pour $a_3 = a_2 = a_1 = a_0 = 0$, il n'y a aucun courant qui circule dans R.

Par conséquent, $I_3 = 0$.

En se basant sur ces deux expressions de I_3 , on peut écrire :

$$I_3 = -\frac{a_3 U_{\text{ref}}}{R}, \text{ avec } a_3 = 0 \text{ ou bien } 1.$$

Ainsi, on a : $U_R = -a_3 U_{\text{ref}}$.

En généralisant ce résultat à toutes les dérivations d'entrée de résistance : $R_j = 2^{(n-j-1)}R$, on aura :

$$I_j = -\frac{a_j U_{\text{ref}}}{R_j} \text{ et } U_{R_j} = -a_j U_{\text{ref}}.$$

Ce résultat général nous permet de représenter le schéma équivalent simplifié du C.N.A. de la figure 11 comme le montre la figure 13.

Le signal analogique de sortie est la tension u_s . Par application de la loi des mailles, on peut écrire : $u_s + R'i' = 0$. Par suite, $u_s = -R'i'$. Or $i' = i$ car $i^- = 0$.

i est la somme des courants collectés par les commutateurs k_j fermés : $i = I_3 + I_2 + I_1 + I_0$.

D'autre part, on a :

$$I_3 = -\frac{a_3 U_{\text{ref}}}{R}, I_2 = -\frac{a_2 U_{\text{ref}}}{2R}, I_1 = -\frac{a_1 U_{\text{ref}}}{4R} \text{ et } I_0 = -\frac{a_0 U_{\text{ref}}}{8R}$$

Pour $a_3 = a_2 = a_1 = a_0 = 1$, nous constatons que les courants générés par les résistances pondérées de R à 8R forment une suite géométrique de raison $\frac{1}{2}$.

L'expression de l'intensité du courant résultant est :

$$i = -\left(\frac{a_3 U_{\text{ref}}}{R} + \frac{a_2 U_{\text{ref}}}{2R} + \frac{a_1 U_{\text{ref}}}{4R} + \frac{a_0 U_{\text{ref}}}{8R} \right) \quad (3)$$

Il vient donc : $u_s = R' \left(\frac{a_3 U_{\text{ref}}}{R} + \frac{a_2 U_{\text{ref}}}{2R} + \frac{a_1 U_{\text{ref}}}{4R} + \frac{a_0 U_{\text{ref}}}{8R} \right)$

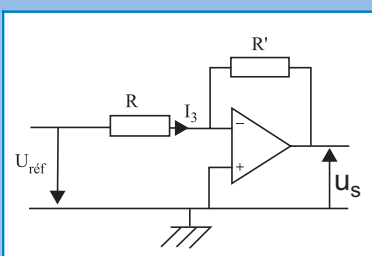


Fig.12 : Schéma du circuit d'entrée avec $a_3 = 1$ et $a_2 = a_0 = 0$

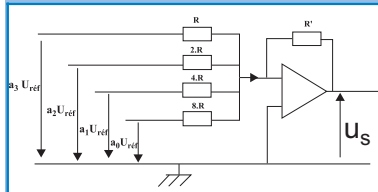


Fig.13 : Schéma équivalent simplifié d'un C.N.A. à 4 bits

$$u_s = \frac{R' \cdot U_{ref}}{8 \cdot R} (8 \cdot a_3 + 4 \cdot a_2 + 2 \cdot a_1 + a_0)$$

$$u_s = \frac{R' \cdot U_{ref}}{8 \cdot R} (2^3 \cdot a_3 + 2^2 \cdot a_2 + 2^1 \cdot a_1 + 2^0 \cdot a_0).$$

$$\text{Donc : } u_s = \frac{R' \cdot U_{ref}}{8 \cdot R} N$$

$$u_s = k \cdot N, \text{ avec } k = \frac{R' \cdot U_{ref}}{8 \cdot R}$$

Ce montage réalise bien une conversion numérique-analogique puisque la tension de sortie u_s est proportionnelle au nombre binaire N d'entrée.

Conclusion

Dans le cas d'un C.N.A. à réseau de résistances pondérées ($R, 2R, 4R, 8R, \dots, 2^{n-1}R$), le signal analogique (tension électrique u_s) issue de la conversion d'un signal numérique (mot binaire $[N]$) est proportionnel à l'équivalent décimal N de $[N]$: $u_s = kN$. avec $k = \frac{R' \cdot U_{ref}}{2^{n-1}R}$, n étant le nombre de bits du mot binaire converti N .

3.3- CARACTÉRISTIQUES D'UN C.N.A.

♦ La pleine échelle (P.E.)

C'est la tension maximale U_{Smax} (tension que l'on ne peut jamais atteindre) prévue en sortie à laquelle correspond la valeur maximale $N_{max} = 2^n - 1$.

$$P.E. = U_{Smax} = k \cdot N_{max} \quad \text{Avec P.E. en volt.}$$

Questions

Montrer que l'expression de la tension pleine échelle d'un convertisseur numérique-analogique à 4 bits et à réseau de résistances pondérées ($R, 2R, 4R, 8R$) est : $U_{s,max} = \frac{15 \cdot R' \cdot U_{ref}}{8 \cdot R}$.

Cas général

D'une manière générale, l'expression de la tension pleine échelle d'un C.N.A. à n bits et à réseau de résistances pondérées ($R, 2R, 4R, 8R, \dots, 2^{n-1}R$) est : $P.E. = \frac{(2^n - 1) \cdot R' \cdot U_{ref}}{2^{n-1} \cdot R}$.

Remarque :

La tension de référence U_{ref} est calculée pour que le maximum de tension de sortie ($U_{s\ max}$) soit inférieure à la tension de saturation de l'amplificateur intégré.

♦ Le quantum q

Le quantum, noté q , pour un convertisseur C.N.A. correspond à la quantité élémentaire de variation du signal de sortie u_s correspondant à une variation de ± 1 de N en entrée.

$$q = \frac{U_{s\ max}}{2^n - 1} = \frac{P.E.}{2^n - 1} = \frac{P.E.}{N_{max}} \text{ pour un convertisseur de } n \text{ bits.}$$

Remarque :

$$q = \frac{U_{Smax} - U_{Smin}}{2^n} \text{ si } U_{Smin} \neq 0. \text{ Le quantum s'exprime en volt.}$$

Questions

Montrer que pour un C.N.A. à 4 bits et à réseau de résistances pondérées ($R, 2R, 4R, 8R$), le quantum q s'écrit : $q = \frac{R' \cdot U_{ref}}{2^3 \cdot R}$

♦ La résolution

C'est le plus petit incrément possible en entrée. En valeur absolue, elle est égale au quantum q avec $q = \frac{U_{s\ max}}{2^n - 1}$.

La résolution relative d'un C.N.A. est définie par rapport au nombre de bits n du mot binaire $[N]$ à convertir. Elle correspond à la variation d'une unité du nombre binaire d'entrée. La résolution relative (r) d'un C.N.A. est égale à l'inverse du nombre de combinaisons binaires que le convertisseur est capable de convertir $r = \frac{1}{2^n}$ où n représente le nombre de bits. Ainsi, un

C.N.A. à 4 bits possède 2^4 combinaisons à l'entrée (de 0000 à 1111). Par conséquent, sa résolution relative est $1/16$. Celle d'un C.N.A. à 8 bits est $1/256$.

♦ Caractéristique de transfert d'un C.N.A. : $u_s = f(N)$ **Expérience**

On réalise le montage schématisé par la figure 14. Il s'agit du montage d'un convertisseur numérique-analogique à résistances pondérées et à 3 bits. L'amplificateur opérationnel supposé idéal (A 741) est polarisé sous une tension ± 15 V. La tension de référence est assurée par une alimentation stabilisée. A l'aide des interrupteurs K_j relatifs aux nombres binaires d'entrée a_j (j ne peut prendre que les valeurs 0, 1 et 2), on fait varier la valeur du signal d'entrée (le nombre binaire d'entrée).

Pour chaque valeur de N , on note la valeur de la tension de sortie u_s correspondante.

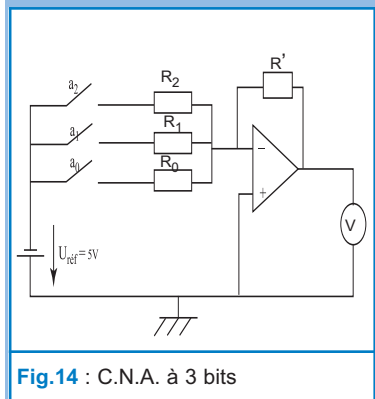
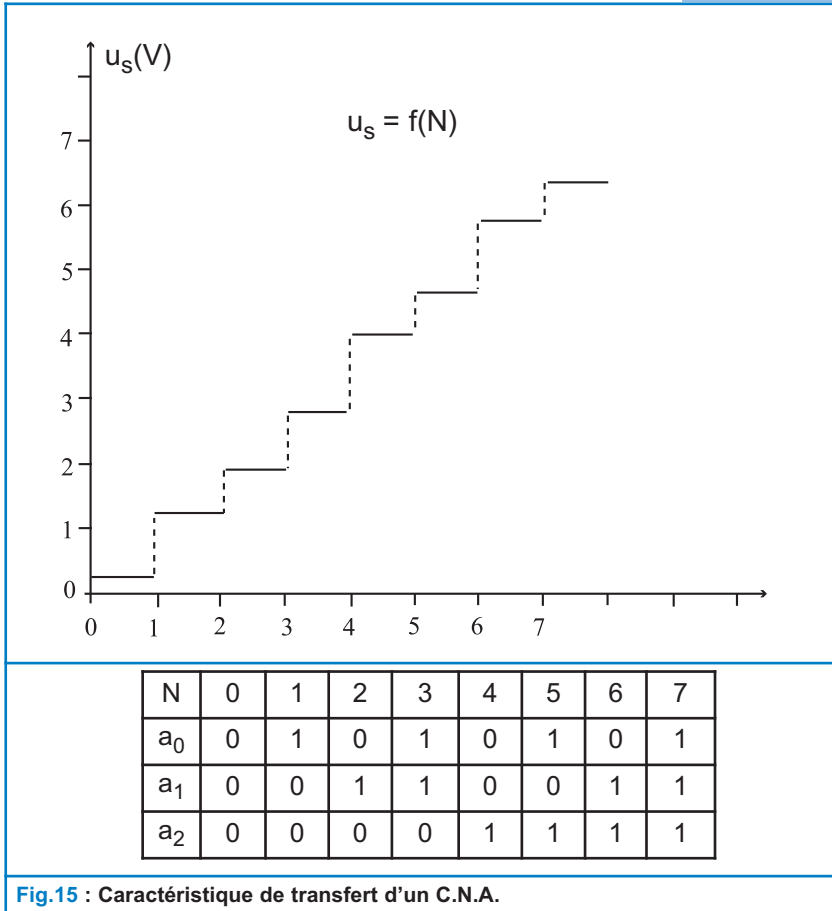


Fig.14 : C.N.A. à 3 bits

Les résultats de mesures ont permis de tracer la variation de u_s en fonction de N (Fig.15).



Questions

Montrer graphiquement que $u_s = f(N)$ s'écrit : $u_s = k.N$, où k est une constante que l'on calculera.

Cette courbe qui traduit l'évolution de la tension analogique de sortie u_s en fonction de N est appelée caractéristique de transfert du convertisseur numérique-analogique.

Cette caractéristique $u_s = f(N)$ est constituée par une suite de points s'appuyant sur une droite qui passe par l'origine (Fig.15).

Remarque

La même manipulation est réalisable en utilisant, au lieu du réseau de résistances, un circuit intégré approprié (DAC 0800 ou DAC 0808) comme il est décrit dans la fiche technique de la

fin du chapitre.

♦ Avantages et inconvénients du C.N.A à résistances pondérées

L'avantage du convertisseur numérique-analogique à résistances pondérées est sa simplicité. Cependant, dans la pratique, il est très délicat et même difficile de réaliser un réseau de résistances ayant un rapport de valeurs précis. En effet, réaliser des résistors identiques ne pose pas problème, mais trouver quatre résistors de résistances de valeurs parfaitement ajustées est très difficile en pratique.

■ Cas d'un convertisseur numérique-analogique à réseau de résistances « R-2R »

Ce type de convertisseur prend en compte les défauts du C.N.A. à résistances pondérées. Il est bâti autour d'un réseau de résistances, composé de deux valeurs seulement, R et 2R. Comme le C.N.A. à réseau de résistances pondérées, le C.N.A. à réseau de résistances « R-2R » est constitué essentiellement d'un amplificateur opérationnel fonctionnant en régime linéaire associé à un réseau de résistances et à des interrupteurs commandés par les variables logiques a_j . Un générateur de tension assure la tension de référence U_{ref} du convertisseur (Fig.16).

Schéma du montage

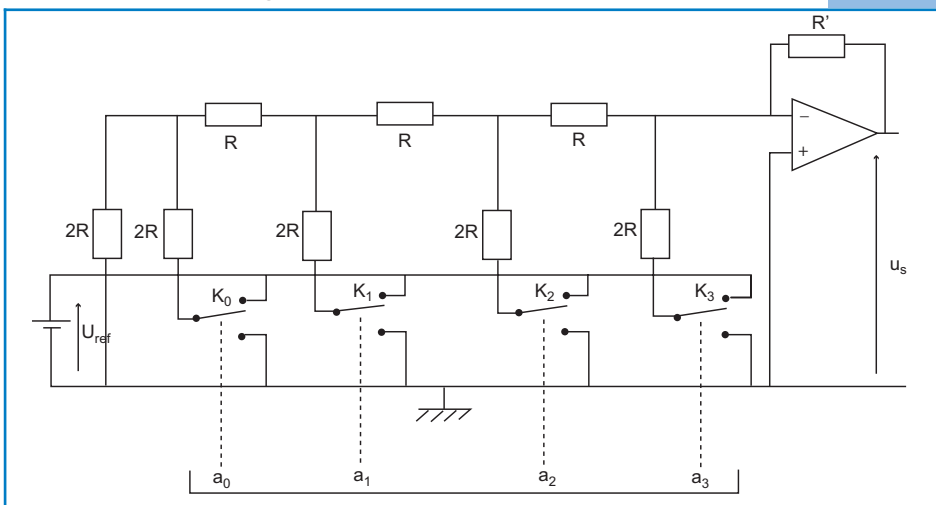


Fig.16 : Un C.N.A. à réseau de résistances « R-2R ».

L'étude du principe de fonctionnement du C.N.A. à réseau de résistances «R-2R» n'est pas au programme. Mais, ça n'empêche pas de le connaître et de le comprendre surtout que c'est l'un des principes adoptés dans les circuits intégrés utilisés dans la conversion des signaux.

On montre que : $u_s = - \frac{R' \cdot U_{ref}}{16 \cdot R} \cdot N$, pour un C.N.A. à 4bits et à

réseau de résistances « R-2R »

Remarque

L'étude détaillée du principe de fonctionnement du C.N.A. à réseau de résistance « R-2R » est proposée comme sujet de lecture en fin de chapitre.

4 CONVERTISSEURS ANALOGIQUES-NUMERIQUES (C.A.N.)

4.1- LES PHASES DE LA CONVERSION ANALOGIQUE-NUMÉRIQUE

On souhaite afficher une grandeur électrique (signal analogique) sous forme numérique, d'une part, et la sauvegarder dans la mémoire d'un système informatique, d'autre part. Pour cela, on aura besoin de réaliser une conversion de la donnée analogique (courant ou tension) en une valeur numérique. Cette conversion est assurée par un convertisseur analogique-numérique (C.A.N.). D'une manière générale, convertir une grandeur analogique en une grandeur numérique nécessite deux opérations successives :

- la quantification qui transforme la valeur analogique de la grandeur d'entrée en un nombre fini de niveaux,
- le codage qui associe une valeur numérique à chacun de ces niveaux.

4.2- PRINCIPE DE LA CONVERSION ANALOGIQUE-NUMÉRIQUE

Le principe d'un C.A.N. consiste à comparer deux grandeurs analogiques (tensions) réalisées à l'aide d'amplificateurs opérationnels. L'une de ces grandeurs est la tension à convertir, tandis que l'autre grandeur correspond à la sortie du C.N.A. étudié précédemment (Fig.17).

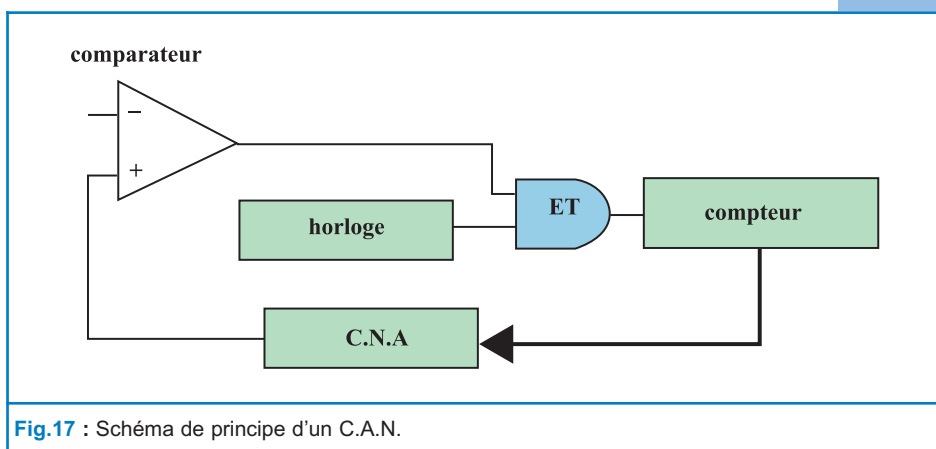


Fig.17 : Schéma de principe d'un C.A.N.

L'essentiel

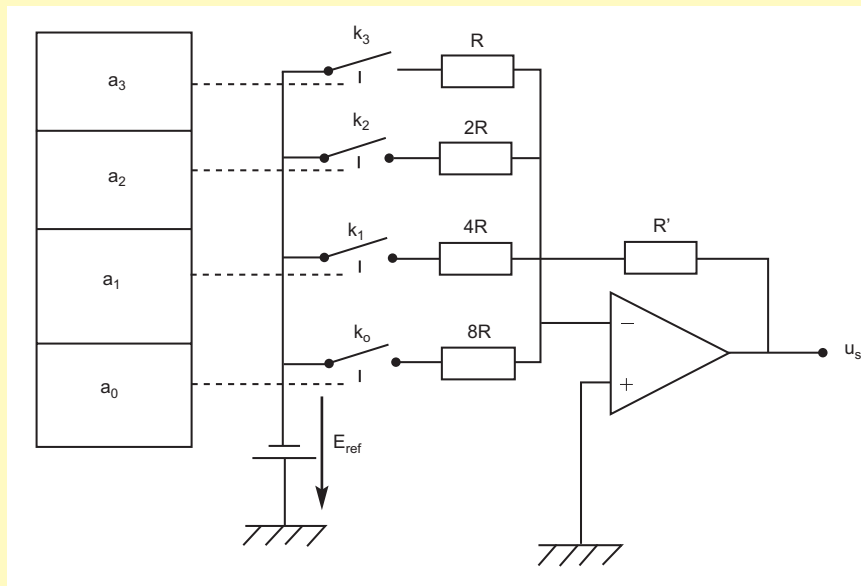
- Un signal est dit analogique lorsque sa valeur varie de façon continue au cours du temps.
- Un signal est dit logique si sa valeur varie de façon discrète au cours du temps ; il prend uniquement deux états, un état haut et un état bas.
- Un C.N.A. est un montage électronique qui transforme une information numérique (un mot binaire [N]) en un signal analogique proportionnel à la valeur décimale du nombre binaire converti.
- La tension pleine échelle (P.E.) d'un C.N.A. est la valeur maximale de la tension de sortie du convertisseur : $P.E. = U_{smax} = K.N_{max}$.
- Le quantum, noté q , pour un convertisseur C.N.A. correspond à la quantité élémentaire de variation du signal de sortie u_s correspondant à une variation de ± 1 de N en entrée.
- Le quantum s'exprime : $q = \frac{U_{smax}}{2^n - 1}$.
- Un C.A.N. est un montage électronique qui transforme un signal analogique (une tension u_E) appliquée à son entrée en un nombre binaire [N] de sortie (proportionnel à cette tension u_E).
- Le principe d'un C.A.N. consiste à comparer deux grandeurs analogiques (tensions) réalisées à l'aide d'amplificateurs opérationnels.

Exercices

Exercice résolu

ÉNONCÉ

On considère le convertisseur numérique C.N.A. à 4 bits de la figure 1, utilisant une échelle de résistances pondérées ($R_0 = 8R$; $R_1 = 4R$; $R_2 = 2R$; $R_3 = R$). L'amplificateur opérationnel fonctionne en régime linéaire. Il est supposé idéal. Il est polarisé $\pm V_{CC}$, avec $V_{CC} = 12V$; $E_{ref} = 4V$ et $R = R'$.



Les interrupteurs k_j sont commandés par un circuit logique tel que $j = 0, 1, 2$ et 3 .

Pour $a_j = 1$, on a k_j fermé, alors que pour $a_j = 0$, on a k_j ouvert.

1°) Montrer que l'expression de l'intensité du courant I_3 qui parcourt le résistor de résistance R est : $I_3 = -\frac{a_3 E_{ref}}{R}$.

2°) Exprimer l'intensité du courant i qui traverse le résistor R' en fonction de a_j , E_{ref} et R .

3°) Préciser l'importance de l'amplificateur opérationnel dans un montage pareil.

4°) Exprimer u_s en fonction de a_j , E_{ref} , R et R' et montrer que $u_s = k.N$.

5°) En déduire le quantum q et la pleine échelle $U_{s_{max}}$ du C.N.A.

SOLUTION

1°) Pour $a_3 = 1$ et $a_2 = a_1 = a_0 = 0$, seul k_3 est fermé.

Par application de la loi des mailles on peut écrire :

$E_{\text{ref}} + U_R - \varepsilon = 0$ avec $\varepsilon = 0$ car l'amplificateur opérationnel est idéal.

Ainsi, $E_{\text{ref}} = -R \cdot I_3$ et par suite : $I_3 = -\frac{E_{\text{ref}}}{R}$ (1).

Pour $a_3 = a_2 = a_1 = a_0 = 0$, l'interrupteur k_3 est ouvert et par suite : $I_3 = 0$ (2).

Des résultats (1) et (2), on peut considérer la maille comme étant formée d'un générateur

$a_3 E_{\text{ref}}$ en série avec le résistor de résistance R . Ainsi, $I_3 = -\frac{a_3 E_{\text{ref}}}{R}$.

2°) Pour $a_3 = a_2 = a_1 = a_0 = 1$, les différents interrupteurs k_j sont fermés.

Par application de la loi des nœuds, on peut écrire :

$i = I_3 + I_2 + I_1 + I_0$, avec I_2 l'intensité du courant qui parcourt $R_2 = 2R$, I_1 celle du courant qui circule dans $R_1 = 4R$ et I_0 celle du courant qui parcourt $R_0 = 8R$.

Ainsi, $i = -\left[\frac{a_3 E_{\text{ref}}}{R} + \frac{a_2 E_{\text{ref}}}{2R} + \frac{a_1 E_{\text{ref}}}{4R} + \frac{a_0 E_{\text{ref}}}{8R} \right]$

$$i = -\frac{E_{\text{ref}}}{R} \left[a_3 + \frac{a_2}{2} + \frac{a_1}{4} + \frac{a_0}{8} \right]$$

$$i = -\frac{E_{\text{ref}}}{8R} [8a_3 + 4a_2 + 2a_1 + a_0] \quad (3)$$

3°) L'amplificateur opérationnel a pour rôle de convertir le courant i en une tension u .

4°) Par application de la loi des mailles, on peut écrire :

$u_s + u_{R'} + \varepsilon = 0$, avec $\varepsilon = 0$ car l'amplificateur opérationnel est supposé idéal.

D'où, $u_s = -R' \cdot i'$, avec $i' = i$ car $i^- = 0$.

En remplaçant i par son expression (3), on aura :

$$u_s = -R' i$$

$$u_s = R' \cdot \frac{E_{\text{ref}}}{8R} [8a_3 + 4a_2 + 2a_1 + a_0]$$

$$u_s = K \cdot N, \text{ avec } k = \frac{R' \cdot E_{\text{ref}}}{8R}$$

$$\text{et } N = [8a_3 + 4a_2 + 2a_1 + a_0].$$

5°) Le quantum q correspond à $a_0 = 1$ et $a_3 = a_2 = a_1 = 0$.

$$\text{Ainsi, } q = \frac{R' \cdot E_{\text{ref}}}{8R}$$

La pleine échelle correspond à $a_3 = a_2 = a_1 = a_0 = 1$,

$$P.E. = \frac{15 \cdot R' \cdot E_{\text{ref}}}{8R}$$

Exercices à résoudre

Tests rapides des acquis

1 Items "vrai ou faux"

Evaluer les propositions suivantes par vrai ou faux.

- 1- Un signal est dit logique si sa valeur varie de façon continue au cours du temps.
- 2- Un signal numérique est plus facile à stocker et à manipuler.
- 3- Un convertisseur numérique-analogique transforme une information numérique en courant.

4- L'amplificateur opérationnel dans un C.N.A. a pour rôle de convertir un courant I en tension analogique u_s .

5- Le quantum q pour un convertisseur C.N.A. représente la valeur de la tension maximale qu'il peut transmettre.

2 Questions à Choix Multiples

Préciser pour chacune des questions suivantes, la(ou les) proposition(s) juste(s).

■ 1- La tension de référence dans un C.N.A. est:
a- indépendante de la tension de sortie.

b- indépendante du signal d'entrée.

c- dépend de la tension de saturation de l'amplificateur opérationnel.

■ 2- Le nombre binaire correspondant à la valeur 36 en base décimale est :

a- 110000, b- 101000, c- 100100.

■ 3- Le nombre de combinaisons qu'un convertisseur numérique-analogique à 4 bits est capable de convertir est :

a- 16, b- 32, c- 64.

■ 4- La résolution d'un C.N.A. dépend :

a- de la tension de référence E_{ref} .

b- du nombre de bits à convertir.

c- de la pleine échelle.

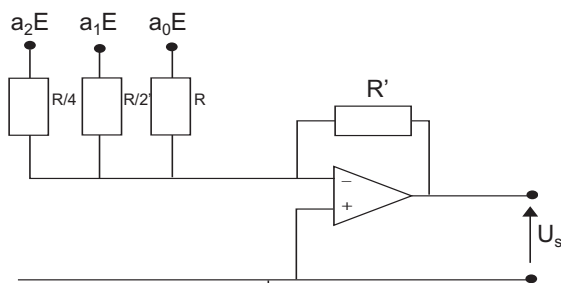
■ 5- L'expression de la tension de sortie maximale (P.E.) dans le cas d'un C.N.A. à 8 bits et à réseau de résistances pondérées ($R, 2R, 4R, \dots$) est :

$$a- U_{S \max} = \frac{7 \cdot R' \cdot E_{ref}}{4 \cdot R}, \quad b- U_{S \max} = \frac{15 \cdot R' \cdot E_{ref}}{8 \cdot R},$$

$$c- U_{S \max} = \frac{225 \cdot R' \cdot E_{ref}}{128 \cdot R}.$$

Exercices d'application

3 On considère le convertisseur numérique-analogique de 3 bits schématisé sur la figure 2 et pour lequel on donne $E = 10 \text{ V}$ et $R = 10 R'$.



1°) Exprimer l'intensité du courant électrique I qui traverse R en fonction de R , a_0 et E .

2°) Exprimer u_s en fonction du nombre N .

3°) Calculer le quantum q et la pleine échelle de ce convertisseur.

- 4** On désire convertir un signal numérique en un signal analogique dont la valeur pleine échelle serait égale à 10 V, à l'aide d'un convertisseur numérique-analogique à réseau de résistances pondérées ($R, 2R, 4R, \dots$) à 8 bits.
- 1°) Préciser le nombre de niveaux d'entrée possibles pour ce C.N.A.
 - 2°) Calculer le quantum q de ce C.N.A.
 - 3°) Calculer la tension analogique de sortie u_s correspondant à l'information numérique 11001000.

Exercices de synthèse

- 5** On considère le convertisseur numérique-analogique à 8 bits schématisé par la figure 3.

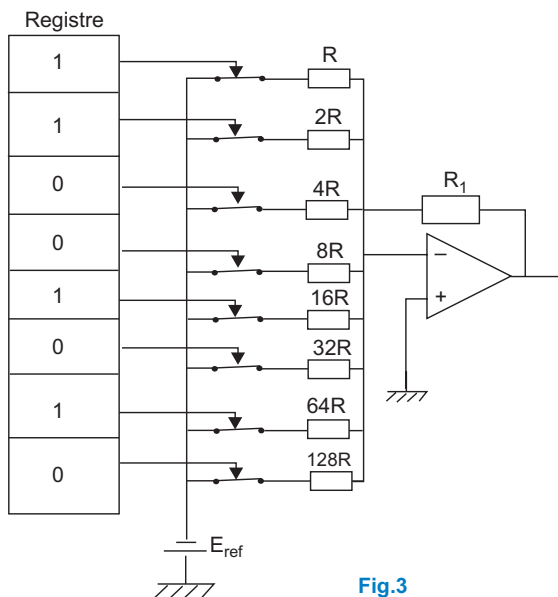


Fig.3

Les variables logiques a_j du registre binaire commandent les interrupteurs k_j associés aux résistances pondérées $128R$ à R .

L'interrupteur k_0 est associé au résistor $128R$.

- 1°) a) Donner l'expression de l'intensité du courant électrique I_0 qui traverse le résistor $128R$.
- b) Etablir l'expression de la tension de sortie u_s du convertisseur en fonction de a_0, R, R_1 et E_{ref} .
- 2°) Montrer que la tension de sortie associée à l'information numérique 11001010 est :

$$u_s = \left[\frac{E_{ref}}{R} + \frac{E_{ref}}{2R} + \frac{E_{ref}}{16R} + \frac{E_{ref}}{64R} \right] \cdot R_1$$

- 3°) Calculer la valeur de tension u_s correspondant à cette information sachant que la tension maximale de sortie de l'amplificateur opérationnel est 10 V.

- 4°) Comment faut-il choisir la valeur de E_{ref} pour assurer un fonctionnement convenable du C.N.A. ?

- 6** On réalise le montage représenté sur la figure 4, qui constitue un convertisseur numérique-analogique (à résistances pondérées). L'amplificateur opérationnel est polarisé par les tensions : $\pm 15V$.

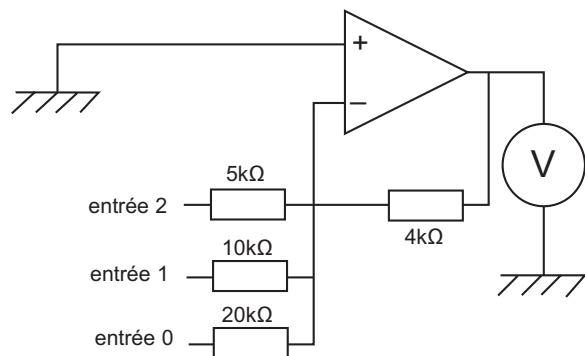


Fig.4

Pour faire entrer un nombre dans ce convertisseur, on le code sous forme binaire et on le traduit électriquement.

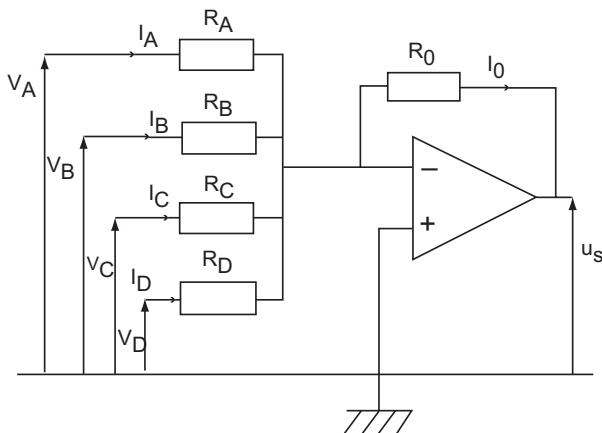
On utilisera la convention suivante : la valeur 1 sera représentée par le potentiel négatif $-5V$, la valeur 0 par le potentiel $0V$. Dans le cas du montage étudié, on peut considérer qu'une entrée non connectée est à 0. Ainsi, la tension de référence est $E_{ref} = -5V$.

Chacune des entrées d'un C.N.A. correspond à un digit du nombre à convertir.

- 1°) Etablir l'expression de la tension de sortie analogique u_s du C.N.A. à 3 bits.
- 2°) Compléter le tableau et le graphe ci-dessous avec les valeurs des tensions obtenues pour chaque valeur numérique entrée dans le convertisseur.
- 3°) Calculer la valeur maximale de la tension de sortie (U_{Smax}) du C.N.A.
- 4°) Quelle est la plus grande valeur numérique N_{max} que l'on peut entrer dans ce C.N.A. ?
- 5°) Calculer la valeur de sa résolution.

Valeur en base 10	Ecriture en base 2	Tension de sortie $u_s = f(N)$
0		
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		

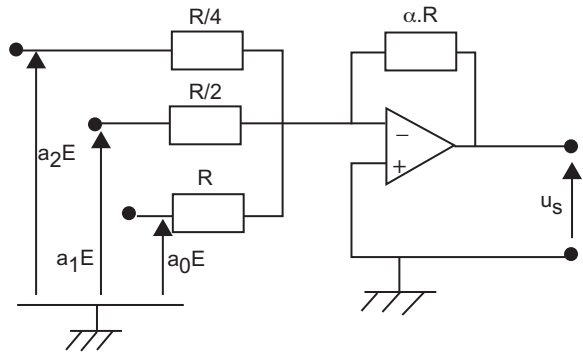
7 Dans le montage ci-dessous, l'amplificateur opérationnel est supposé idéal et fonctionne en régime linéaire. Il est polarisé par une source de tension symétrique ± 15 V.



- 1°) Quel est le rôle de l'amplificateur opérationnel dans ce montage ?
- 2°) a) - Exprimer l'intensité I_A sous forme littérale, en fonction de V_A et R_A .
b) - Exprimer l'intensité I_B sous forme littérale, en fonction de V_B et R_B .
- 3°) Exprimer l'intensité I_0 sous forme littérale, en fonction de u_s et R_0 .
- 4°) Exprimer la tension de sortie u_s en fonction des tensions V_A, V_B, V_C, V_D , et des résistances R_A, R_B, R_C, R_D, R_0 .

5°) Les résistances sont telles que : $R_A = 2.R_B$, $R_A = 4.R_C = 8.R_D$, avec $R_A = 10$ k Ω , $R_0 = 1$ k Ω . En déduire u_s en fonction de V_A, V_B, V_C et V_D .

8 On considère le convertisseur numérique-analogique à 3 bits et à réseau de résistances pondérées ($R, R/2, R/4$) comme le montre la figure ci-dessous.



L'amplificateur opérationnel utilisé est supposé idéal et polarisé ± 10 V.

E représente la tension de référence du convertisseur et est égale à 4,5 V.

Les variables logiques a_j commandent les interrupteurs k_j associés aux résistances pondérées R à $R/4$. La variable a_j ne peut prendre que l'une des valeurs 1 et 0.

- 1°) Pour $a_0 = 1$ et $a_1 = a_2 = 0$, exprimer la tension de sortie u_s en fonction de E, a_0 et α .
- 2°) Exprimer u_s en fonction de E, N et α .
- 3°) En déduire l'expression du quantum q en fonction de α .
- 4°) Calculer la valeur de α pour laquelle le quantum q est égale à -1 V.
- 5°) Proposer un montage permettant de rendre la tension de sortie u_s positive.

9 Etude de texte

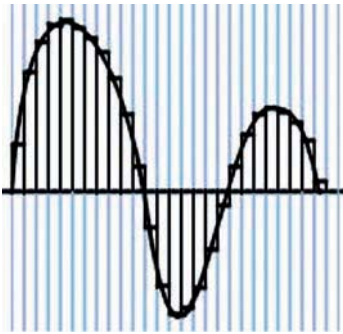
Les phénomènes qui nous entourent sont quasiment tous continus, c'est-à-dire qu'ils passent d'une valeur à une autre sans discontinuité.

Pour pouvoir interpréter ou reproduire le phénomène original de la façon la plus exacte possible, on enregistre les valeurs du phénomène en utilisant le support physique adéquat.

Lorsque le support physique peut prendre des valeurs continues, on parle d'enregistrement analogique. Par exemple, une cassette vidéo, une cassette audio ou un disque vinyle sont des supports analogiques.

Par contre, lorsque le signal ne peut prendre que des valeurs bien définies, en nombre limité, on parle de signal numérique.

La représentation d'un signal analogique est donc une courbe, tandis que celle d'un signal numérique peut être visualisée par un histogramme (Fig.ci-dessous).



De cette façon, il est évident qu'un signal numérique est beaucoup plus facile à reproduire qu'un signal analogique (la copie d'une cassette audio provoque des pertes...).

Sophie Fleury, L'Internaute.

Questions

- 1°) Quelle est la représentation d'un signal numérique en fonction du temps ?
- 2°) Est-il plus simple de reproduire un signal numérique ou bien un signal analogique ?
- 3°) Préciser l'inconvénient d'un support d'enregistrement analogique.
- 4°) Peut-on se limiter au numérique et abandonner l'analogique ?

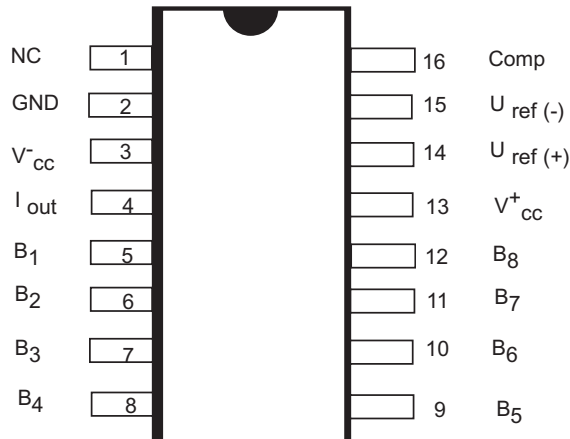
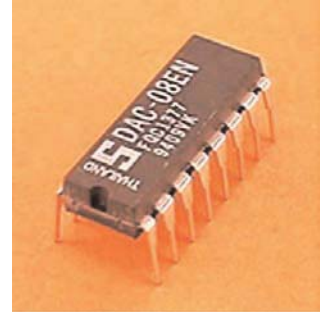
Fiche technique

LE DAC 0808

Pour réaliser un convertisseur numérique-analogique, on peut utiliser un circuit intégré comme le DAC 0808.

Le DAC 0808 est un convertisseur à 8 bits dont la conversion est de type "R-2R". pour la conversion, il est associé à un amplificateur opérationnel utilisé en convertisseur courant / tension.

L'amplificateur opérationnel dont l'entrée inverseuse est reliée à la broche 4 permet d'obtenir la tension analogique de sortie. Un extrait de la fiche technique du constructeur nous donne des informations sur le brochage du circuit DAC 0808.



Brochage

B_1 à B_7 : entrées numériques,
 I_{out} : sortie courant,
 $U_{ref(+)}$, $U_{ref(-)}$: entrées de la tension de référence,
 V_{cc}^+ : alimentation +15 V,
 V_{cc}^- : alimentation -15 V,
Comp : compensation.
NC : non connectée

Fig.1 : Brochage d'un C.N.A.

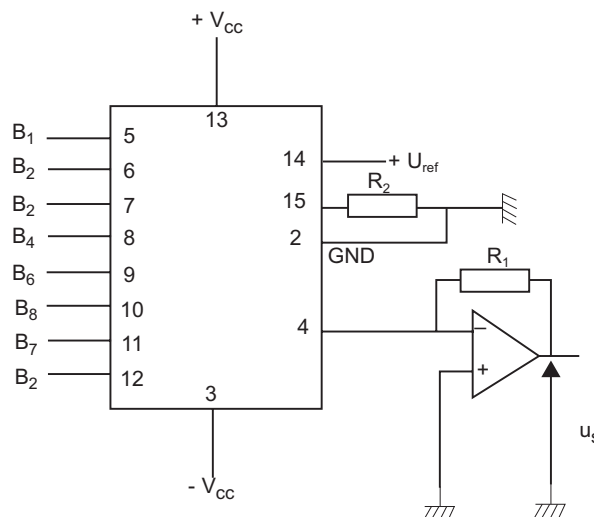


Fig.2 : Schéma du montage d'un C.N.A. avec un DAC 0808

En savoir plus

Le convertisseur numérique-analogique à réseau de résistances « R-2R ».

Le C.N.A. à réseau de résistances « R-2R » utilise un amplificateur opérationnel fonctionnant en régime linéaire, monté en inverseur et un réseau de résistors de résistances R ou 2R comme le montre la figure 1. Les interrupteurs k_j sont commandés par les variables logiques a_j . La tension de référence E_{ref} fixe le potentiel d'entrée.

On se propose d'exprimer la tension de sortie u_s en fonction de E_{ref} , R, R et N.

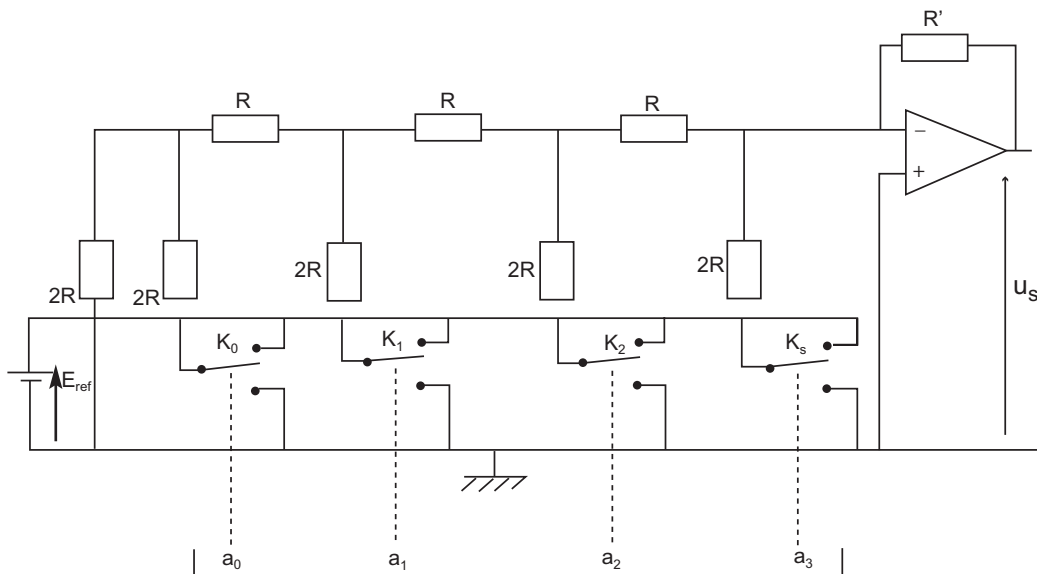


Fig.1 : Schéma du montage d'un C.N.A avec un DAC 0808

Schéma équivalent et mise en équation

Pour $a_j = 1$, l'interrupteur k_j est au potentiel E_{ref} . Par contre, pour $a_j=0$, k_j est à la masse.

Ainsi, le schéma de la figure1 peut se simplifier et on obtient le schéma de la figure 2.

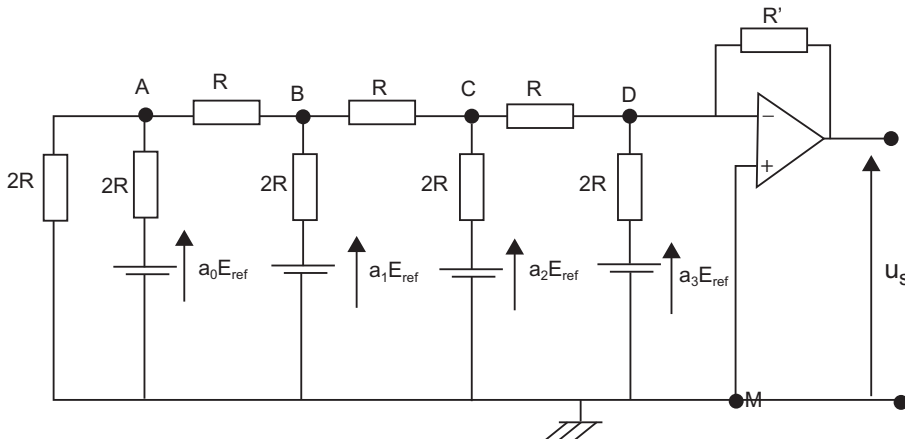


Fig.2 : Schéma simplifié

1ère étape

Pour le dipôle AM, on applique le théorème de Thévenin.

La valeur de la tension en circuit ouvert est $E_{0T} = a_0 E_{ref} \cdot 2R / 4R$.

$$E_{0T} = \frac{a_0 E_{ref}}{2}$$

La valeur de la résistance est : $R_{0T} = 2R // 2R$

$R_{0T} = R$ (Fig.3)

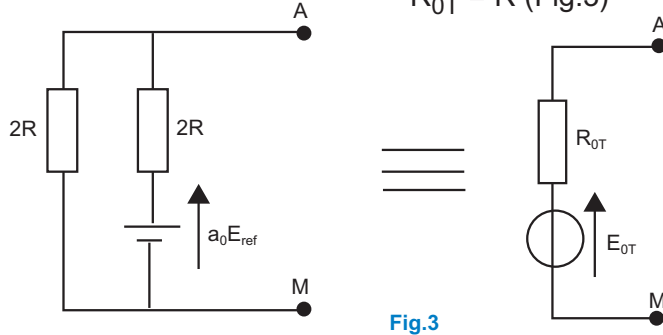


Fig.3

2ème étape

On remplace le dipôle AM par son modèle équivalent (Fig.3) et on applique le théorème de Thévenin au dipôle BM.

Déterminons E_{1T} par application du théorème de superposition :

E_{1T} est la tension aux bornes du dipôle BM en circuit ouvert.

$$E_{1T} = a_1 E_{ref} \frac{R}{2R} + E_{0T} \frac{R}{2R}$$

$$E_{1T} = a_1 \frac{E_{ref}}{2} + a_0 \frac{E_{ref}}{4}$$

Cherchons l'expression de la résistance R_{1T} .

R_{1T} est la résistance du dipôle BM avec les générateurs de tension qui sont éteints.

$R_{1T} = 2R // 2R$, ce qui donne $R_{1T} = R$ (Fig.4).

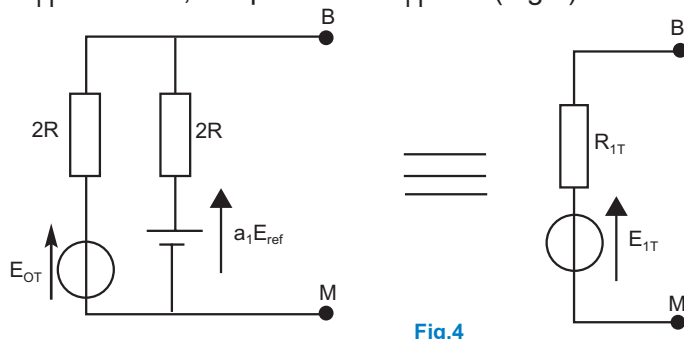


Fig.4

3ème étape

On refait la seconde étape pour le dipôle CM après avoir remplacé le dipôle BM par son modèle équivalent.

Par application du théorème de Thévenin d'une part et le théorème de superposition d'autre part,

on trouve :

$$E_{2T} = a_2 \frac{E_{ref}}{2} + a_1 \frac{E_{ref}}{4} + a_0 \frac{E_{ref}}{8}$$

et la résistance $R_{2T} = 2R//2R$.
 $R_{2T} = R$ (Fig.5).

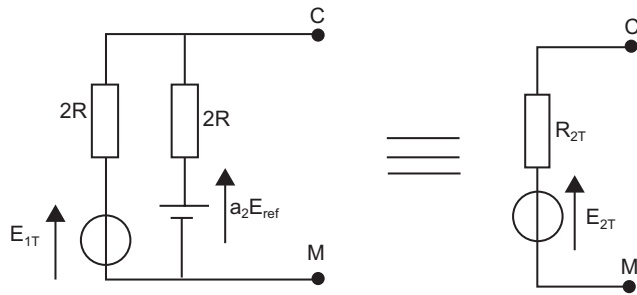


Fig.5

4ème étape

Par application du théorème de Thévenin au dipôle DM, on trouve :

$$E_{3T} = a_3 \frac{E_{ref}}{2} + a_2 \frac{E_{ref}}{4} + a_1 \frac{E_{ref}}{8} + a_0 \frac{E_{ref}}{16}$$

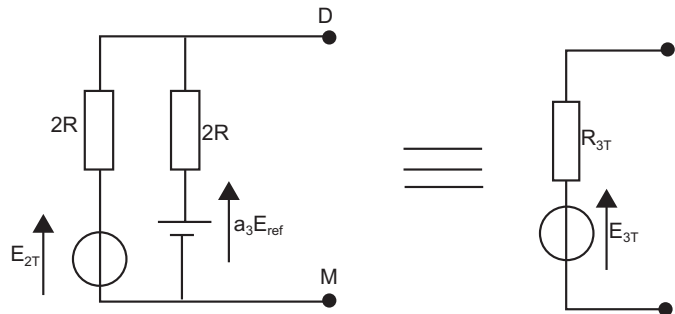


Fig.6

5ème étape

On remplace le dipôle DM par son modèle équivalent.

Ainsi, le montage de la figure 2 se simplifie comme le montre la figure 7.

Par application de la loi des mailles, on peut écrire :

$$E_{3T} - U_R + \varepsilon = 0 \text{ avec } \varepsilon = 0.$$

$$D'autre part, u_s + U_{R'} - \varepsilon = 0.$$

Par application de la loi des nœuds, on a : $I = I' + I''$ avec $I_- = 0$.

$$u_s = - \frac{R'}{R} E_{3T}$$

$$u_s = - \frac{R' E_{ref}}{16R} [8a_3 + 4a_2 + 2a_1 + a_0]$$

$$u_s = - \frac{R' E_{ref}}{16R} N.$$

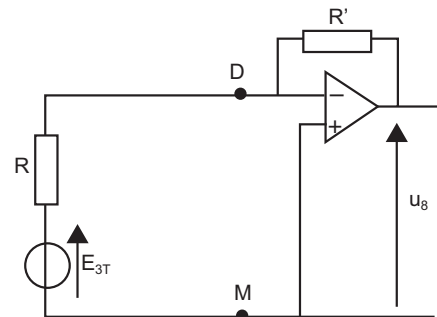


Fig.7

La tension de sortie u_s est proportionnelle à N , ce qui caractérise bien un convertisseur numérique-analogique.

Objectifs

- ◆ Distinguer entre une onde transversale et une onde longitudinale.
- ◆ Reconnaître que la propagation d'une onde est due à une propagation d'énergie sans transport de matière.
- ◆ Réaliser une expérience illustrant la propagation d'une onde sinusoïdale dans un milieu homogène et isotrope.
- ◆ Identifier dans un milieu de propagation donné, les propriétés dont dépend la célérité d'une onde.
- ◆ Etablir l'équation horaire du mouvement d'un point donné du milieu de propagation connaissant celle de la source d'onde progressive et représenter graphiquement le diagramme du mouvement de ce point.
- ◆ Représenter graphiquement l'aspect à un instant donné, du milieu (ou d'une coupe du milieu) de propagation d'une onde progressive.
- ◆ Reconnaître la double périodicité d'une onde sinusoïdale.

Prérequis

SAVOIR

- ◆ Définir un phénomène périodique.
- ◆ Définir la période T et la fréquence N d'un phénomène périodique.
- ◆ Ecrire la relation $N = \frac{1}{T}$
- ◆ Définir une grandeur sinusoïdale.
- ◆ Définir la pulsation et l'amplitude d'une grandeur sinusoïdale.
- ◆ Ecrire la relation $T = \frac{2\pi}{\omega}$ (ou $N = \frac{\omega}{2\pi}$)

SAVOIR FAIRE

- ◆ Utiliser l'oscilloscope.
- ◆ Appliquer les relations :

$$N = \frac{1}{T} \text{ et } \omega = \frac{2\pi}{T} \text{ (ou } \omega = 2\pi N \text{).}$$
- ◆ Représenter graphiquement une grandeur sinusoïdale en fonction du temps.
- ◆ Mesurer les durées et les vitesses à l'aide de photodétecteurs.