

Electronique Numérique Cycle Ingénieur TSEI Les convertisseurs Analogiques/Numériques et Numériques/Analogiques (CAN & CNA)

Pr. Abdelmajid FARCHI

Echantillonnage d'un signal

La théorie de l'échantillonnage est à la base des transmissions numériques. La transmission numérique des signaux permet :

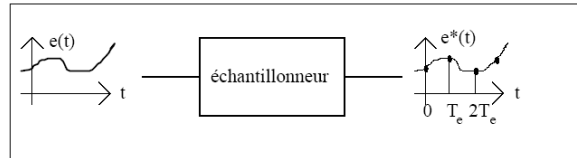
- ❑ d'améliorer la qualité de la transmission par une meilleure immunité aux bruits, les niveaux transmis sont des niveaux logiques '0' ou '1'.
- ❑ de réaliser des traitements mathématiques sur les signaux (filtrage, codage,...).
- ❑ de procéder à un multiplexage temporel, c'est à dire transmettre plusieurs signaux sur une même voie de transmission, cas du téléphone numérique.

Définition

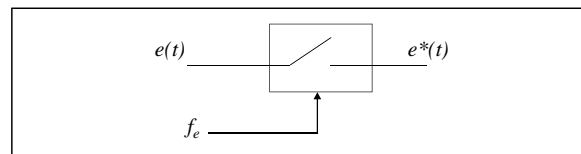
Effectuer un échantillonnage sur un signal continu $e(t)$, c'est fabriquer un nouveau signal $e^*(t)$ nul partout sauf aux instants d'échantillonnage $T_e, 2T_e, \dots, nT_e, \dots$ où $e^*(t)$ prend respectivement les valeurs $e(T_e), e(2T_e), \dots, e(nT_e), \dots$.

Echantillonnage d'un signal

3



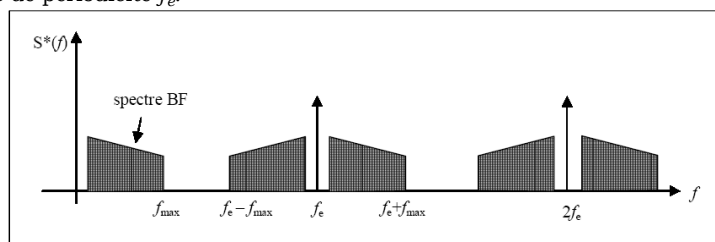
En pratique l'opération d'échantillonnage est réalisée par un simple interrupteur ouvert pendant une durée q avec une période $T_e = 1/f_e$; f_e est appelé la fréquence d'échantillonnage.



Recouvrement spectral et théorème de Shannon

4

Lorsque l'on échantillonne le signal à une fréquence f_e , son spectre est convolué par un peigne de Dirac de périodicité f_e .



On voit alors que si la fréquence maximale du spectre du signal analogique est supérieure à $f_e/2$, l'effet de convolution peut conduire à ce que l'on appelle du **recouvrement de spectre**.

Il est donc impératif pour éviter ce problème de respecter la condition dite de **Shannon** :

$$f_e \geq 2f_{\max}$$

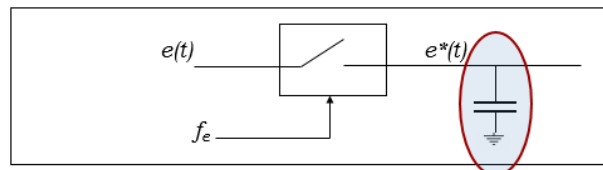
Echantillonneur Bloqueur

5

Le rôle d'un échantillonneur bloqueur (E/B) est de maintenir constante l'amplitude de l'échantillon prélevé tous les T_e durant le temps nécessaire à sa conversion. T_e représente la période d'échantillonnage.

Principe

Réaliser un échantillonneur bloqueur consiste à associer un interrupteur à une capacité.



La capacité joue le rôle d'élément mémoire, l'interrupteur est là pour réactualiser la valeur mémorisée ou bien l'isoler vis à vis de l'entrée.

Echantillonneur Bloqueur

6

L'utilisation d'un interrupteur et d'une capacité introduisent des limitations en terme de rapidité et de maintien :

Présence d'une résistance d'entrée : R_{on}

Cette résistance représente à la fois la résistance de sortie du montage en amont de l'E/B mise en série avec la résistance d'état passant de l'interrupteur. Cette résistance va limiter la possibilité du suivi de la tension. En effet la capacité se charge au travers de cette résistance. On obtient donc une constante de temps :

$$\tau_{Ch} = R_{on} C$$

Présence d'une résistance de sortie : R_{ch}

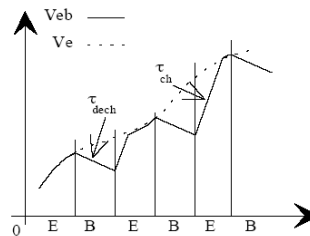
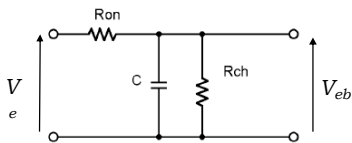
Cette résistance est due à la résistance d'entrée du montage en aval de l'E/B associée à la résistance modélisant les pertes de la capacité. Cela introduit une limitation du maintien de la tension lors de la phase de blocage due à la décharge de la capacité dans cette résistance :

$$\tau_{Déch} = R_{ch} C$$

Echantillonneur Bloqueur

7

Modèle équivalent de l'E/B



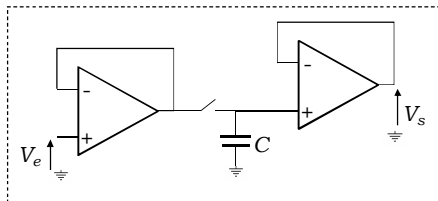
On voit apparaître les deux grandes limitations d'un E/B. Sa vitesse de fonctionnement va être liée à la constante de charge (limitation de la fréquence d'échantillonnage). Sa capacité à maintenir l'échantillon va être liée à la constante de décharge (limitation de la résolution obtenue).

Echantillonneur Bloqueur

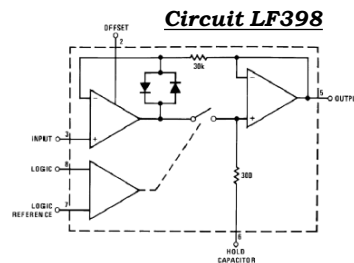
8

Constitution de l'E/B

De manière à s'affranchir de l'environnement amont et aval de l'E/B, on dispose en entrée et en sortie de l'E/B deux suiveurs :



Le schéma dépend des performances de l'interrupteur analogique K qui n'est jamais parfait : résistances parasites, temps de fermeture et d'ouverture, etc...

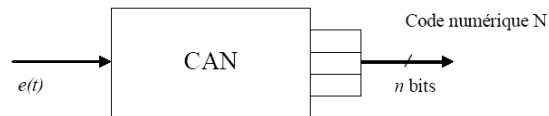


Convertisseurs Analogique \leftrightarrow Numérique

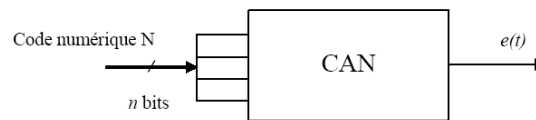
9

Un Convertisseur Analogique-Numérique **CAN** transforme une tension analogique $e(t)$ en une série de codes numériques, souvent codés en binaire sur n bits.

$e(t)$ peut être une tension continue ou une tension variable en fonction du temps.



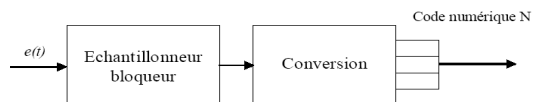
Un Convertisseur Numérique Analogique **CNA** transforme une série de codes numériques en une suite de tensions qui varient en fonction du temps.



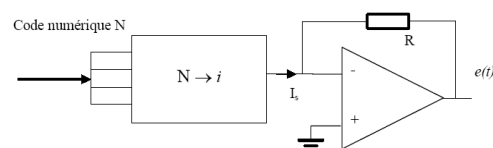
Convertisseurs Analogique \leftrightarrow Numérique

10

Pour les CAN, le signal est déjà échantillonné et bloqué comme vu précédemment. Pendant ce temps de blocage, un circuit complémentaire convertit la tension bloquée en une valeur numérique. Il est évidemment nécessaire que cette conversion se fasse dans le laps de temps de blocage.



Pour les CNA, la première étape consiste à convertir le code numérique en une grandeur analogique, en règle générale un courant. Plusieurs types de conversion existent. Le courant est ensuite converti en une tension par un étage de sortie à base d'un amplificateur opérationnel monté en inverseur.



Caractéristiques des convertisseurs

11

La tension de référence

Pour effectuer sa conversion, le convertisseur a besoin d'une tension de référence à laquelle il compare les tensions à convertir. Cette tension est souvent intégrée directement dans le composant. On la notera E_{ref} . Sa stabilité est très importante car toute fluctuation de sa valeur peut entraîner des erreurs dans les conversions.

La pleine échelle

Il s'agit de la tension analogique maximale acceptée par le CAN (respectivement délivrée en sortie par le CNA). Elle peut être

$$\begin{array}{ll} \text{unipolaire} & 0 < e(t) < E_{\max} \\ \text{bipolaire} & -E_{\max} < e(t) < E_{\max} \end{array}$$

Le nombre de bits

Le code binaire N en entrée (respectivement en sortie) est codé sur n bits. Cela donne 2^n combinaisons.

Caractéristiques des convertisseurs

12

La résolution

La résolution est le pas minimum de codage, appelée ***pas de quantification***. Elle est liée à la pleine échelle et au nombre de bits :

$$\begin{array}{ll} q = \frac{E_{\max}}{2^n} & \text{dans le cas d'un CAN/CNA unipolaire} \\ q = \frac{2E_{\max}}{2^n} & \text{dans le cas d'un CAN/CNA bipolaire} \end{array}$$

On peut noter que plus le nombre de bits est grand, plus la résolution est bonne. La tension de référence doit être impérativement stable à mieux que la résolution.

Fréquence d'échantillonnage maximale

C'est la fréquence d'échantillonnage à laquelle peut travailler le CAN. Elle dépend de sa structure interne. Le signal à l'entrée ne pourra donc pas avoir de composante spectrale supérieure à $f_{\max} / 2$ pour respecter le théorème de Shannon. Pour un CNA, c'est la fréquence maximale où les codes numériques peuvent être convertis en tension analogique en sortie.

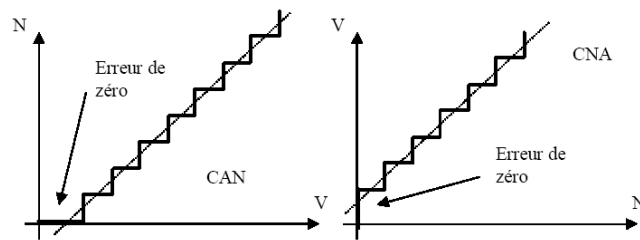
Caractéristiques des convertisseurs

13

Erreur de zéro ou de décalage

C'est l'écart entre la tension correspondant normalement au code 0 et la tension d'entrée (resp. de sortie) réelle pour laquelle le code de sortie est effectivement 0.

Elle est exprimée en % du pas de quantification ou en % de la tension de référence. Elle doit être la plus faible possible.



La quantification

14

La quantification représente le passage de la valeur analogique à la valeur numérique (et réciproquement). Cette valeur numérique codée sur n bits est un multiple de la résolution q .

Deux principales familles de méthodes existent : **par troncature et par arrondi**.

Quantification par arrondi

La tension $e(t)$ est arrondie au multiple de la résolution le plus proche :

$$\text{Si } \left(n - \frac{1}{2}\right)q < e(t) < \left(n + \frac{1}{2}\right)q \text{ alors } e^*(t) = nq$$

Quantification par troncature

La tension $e(t)$ est tronquée (comme une partie entière) au multiple de la résolution juste en-dessous :

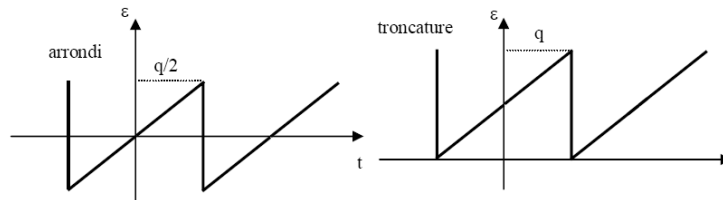
$$\text{Si } nq < e(t) < (n+1)q \text{ alors } e^*(t) = nq$$

On peut exprimer $\varepsilon(t)$ l'erreur de quantification, elle sera alors :

$$\varepsilon(t) = e(t) - e^*(t)$$

La quantification

15



On peut relever deux paramètres importants :

La valeur moyenne de $\varepsilon(t)$ est nulle pour le cas de la quantification par arrondi et égale à $v_{\text{moy}} = q/2$ dans la cas de la quantification par troncature. Le premier cas est donc meilleur.

Arrondi $v_{\text{eff}} = \frac{q}{\sqrt{12}}$

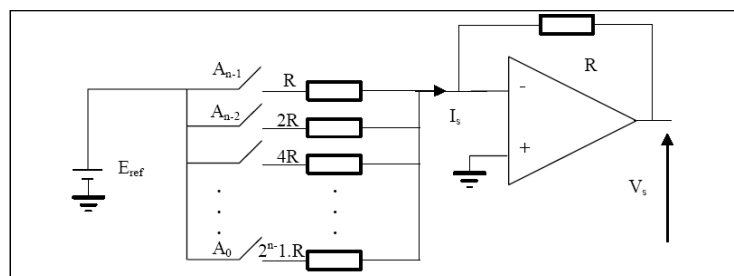
Troncature $v_{\text{eff}} = \frac{q}{\sqrt{3}}$

La **quantification par arrondi est donc généralement préférable** car l'erreur est minimisée. Toutefois la quantification par troncature est parfois plus simple à réaliser.

Convertisseurs CNA

16

CNA à résistances pondérées



en adoptant la notation suivante : si $A_x = 0$ alors, l'interrupteur x est ouvert, si $A_x = 1$ alors le Switch est fermé. Les switches sont ainsi actionnés par des bits de commandes.

On obtient alors :

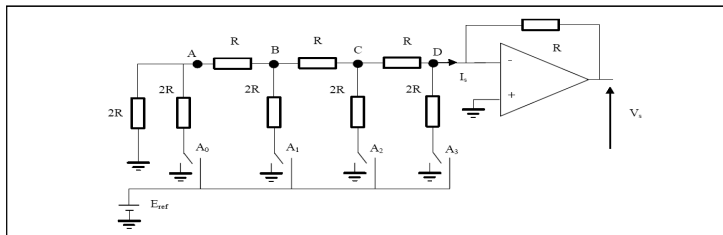
$$V_s = -E_{\text{ref}} \left(\frac{A_0}{2^{n-1}} + \frac{A_1}{2^{n-2}} + \frac{A_2}{2^{n-3}} + \dots + \frac{A_{n-1}}{2^0} \right)$$

Convertisseurs CNA

17

CNA à réseau R-2R

Le principe d'un CNA à réseau R-2R est illustré par un exemple 4 bits.



Par superposition on calcule le courant I_s .

$$V_s = -\frac{E_{ref}}{2^4} (A_0 + 2A_1 + 4A_2 + 8A_3)$$

dans ce type de convertisseurs : lenteur due aux commutations et précision fortement dépendante des valeurs de résistances.

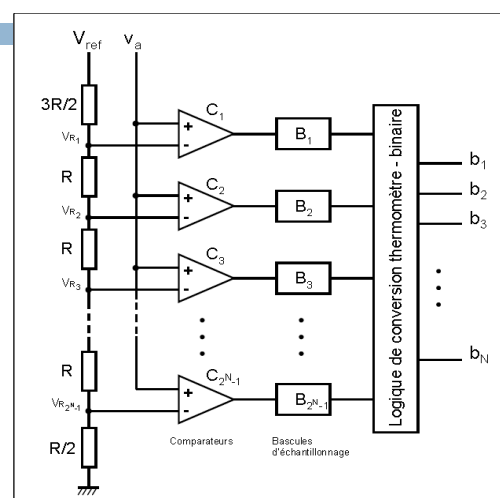
Convertisseurs CAN

18

Un CAN flash à N bits comporte $2^N - 1$ comparateurs, $(2^N - 1)$ bascules et une logique de conversion.

On obtient, en sortie des comparateurs un code thermomètre sur $2^N - 1$ bits, d'où la nécessité d'inclure une logique de conversion du code thermomètre en un code binaire classique.

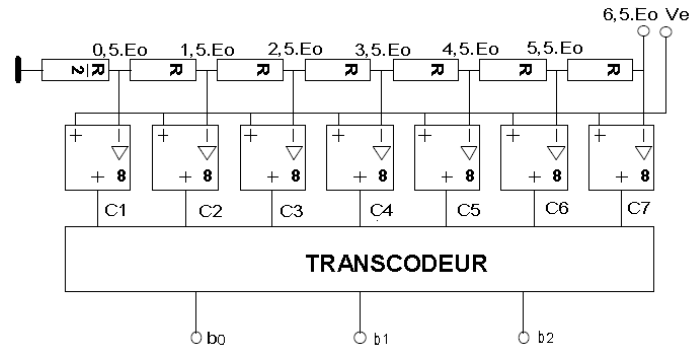
La conversion est réalisée en un seul cycle d'horloge, ce type de convertisseur est donc extrêmement rapide.



Convertisseurs CAN

19

CAN parallèle à 3 bits



Convertisseurs CAN

20

CAN parallèle ou Convertisseur Flash

La conversion est faite en un coup d'horloge, c'est un système qui est très rapide (1->300MHz) mais qui coûte très cher. Utilisé en vidéo (30MHz), il est limité à 12 bits (coût et fabrication de l'encodeur).

Le passage d'un code « thermométrique » au code binaire est très gourmand en terme de surface de silicium. ($2^n - 1$ comparateurs) et consomme de la puissance.

| | | | |
|--------|---------|-------|---------------------|
| 8 bits | 400 MHz | 2.7 W | 6x8 mm ² |
| 6 bits | 6 GHz | 2 W | 3x4 mm ² |

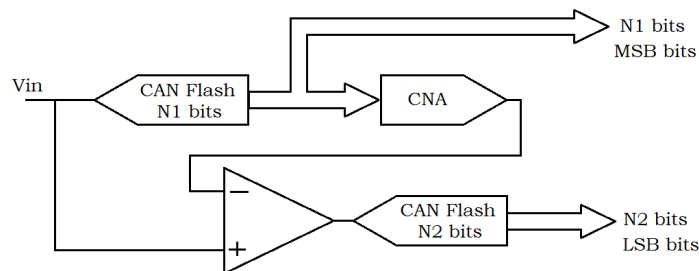
Convertisseurs CAN

21

Convertisseur Semi-Flash

La conversion se fait en deux étapes :

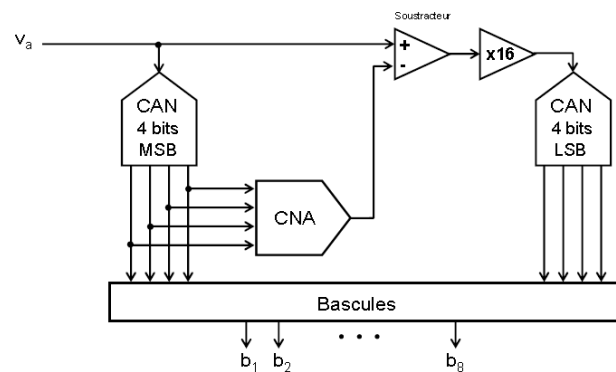
- Phase 1 : on utilise un premier CAN Flash qui détermine les principaux bits de poids fort.
- Phase 2 : on soustrait la tension des bits de poids fort à la tension d'entrée pour ensuite déterminer les bits de poids faible.



Convertisseurs CAN

22

Convertisseur Semi-Flash 8 bits



Convertisseurs CAN

23

Convertisseur Semi-Flash 8 bits

Un premier convertisseur parallèle (CAN 4bits MSB) détermine les bits de poids fort correspondant au signal analogique v_a . Le résultat de cette conversion partielle est stocké dans un registre de bascule en attendant la fin de la conversion.

Un CNA, sur 4 bits également, reconverti le mot obtenu en un signal analogique qui est soustrait à v_a .

Un second CAN parallèle sur 4 bits (CAN 4 bits LSB) permet de déterminer les 4 bits de poids faible. Avant cette dernière conversion, le signal analogique est amplifié avec un gain $2^4 = 16$, afin d'être recalé en pleine échelle ; cela permet d'utiliser deux CAN identiques ayant la même tension de référence.

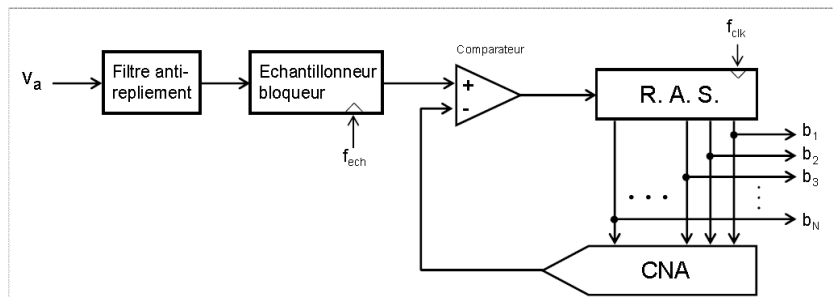
Les deux CAN utilisés sont des CAN Flash, ainsi une conversion est réalisée en deux coups d'horloge. Cette durée, $2T_{clk}$, correspond à un retard entre l'instant où le signal analogique est présenté en entrée du CAN et l'instant où la conversion est terminée.

Convertisseurs CAN

24

CAN à approximations successives

Le principe d'un CNA à approximations successives est représenté sur la figure suivante :



Convertisseurs CAN

25

CAN à approximations successives

Ce type de CAN dépend fortement du CNA interne. Bien qu'il procède par plusieurs étapes successives, si le CNA est rapide, l'horloge de cadencement peut être assez haute et le convertisseur assez rapide également.

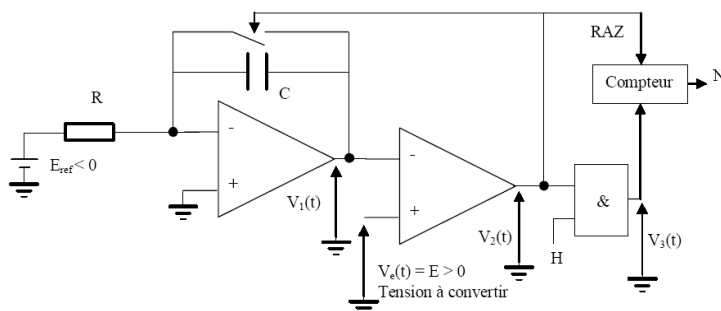
Le registre élabore n bits $b_N \dots b_2 b_1$ par une suite de comparaisons cadencées par une horloge. Si $C = 1$, alors le registre met le bit de poids le plus fort à 1. Si ce bit est déjà à 1, c'est le bit de poids juste inférieur qui est mis à 1, et ainsi de suite. Si $C = 0$, le registre repère le bit de poids le plus faible qui est déjà à 1 noté b_x ; ce bit est mis à 0 et le bits b_{x-1} est mis à 1. S'il s'agit de b_1 , la série de comparaisons s'arrête et la valeur obtenue est la valeur finale.

Convertisseurs CAN

26

CAN simple rampe

Le principe d'un CAN simple rampe est illustré ci-dessous :



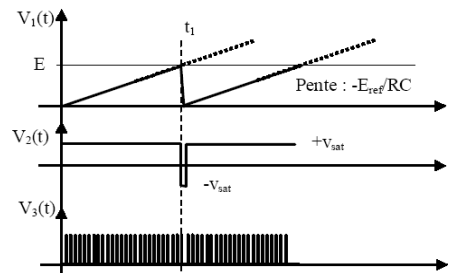
Le premier AOP est un système intégrateur.

$$V_1(t) = -\frac{E_{ref}}{RC}t + E_0$$

Convertisseurs CAN

27

La tension à la sortie du premier AOP croît linéairement avec une pente positive. Lorsque sa valeur arrive à E , le deuxième AOP bascule en saturation négative, le condensateur se décharge quasiment instantanément, et ainsi de suite. Le & logique n'est là que pour passer en raisonnement numérique. On considère que la période de l'horloge H est très petite devant la constante de temps de charge du condensateur. Les chronogrammes des différentes tensions sont reportés ci-dessous.



Convertisseurs CAN

28

N représente le nombre de coups d'horloge H de période T pendant le temps de charge t_1 .

On obtient donc

$$N = -\frac{RC}{E_{ref}T} E$$

On obtient bien un code N proportionnel à une tension E .

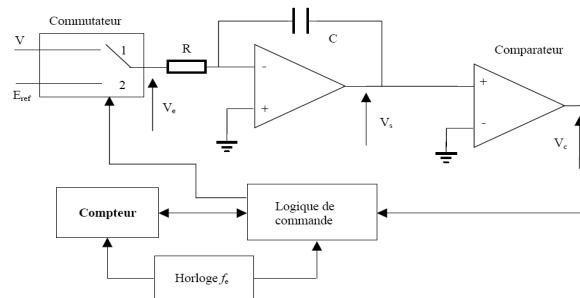
Dans ce type de CAN, la précision sur N est assez mauvaise car N dépend de trop de paramètres : R , C , E_{ref} et T . On peut connaître assez finement T , et assez bien E_{ref} . Mais R et C dépendent de la température d'une manière forte, ce qui induit une incertitude sur la pente de charge à tout instant.

Convertisseurs CAN

29

CAN double rampe

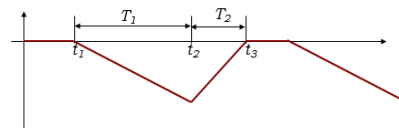
C'est le type de convertisseur le plus utilisé, son schéma de principe est donné par:



Au départ, le switch est positionné sur la tension d'entrée V (tension à convertir), l'intégrateur intègre la tension V jusqu'à ce que le compteur atteigne sa valeur maximale 2^N pendant un temps T_1 qui correspond à un nombre d'impulsion $n_1 = 2^N$.

Convertisseurs CAN

30



Le passage du compteur à 0 permet le basculement du switch sur la tension de référence E_{ref} qui est négative, l'intégration fait accroître V_s jusqu'à atteindre la tension nulle. Le temps d'intégration est T_2 correspondant à un nombre d'impulsions compteur égal à n_2 .

$$V_s = -\frac{1}{RC} \int_{t_1}^{t_2} V dt - \frac{1}{RC} \int_{t_2}^{t_3} E_{ref} dt = 0 \quad \rightarrow \quad V = |E_{ref}| \frac{T_2}{T_1}$$

$$V = |E_{ref}| \frac{n_2}{2^N}$$

La tension V est alors proportionnelle à n_2 et reste indépendante de la constante de temps RC de l'intégrateur.

Convertisseurs CAN

31

Bilan comparatif rapide des CAN

| | Durée de conversion | Fréquence Utilisation | Résolution | Surface analogique | Surface Numérique | Consommation |
|----------------------------|---------------------|-----------------------|------------|--------------------|-------------------|--------------|
| Simple rampe | 2^N Cycles | 100 KHz | 10-16 bits | 100 transistors | 100 Portes | 10mW |
| Double rampe | 2^{N+1} Cycles | 100KHz | >16 bits | 150 transistors | 150 Portes | 10mW |
| Approximations successives | N Cycles | 1 MHz | 14-16 bits | 100 transistors | 100 Portes | 1mW |
| Flash | 1 Cycle | >100 MHz | 12-14 bits | 2500 transistors | 5000 Portes | 1 W |