

Convertisseur Numérique/Analogique (C.N.A.)
et
Convertisseur Analogique/Numérique (C.A.N.)

I- Introduction :

En électronique, un signal électrique est le plus souvent porteur d'une information. Il existe deux types de signaux électriques :

- Le signal analogique, dont la grandeur représentative à un instant donné est une tension,
- Le signal numérique, dont la grandeur représentative à un instant donné est une valeur binaire.

Il est indispensable pour les besoins des systèmes technique de pouvoir transformer un signal analogique en valeur numérique et réciproquement.

Exemple :

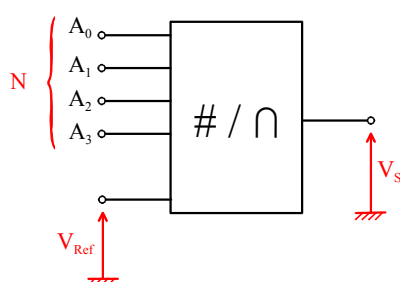
- L'ordinateur assurant le pilotage automatique d'un avion a besoin de données telles que altitude, pression, vitesse, température extérieure etc. Ces données sont mesurées par des capteurs délivrant des grandeurs analogiques représentatives des informations attendues (tensions). Ces informations doivent être converties en valeurs numériques afin de pouvoir être traitées par l'ordinateur.
 ⇒ Nécessité d'une fonction 'Conversion Analogique/Numérique'.
- L'ordinateur délivre ses résultats de calcul sous forme de données binaires qu'il faut convertir en signal analogique (tensions) afin de pouvoir commander différents organes (moteurs, valves etc.).
 ⇒ Nécessité d'une fonction 'Conversion Numérique/Analogique'.

II- Convertisseur Numérique/Analogique (CNA) :

1) Définition :

Le convertisseur Numérique/Analogique (abrégié CNA) est un dispositif électronique (généralement un circuit intégré) permettant d'obtenir en sortie une tension dont la valeur est représentative du mot binaire présenté en entrée.

2) Symbole d'un CNA 4 bits :



- L'entrée N est une valeur numérique binaire comprise entre $0_{(10)}$ et $15_{(10)}$ ($0000_{(2)}$ et $1111_{(2)}$).
- V_{Ref} est la tension de référence.
- V_S est la tension de sortie.

Remarques :

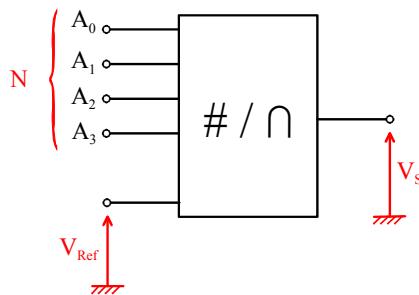
- * Pour fonctionner, un CNA nécessite toujours une ‘**Tension de référence**’.
- * La tension de sortie V_S ne peut être supérieure en valeur absolue à la tension de référence V_{Ref} .
- * Sur certains convertisseurs, la tension de sortie V_S peut être positive ou négative. Son fonctionnement est dit ‘**Bipolaire**’. Ce type de CNA peut nécessiter deux tensions de référence, une positive et une négative.
- * Il existe dans le commerce un très grand nombre de CNA, allant de 4 bits à 64 bits (voire plus).
Exemple de fabricant de CNA : ‘**Analog Device**’, son catalogue peut être consulté sur Internet à l’adresse <http://www.analog.com>.

Application :

Rechercher sur Internet une référence de CNA fabriqué par le constructeur Analog Device et télécharger sa caractéristique technique.

3) Tension pleine échelle :

On appelle ‘**Tension pleine échelle**’ d’un CNA la tension maximale que peut prendre la sortie. Cette tension pleine échelle est obtenue en appliquant à l’entrée du CNA la valeur numérique la plus grande, c’est-à-dire lorsque tous les bits d’entrée sont au niveau logique haut. En théorie (CNA idéal) la tension pleine échelle est égale à la tension de référence, mais dans la réalité (CNA réel), la tension pleine échelle est le plus souvent inférieure à la tension de référence. Elle est fixée à la fabrication du composant et est donnée dans la caractéristique technique du constructeur.

Exemple :

Pour $V_{Ref} = 10V$ et $N = 15$
 ($A_0 = A_1 = A_2 = A_3 = '1'$), on a :
 Pour un CNA idéal : $V_S = 10V$
 Pour un CNA réel : $V_S = 9, \dots$ (Selon doc)

4) Résolution d’un CNA :

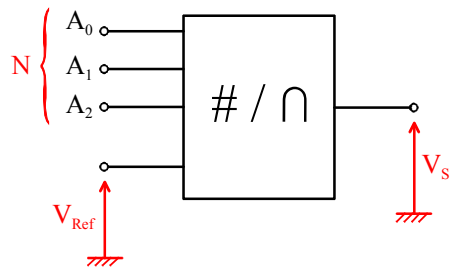
On appelle ‘**Résolution**’ d’un CNA, ou ‘**Pas de progression**’ ou encore ‘**Quantum**’, la plus petite variation de tension s’ajoutant à la sortie lorsque la valeur binaire d’entrée est augmentée de 1 (incrémentée).

D’une manière générale et pour un CNA théorique, en notant ‘ Q ’ la résolution et ‘ n ’ le nombre de bit du convertisseur, on exprimera Q de la manière suivante :

$$Q = \frac{V_{Ref}}{2^n - 1}$$

↳ La résolution d’un CNA est une tension, elle s’exprime donc en volt (V).

Exemple : Soit un convertisseur 3 bits avec $V_{Ref} = 10V$.



La valeur du quantum dépend de la tension de référence V_{Ref} et du nombre de bits n du convertisseur qui détermine le nombre de possibilités.

Dans cet exemple, $Q = \frac{V_{Ref}}{7} = \frac{10}{7}$
 $\Rightarrow Q = 1,428V$

5) Temps de conversion :

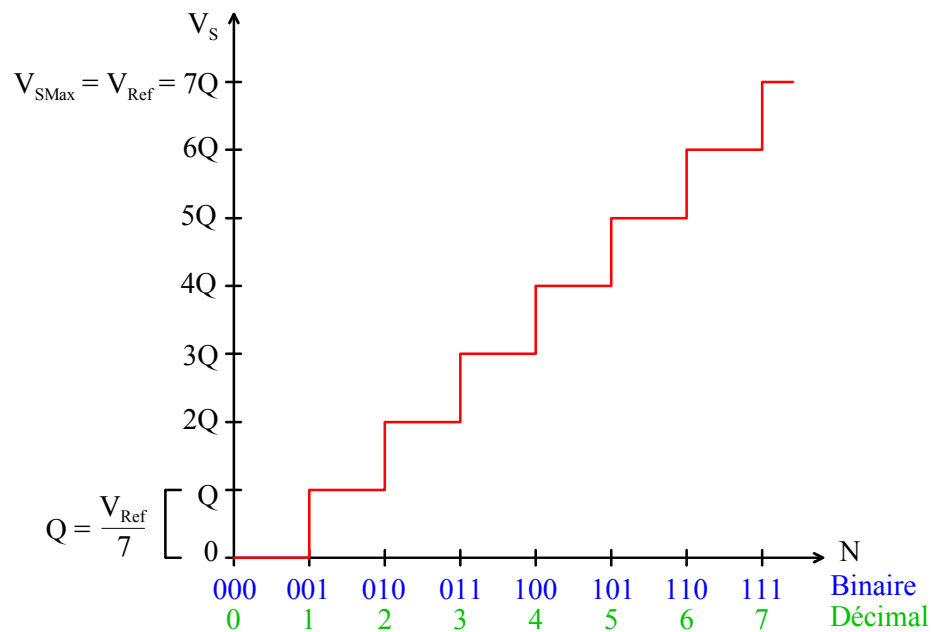
C'est le temps séparant le début d'un cycle de conversion et la disponibilité de la tension résultante en sortie.

6) Calcul de la tension de sortie d'un CNA :

Il s'agit de déterminer la valeur de la tension de sortie V_s en fonction de la valeur binaire N appliquée à l'entrée associée à la valeur décimale $(N)_{10}$. On a :

$$V_s = (N)_{10} \times Q$$

7) Représentation des variations de la tension de sortie V_s en fonction de la valeur numérique d'entrée N :



Conclusion : la tension de sortie varie par palier.

Remarque :

Pour un CNA Réel, la résolution est le plus souvent fixée par le constructeur. Elle dépend de la tension d'alimentation, de la tension de référence et des imperfections du composant.

Application :

Calculer au dixième de millivolt près la résolution Q d'un CNA de 12 bits auquel on applique une tension de référence $V_{Ref} = 9V$.

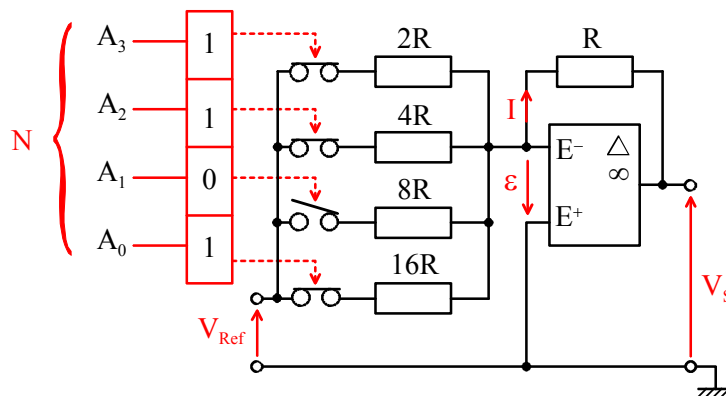
III - Technologie des Convertisseurs Numérique/Analogique :

1) Introduction :

Les technologies des CNA sont, comme tous les composants électroniques, en perpétuelle évolution. A titre d'exemple, citons quelques principes de fonctionnement :

2) CNA à réseau de résistances pondérées :

Chaque bit du mot binaire à convertir commute un courant sur une résistance de poids inversement proportionnel au poids du bit considéré. Les tensions résultantes sont additionnées par une structure 'Amplificateur sommateur'.



A l'aide de la loi des mailles, nous pouvons déterminer les expressions des intensités des courants de branches d'entrées I_3 à I_0 . Par exemple, $V_{ref} - 2R \cdot I_3 + \epsilon = 0$,

$$I_3 = A_3 \cdot \frac{V_{Ref}}{2R}$$

De plus,

$$I_2 = A_2 \cdot \frac{V_{Ref}}{4R}$$

D'après la loi des nœuds : $I = I_3 + I_2 + I_1 + I_0$

$$I_1 = A_1 \cdot \frac{V_{Ref}}{8R}$$

Alors

$$I_0 = A_0 \cdot \frac{V_{Ref}}{16R}$$

$$I = A_3 \cdot \frac{V_{Ref}}{2R} + A_2 \cdot \frac{V_{Ref}}{4R} + A_1 \cdot \frac{V_{Ref}}{8R} + A_0 \cdot \frac{V_{Ref}}{16R}$$

Remarque:

Puisque cette structure 'Amplificateur sommateur' est inverseuse, si $V_{Ref} > 0$ alors $V_S < 0$

En appliquant la loi des mailles, on a : $V_S + RI + \epsilon = 0$

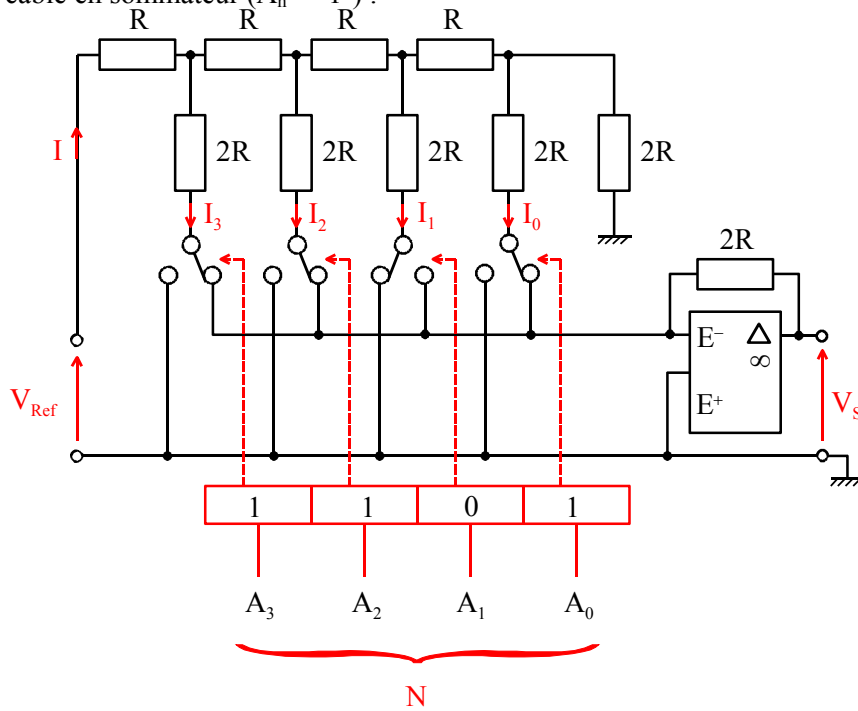
L'A.I.L. fonctionne en régime linéaire $\Rightarrow \epsilon = 0$, il en résulte $V_S = -RI$

Par conséquent,

$$V_S = - \left(A_3 \cdot \frac{V_{Ref}}{2} + A_2 \cdot \frac{V_{Ref}}{4} + A_1 \cdot \frac{V_{Ref}}{8} + A_0 \cdot \frac{V_{Ref}}{16} \right)$$

3) CNA à réseaux R-2R :

Dans ce type de convertisseur, seules deux valeurs de résistances sont utilisées. La tension de référence se distribue sur le réseau R-2R.
 Chaque bit du mot binaire à convertir commute un courant soit à la masse ($A_n = '0'$) soit vers l'A.I.L. câblé en sommateur ($A_n = '1'$) :



Ainsi on a:

$$V_S = -2R (A_3 \cdot I_3 + A_2 \cdot I_2 + A_1 \cdot I_1 + A_0 \cdot I_0)$$

Or, on peut démontrer $I_3 = \frac{V_{Ref}}{4R}$, $I_2 = \frac{V_{Ref}}{8R}$, $I_1 = \frac{V_{Ref}}{16R}$ ET $I_0 = \frac{V_{Ref}}{32R}$,

D'où :

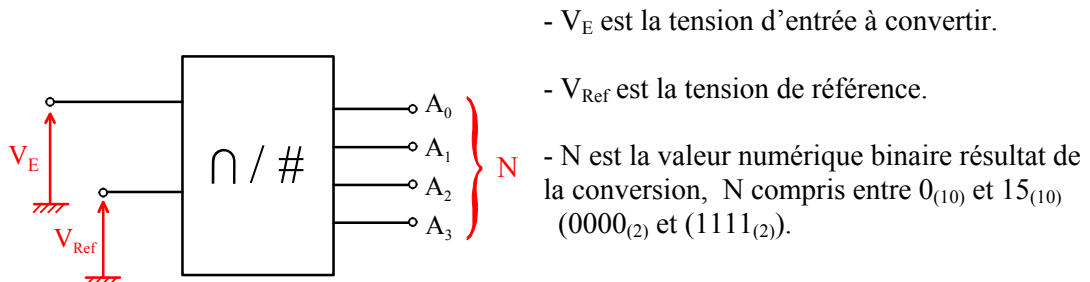
$$V_S = - \left(A_3 \frac{V_{Ref}}{2} + A_2 \frac{V_{Ref}}{4} + A_1 \frac{V_{Ref}}{8} + A_0 \frac{V_{Ref}}{16} \right)$$

IV- Convertisseur Analogique/Numérique (C.A.N.) :

1) Définition :

Le convertisseur Analogique /Numérique (abrégé CAN) est un dispositif électronique (généralement un circuit intégré) permettant d'obtenir en sortie une grandeur numérique codée sur n bits dont la valeur est représentative de la grandeur analogique (tension) présentée en entrée.

2) Symbole d'un CAN 4 bits :



Remarques :

Pour fonctionner, un CAN nécessite toujours une ‘**Tension de référence**’.
 Pour un CAN unipolaire, la tension d’entrée V_E doit être comprise entre 0V et V_{Ref} .

3) Résolution d’un CAN :

On appelle ‘**Résolution**’ d’un CAN, ou ‘**Pas de progression**’ ou encore ‘**Quantum**’, la plus petite variation de tension appliquée à l’entrée qui augmente (ou diminue) la valeur binaire en sortie de 1.

D’une manière générale et pour un CAN théorique, en notant ‘Q’ la résolution et ‘n’ le nombre

de bit du convertisseur, on exprimera Q de la manière suivante :

$$Q = \frac{V_{Ref}}{2^n - 1}$$

↳ La résolution d’un CAN est une tension, elle s’exprime donc en volt (V).

Remarque :

Pour un CAN réel, le quantum est généralement donné dans la documentation du constructeur.

4) Détermination de la valeur binaire de sortie en fonction de la tension d’entrée :

Cette opération se fait en trois étapes

- Division de la tension à convertir V_E par le quantum Q : $N_d = \frac{V_E}{Q}$,
- la valeur N_d obtenue est une valeur décimale,
- Élimination de la partie décimale du résultat de la division (on ne conserve que la partie entière de N_d),
- Conversion de N_d en binaire.

Application :

On applique à l’entrée d’un CAN 8 bits une tension d’entrée $V_E = 6,326V$, la tension de référence V_{Ref} est de 10V.

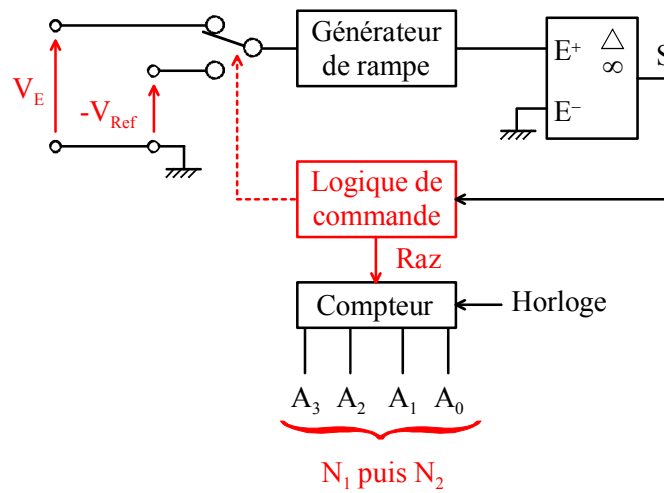
- a) Représenter le CAN.
- b) Calculer la résolution Q.
- c) Déterminer en décimal, puis en binaire le résultat N de la conversion.
- d) Les lignes de sortie du convertisseur étant compatible TTL, indiquer le niveau de tension sur chacune d’elles.

V - Technologie des Convertisseurs Analogique/Numérique :

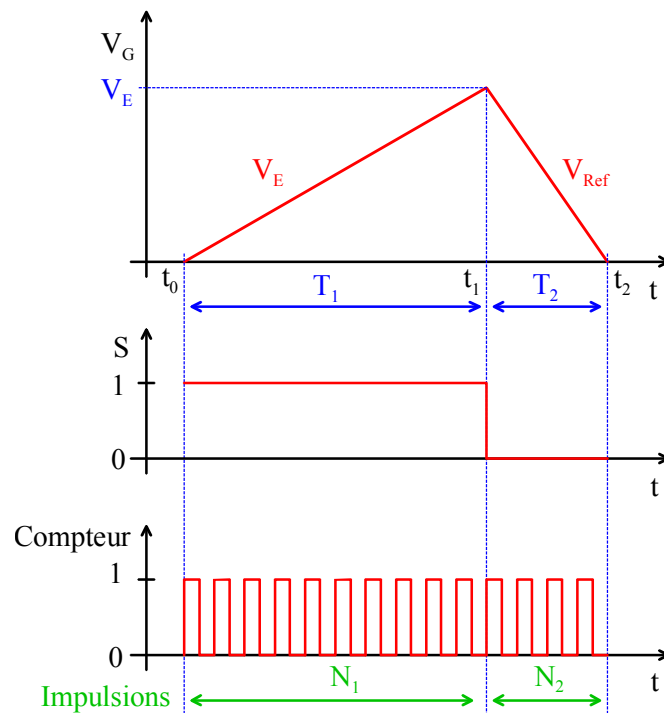
Tout comme CNA, les technologies des CAN sont en perpétuelle évolution. A titre d’exemple, citons quelques principes de fonctionnement :

Le CAN double rampe :

Un CAN double rampe peut être schématisé comme suit :



La tension V_E à convertir est appliquée à l'entrée d'un générateur de rampe qui intègre cette tension durant un temps prédéterminé T_1 . Un compteur mesure ce temps, soit N_1 impulsions. Puis des circuits de commande commutent l'entrée du générateur de rampe sur une tension de référence de polarité opposée à la tension à convertir V_E . La tension en sortie du générateur de rampe décroît jusqu'à s'annuler. Le compteur mesure la durée de cette décroissance, soit N_2 impulsions :



La résultat de la conversion est donné par la valeur N_2 et a pour relation :

$$N_2 = N_1 \frac{V_{Ref}}{V_E}$$

2) Le CAN à approximations successives :

a) La balance de Roverbal :

b)

Comment peser un sac avec une balance de Roverbal pouvant effectuer une pesée dont le poids maximum P_{MAX} est connu et sachant que l'on ne peut mettre qu'un nombre limité de poids dans le plateau opposé de la balance ?

La méthode la plus directe consiste à effectuer une approximation successive de la masse suivant la chronologie suivante.

Méthode de la pesée avec quatre poids :

Si on ne dispose que de quatre poids, ils auront pour masse : $P_{max}/2$, $P_{max}/4$, $P_{max}/8$ et $P_{max}/16$.

Pour commencer, on place le sac à peser sur le plateau gauche de la balance.

On place sur le plateau droit un poids de masse $P_{max}/2$ afin qu'il soit comparé à la masse du sac.

Résultat de la pesée :

- Si le poids est trop important, il est rejeté (enlevé du plateau de la balance), s'il est trop faible, il est conservé sur le plateau de la balance.

On place ensuite sur le plateau droit de la balance un poids de masse $P_{max}/4$. De la même manière, si le poids est trop important, il est rejeté (enlevé du plateau de la balance), s'il est trop faible, il est aussi conservé sur le plateau de la balance.

Et ainsi de suite...

Exemple : Le sac pèse 10Kg, la pesée maximale pouvant être effectuée par la balance de Roberval utilisée est de 12Kg.

Si on ne dispose que de quatre poids, ils auront pour masse : $P_{max}/2=6\text{kg}$, $P_{max}/4=3\text{kg}$, $P_{max}/8=1,5\text{kg}$ et $P_{max}/16=0,75\text{kg}$.

Pour commencer, on place le sac de 10kg sur le plateau gauche de la balance.

On place sur le plateau droit un poids de masse $P_{max}/2=6\text{kg}$ afin qu'il soit comparé à la masse du sac.

Résultat de la pesée :

- le poids est trop faible ($6\text{kg}<10\text{kg}$), il est conservé sur le plateau de la balance.

On place sur le plateau droit un poids de masse $P_{max}/4=3\text{kg}$.

Résultat de la pesée :

- le poids est trop faible ($9\text{kg}<10\text{kg}$), il est conservé sur le plateau de la balance.

On place sur le plateau droit un poids de masse $P_{max}/8=1,5\text{kg}$.

Résultat de la pesée :

- le poids est trop important ($10,5\text{kg}>10\text{kg}$), il est retiré du plateau de la balance.

On place sur le plateau droit un poids de masse $P_{max}/16=0,75\text{kg}$.

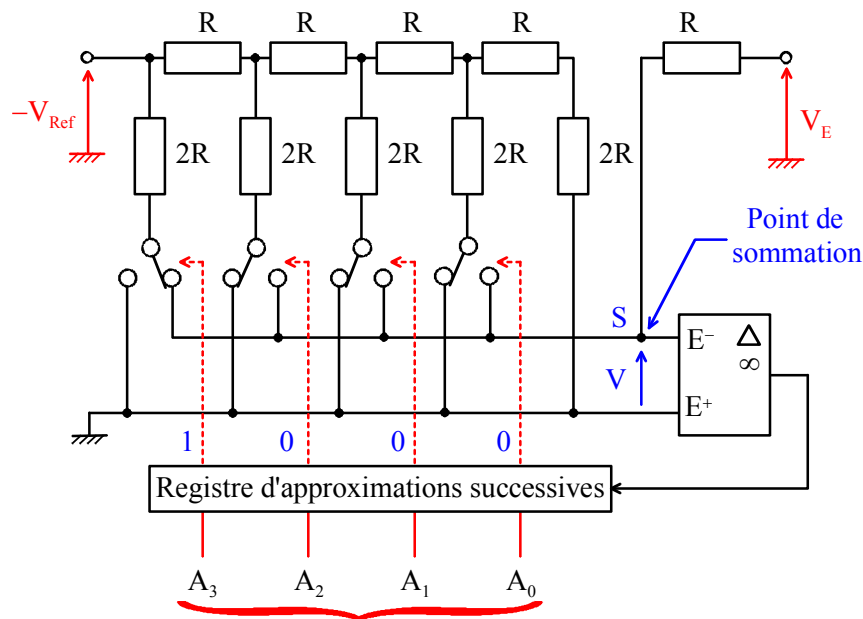
Résultat de la pesée :

- le poids est trop faible ($9,75\text{kg}<10\text{kg}$), il est conservé sur le plateau de la balance.

Résultat de la pesée :

Les quatre poids ont été testés, la pesée indique que le sac pèse 9,75kg alors que son poids réel est de 10kg. La balance de Roberval introduit comme tout autre dispositif de pesée une erreur relative.

c) Etude d'un CAN à approximations successives de 4 bits :



Résultat N de la conversion

La tension V obtenue au point de sommation S dépend de la position des interrupteurs commandés par les bits A₃ à A₀ du registre d'approximations successives. On a :

$$V = V_E - \left(A_3 \frac{V_{Ref}}{2} + A_2 \frac{V_{Ref}}{4} + A_1 \frac{V_{Ref}}{8} + A_0 \frac{V_{Ref}}{16} \right)$$

Au départ de la conversion, seul le bit de poids fort du registre d'approximation successive est à '1' tous les autres bits étant à '0'.

Ainsi au point de sommation S on obtient une tension $V = V_E - \frac{V_{Ref}}{2}$. Le comparateur effectue ensuite une comparaison entre la tension V et 0V :

Si $V > 0$ ($V_E > \frac{V_{Ref}}{2}$) alors le bit de poids fort A₃ est conservé (A₃ = '1') sinon le bit est rejeté (A₃ = '0').

Ensuite le Registre d'Approximations Successives met au niveau '1' le bit de poids n-1, la tension obtenue au point de sommation S vaut $V = V_E - A_3 \frac{V_{Ref}}{2} - \frac{V_{Ref}}{4}$

Si $V > 0$ alors le bit de poids A₂ est conservé (A₂ = '1') sinon le bit est rejeté (A₂ = '0').

Ainsi de suite...

Exemple :

Posons V_{ref} = 10V et V_E = 6,9V. Que vaut N ?

Sommation	Comparaison	État du bit	
$S = \frac{V_{Ref}}{2} = 5V$	5V < 6,9V	Bit conservé	A ₃ = '1'
$S = \frac{V_{Ref}}{2} + \frac{V_{Ref}}{4} = 5 + 2,5 = 7,5V$	7,5V > 6,9V	Bit rejeté	A ₂ = '0'
$S = \frac{V_{Ref}}{2} + \frac{V_{Ref}}{8} = 5 + 1,25 = 6,25V$	6,25V < 6,9V	Bit conservé	A ₁ = '1'
$S = \frac{V_{Ref}}{2} + \frac{V_{Ref}}{8} + \frac{V_{Ref}}{16} = 6,25 + 0,625 = 6,875V$	6,875V < 6,9V	Bit conservé	A ₀ = '1'

Conclusion :

Pour un CAN de 4 bits ayant une tension de référence V_{ref} = 10V, le résultat N de la conversion est : N = 1011.