

Informatique Embarquée (IE)

(Embedded Systems)

Cours n°3

Convertisseur Numérique-Analogique (CNA)
(Digital to Analog Converter – DAC)

Convertisseur Analogique-Numérique (CAN)
(Analog to Digital Converter – ADC)

olivier.lourme@univ-lille.fr

Analogique et Numérique

Constatation :

1. Les grandeurs du monde physique sont souvent analogiques.

Grandeur analogique = qui peut prendre une infinité de valeurs entre deux extrêmes.

Exemple : température, pression, débit, signal audio, vitesse, tension, etc.

- **Grandeur analogique témoignant du monde physique : MESURE**

Exemple : une température (en °C).

Un transducteur ou capteur transforme cette grandeur en un signal électrique, souvent une tension (en V). Celle-ci est en général proportionnelle à la grandeur à mesurer.

Exemple : coefficient de proportionnalité d'un capteur de température : 10 mV/°C.

- **Grandeur analogique influant sur le monde physique : ACTION**

Exemple : un débit d'eau chaude (en m³/h).

Un actionneur reçoit en entrée une tension de pilotage (en V) pour imposer cette grandeur. Celle-ci est en général proportionnelle à la tension de pilotage .

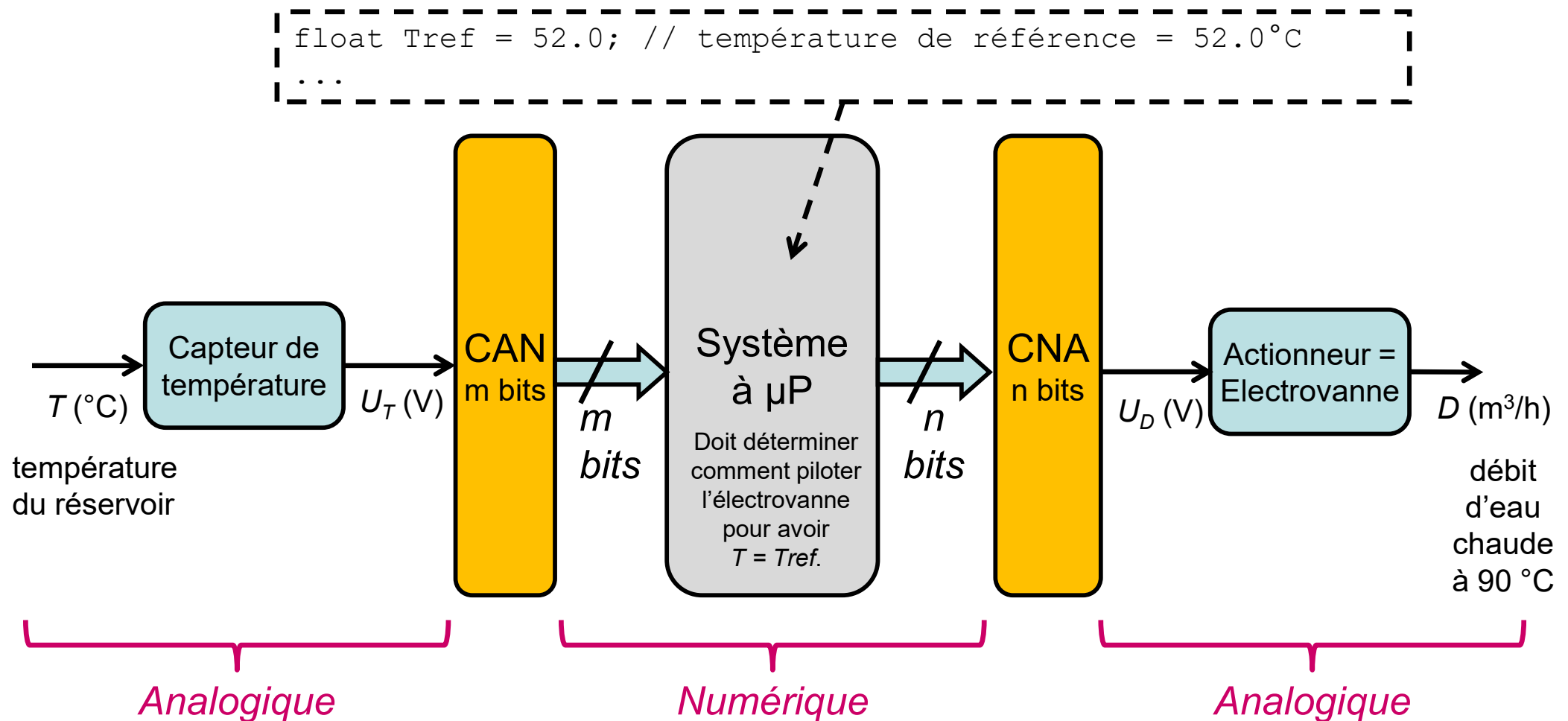
Exemple : coefficient de proportionnalité d'une électrovanne : 5.0 (m³/h) / V.

2. Le traitement de l'information se fait par des systèmes numériques.

Un système numérique ne manipule que des données numériques (binaires) : des bits.

→ **Il faut donc deux conversions :**

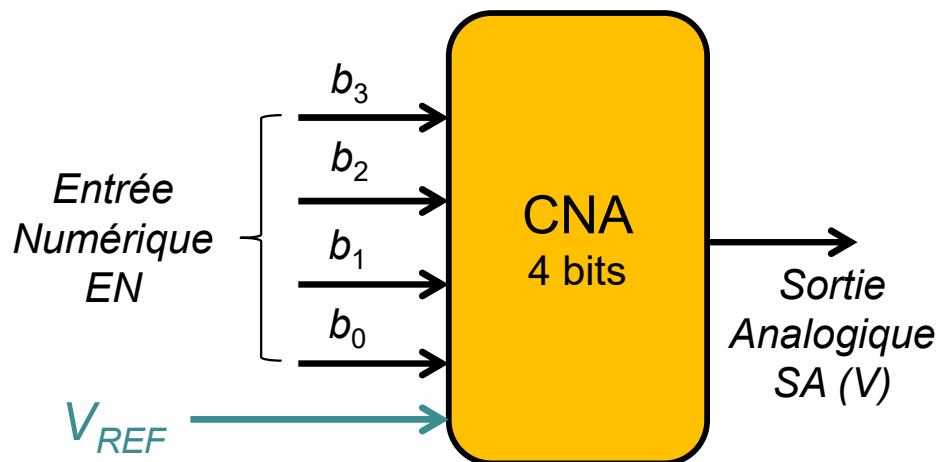
- Une transformant une tension Analogique en son équivalent Numérique : **CAN**.
- Une transformant une grandeur Numérique en son équivalent Analogique : **CNA**.



Régulation de température d'un réservoir d'eau : On veut $T = T_{\text{ref}} = 52.0^{\circ}\text{C}$ dans le réservoir.

CNA : unipolaire

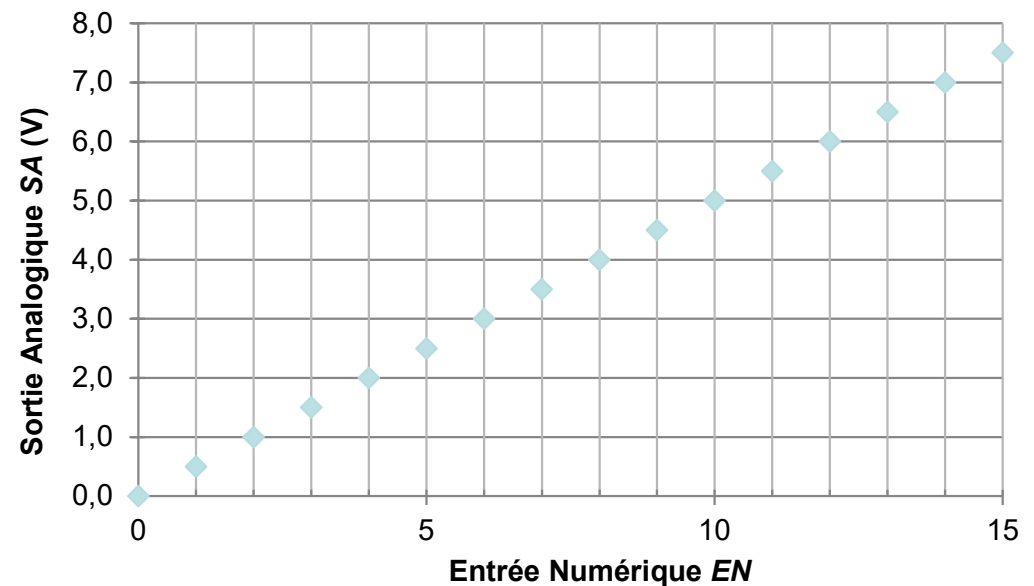
On commence par présenter le CNA car dans de nombreux CAN il y a un CNA.
Exemple sur un CNA à 4 bits de résolution (i.e. $n=4$) et de type unipolaire :



$b_i \in \{0, 1\}$ et a un poids de 2^i

EN va de 0b0000 (0) à 0b1111 (15).

pas de progression = quantum = q = ____



SA = ____

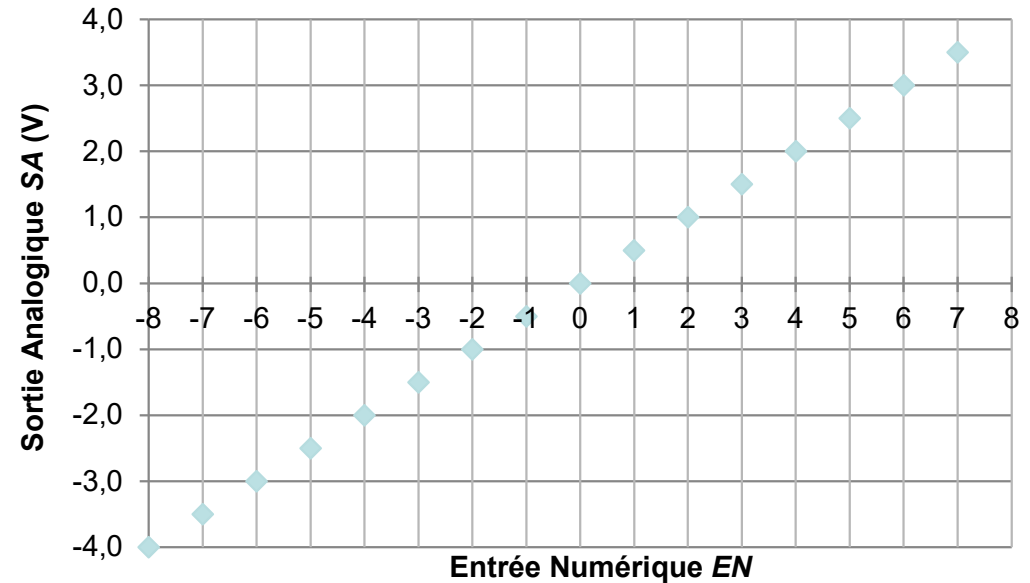
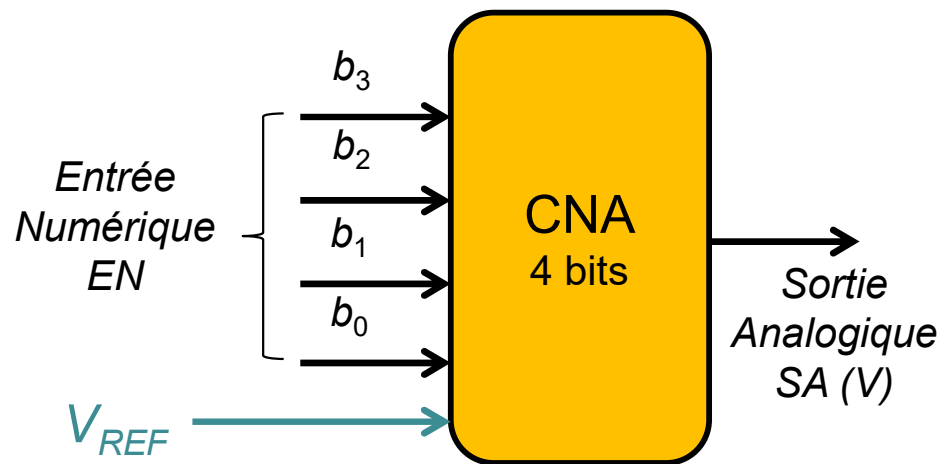
Sortie Pleine Echelle SPE = ____

Exercice : Quelle est le quantum q d'un CNA 8 bits dont $SPE = 5.0$ V ? D'un CNA 10 bits dont $SPE = 5.0$ V ?

Mise en œuvre : On impose SPE sur une broche du CNA appelée en général V_{REF} .

CNA : bipolaire

CNA 4 bits de type bipolaire : *EN et SA sont signés.*



EN est exprimée en code complément à 2 pour les nombres négatifs.

EN va de 0b1000 (-8) à 0b0111 (+7).

Rappel : -1 est codé 0b1111.

*On a toujours : $SA = q * EN$*

Mise en œuvre : En général, on impose $|SPE|$ sur la broche du CNA appelée V_{REF} .

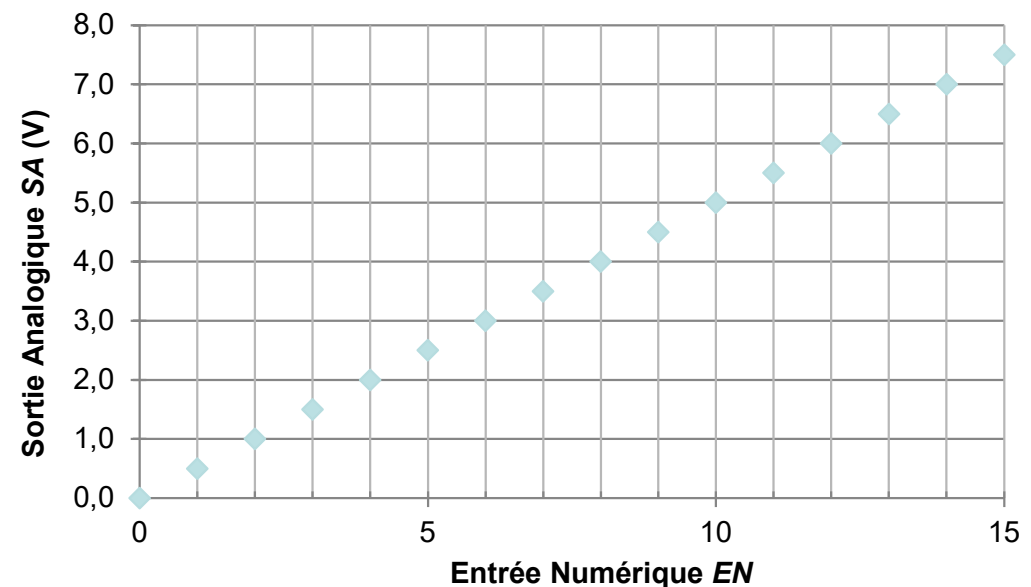
CNA : spécifications dans les *datasheets*

Les spécifications à chercher dans les *datasheets* :

- *Resolution* : en nombre de bits (Rappel : le quantum s'en déduit connaissant la *SPE*).
Exemple: Si *resolution* = 8 bits et *SPE* = 5.0 V, alors quantum $q = 5.0 / 255 = 19.6 \text{ mV}$.
- *Settling Time* : on fait passer l'*EN* de 0b00..00 à 0b11..11, on regarde le temps pour que *SA* se stabilise (ordre de grandeur : quasi instantané, qq 10 ns)
- *Offset Error* : tension présente sur *SA* quand *EN* = 0b00..00 (ordre de grandeur : qq quantum)
- *Gain Error* : différence entre *SPE* théorique et *SPE* réelle (ordre de grandeur : qq quantum)

Il y a aussi des spécifications plus subtiles :

- *Differential NonLinearity error* (DNL)
- *Integral NonLinearity Error* (INL)
- *Total Error*

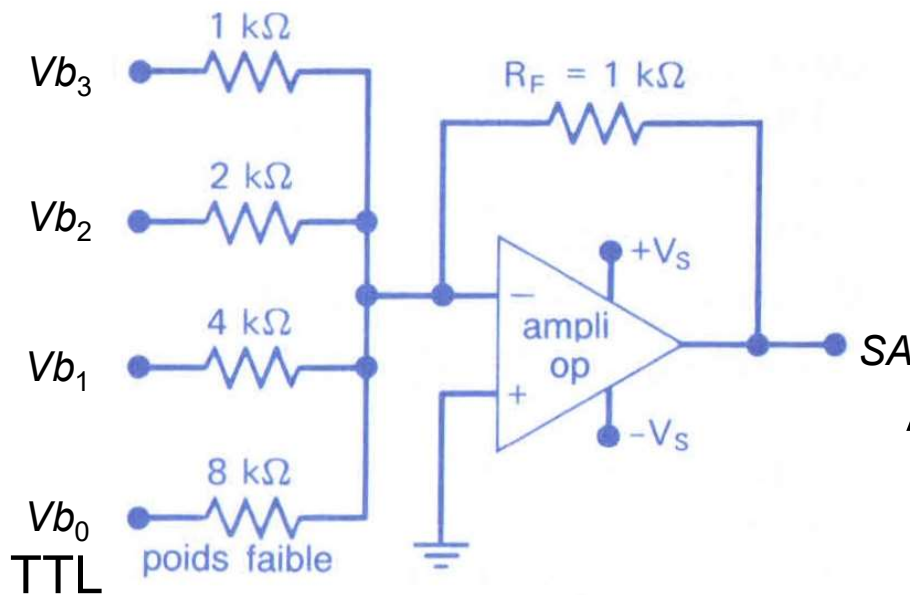


Le document suivant (Texas Instruments) présente toutes les spécifications utiles concernant les CNAs et les CANs :

<http://www.ti.com/lit/an/slaa013/slaa013.pdf>

CNA : réalisations en circuit intégré (1/3)

A – CNA à résistances pondérées et ampli op. sommateur



Nous avons (théorème de Milleman) :

$$SA = -(V_{b3} + 0.5V_{b2} + 0.25V_{b1} + 0.125V_{b0})$$

Et, si de plus :

b_i	Vb_i (V)
0	0.0
1	5.0

Alors, on a ce qu'on veut : **(A)**

$$SA = -(5.0 * b_3 + 2.5 * b_2 + 1.25 * b_1 + 0.625 * b_0)$$

$$SA = -0.625 \times EN \quad EN \text{ allant de } 0b0000 \text{ à } 0b1111.$$

Problème : Les Vb_i sont imposées par exemple par des sorties TTL :

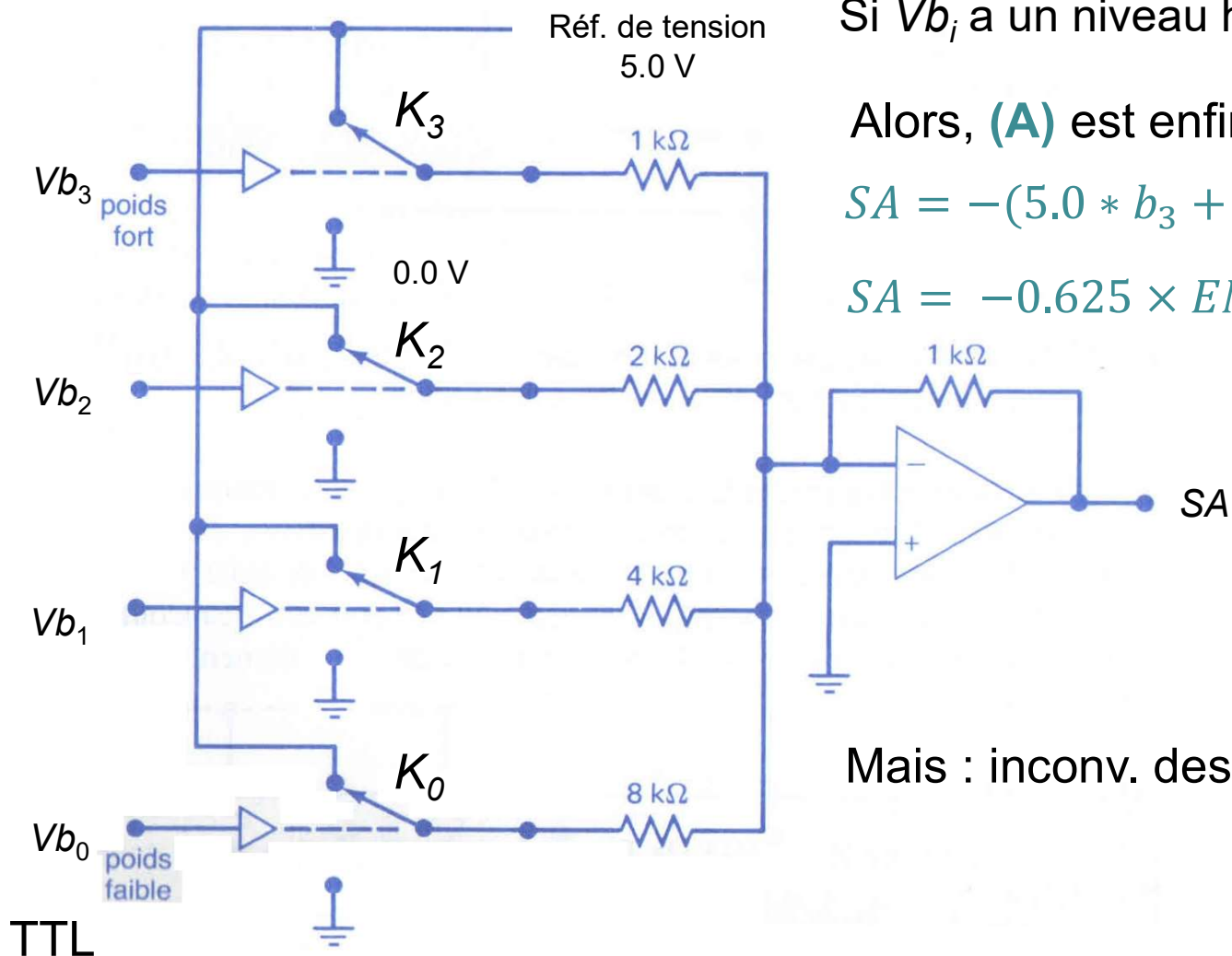
b_i	Vb_i (V)
0	$\in [0.0, 1.4]$
1	$\in [2.4, 5.0]$

Du coup, **(A)** n'est plus valable.

Rem. : possibilité de mettre en aval un ampli de gain -1 pour enlever le signe – dans **(A)**.

CNA : réalisations en circuit intégré (2/3)

A – CNA à résistances pondérées et ampli op. sommateur (avec réf. de tension)



Si Vb_i a un niveau haut (bas), K_i est vers le haut (bas).

Alors, **(A)** est enfin toujours exacte :

$$SA = -(5.0 * b_3 + 2.5 * b_2 + 1.25 * b_1 + 0.625 * b_0)$$

$$SA = -0.625 \times EN \quad EN \text{ allant de } 0b0000 \text{ à } 0b1111.$$

Mais : inconv. des CNA à résistances pondérées :

CNA : réalisations en circuit intégré (3/3)

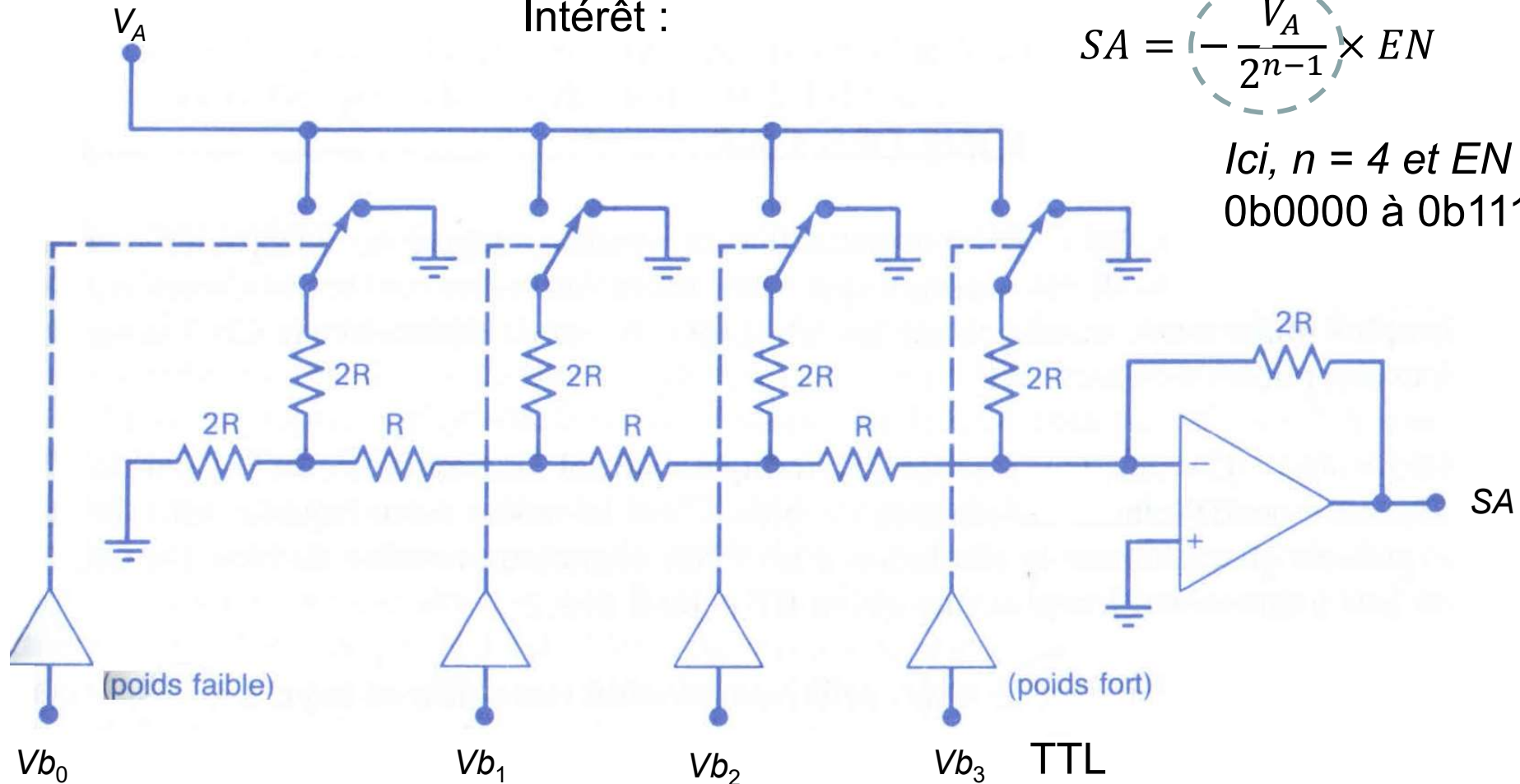
B – CNA à réseau R-2R (*R-2R ladder DAC*)

Intérêt :

On peut montrer que :

$$SA = -\frac{V_A}{2^{n-1}} \times EN$$

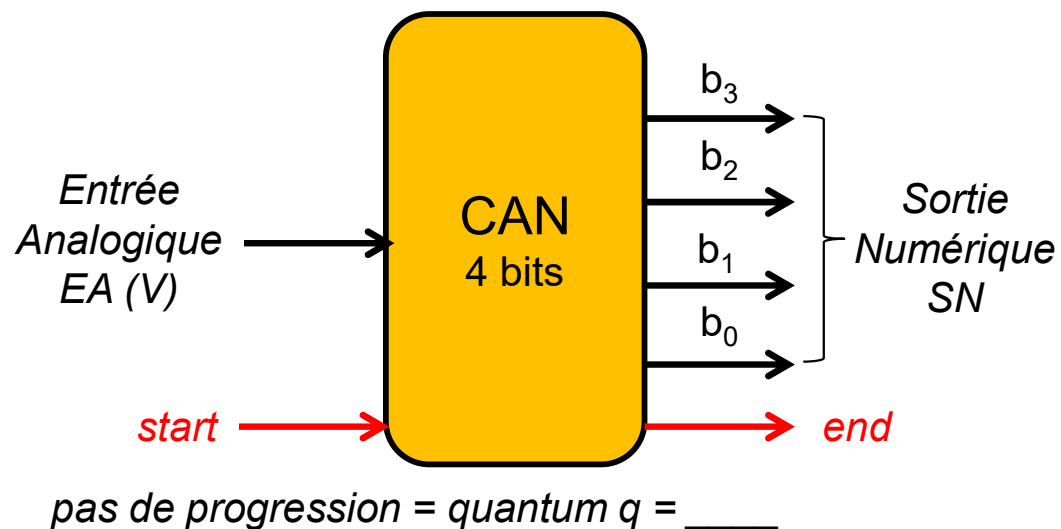
Ici, $n = 4$ et EN va de 0b0000 à 0b1111.



Exercice : Si $V_A = 5.0 \text{ V}$, $n = 4$, quel est le quantum q de ce CNA et quelle est sa *SPE* ?

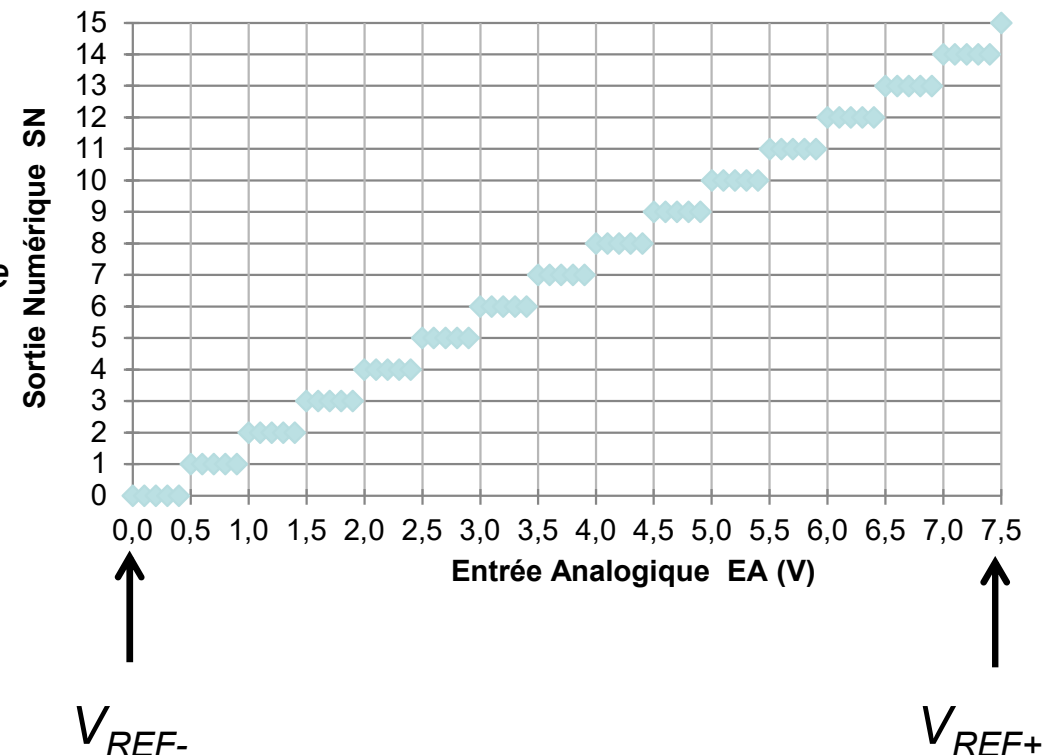
CAN : présentation

La conversion AN est généralement plus complexe et plus longue que la conversion NA.
Exemple sur un CAN 4 bits ($n=4$) de type unipolaire (bipolaire existe aussi) :



SN =

Erreur de quantification = q



Remarque : les MIN et MAX de l'Entrée Analogique EA sont parfois réglables grâce à des broches V_{REF-} et V_{REF+} (c'est le cas du CAN du PIC18F4520).

Exercice : Quel est le quantum q du CAN 10 bits d'un PIC18F4520 pour lequel $V_{REF-} = 0.0 \text{ V}$ et $V_{REF+} = 5.0 \text{ V}$?

CAN : réalisations en circuit intégré (1/3)

3 critères : temps de conversion T_{CNV} et donc nombre max de sps (*samples per second*), résolution et coût

A – CAN simple rampe et CAN double rampe

- **Simple rampe** : CNA à l'intérieur. **Assez lent** et temps de conversion dépendant de la valeur à numériser. Qq 10 ksps max. Okay pour audio.
- **Double rampe** : pas de CNA à l'intérieur. Très bon marché. **Très très lent** (100 ms donc 10 sps). Pour les voltmètres.
- Ces deux types de CAN sont cela dit obsolètes et remplacés dans ces gammes par les **convertisseurs sigma-delta** (Wikipedia). Jusque $m = 24$ bits et 10 ksps

B – CAN à approximations successives

- Répandus dans les μ c. Ont un CNA à l'intérieur. **Moyennement rapide**, jusque 1 Msps. Bon marché. Jusque $m = 16$ bits.

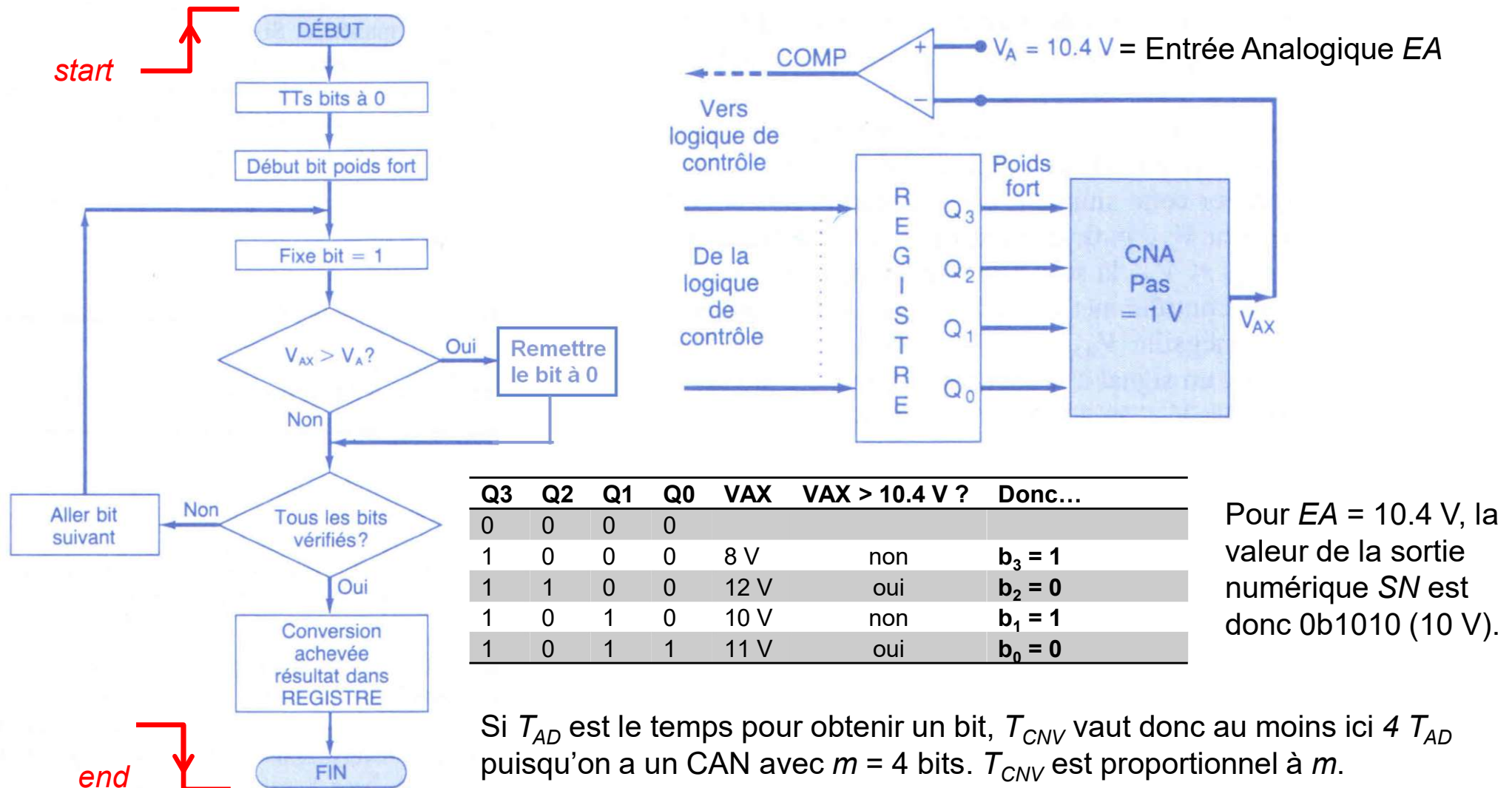
C – CAN flash

- Pas de CNA à l'intérieur. **Extrêmement rapide** : qq Gsps. Consommation et prix en conséquence. Limité à $m = 8$ à 12 bits.

Remarque : Il faut chercher dans les *datasheets* : *Resolution*, *Offset Error*, *Gain Error*, *DNL*, *INL*. Cf. Diapo 6. On peut aussi s'intéresser au format de la *Sortie Numérique* : bus SPI, I2C,

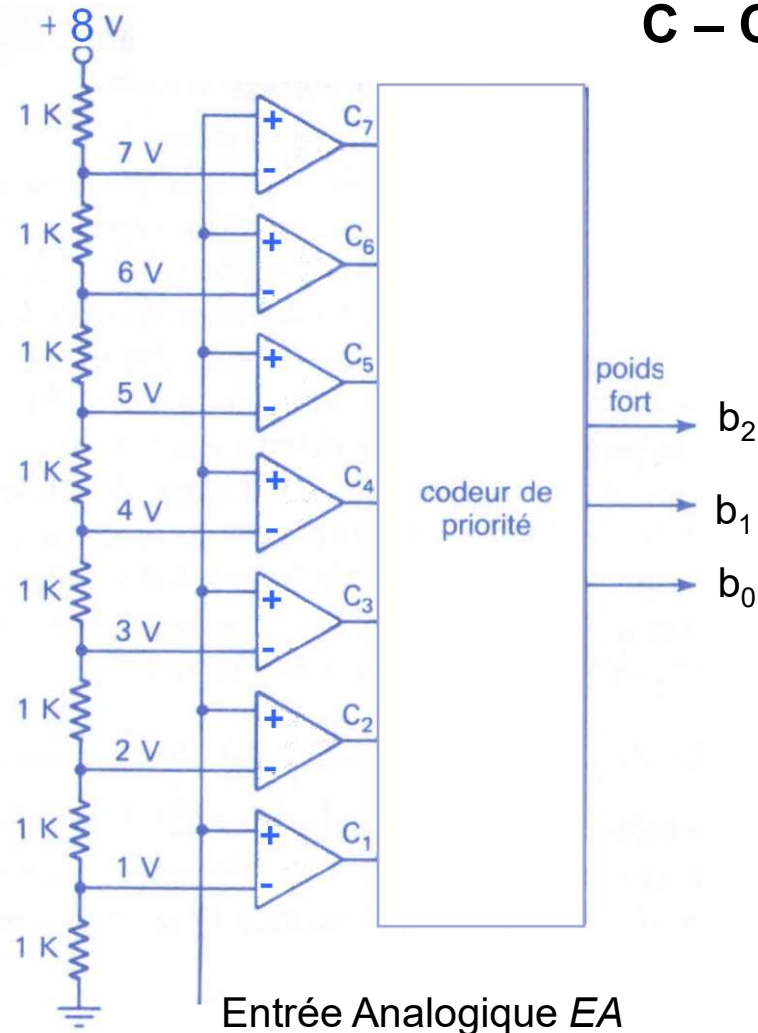
CAN : réalisations en circuit intégré (2/3)

B – CAN à approximations successives (*Successive approximation ADC*)



CAN : réalisations en circuit intégré (3/3)

C – CAN flash (exemple pour $m = 3$, quantum $q = 1$ V)



EA (V)	C_7	C_6	C_5	C_4	C_3	C_2	C_1	b_2	b_1	b_0	SN
$[0,1[$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$[1,2[$	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1
$[2,3[$	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	2
$[3,4[$	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	3
$[4,5[$	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	4
$[5,6[$	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	5
$[6,7[$	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	6
$[7,8[$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	7

Si $m = 8$ bits, 255 comparateurs ! Prix et consom. mais rapidité extrême. Usage : vidéo.

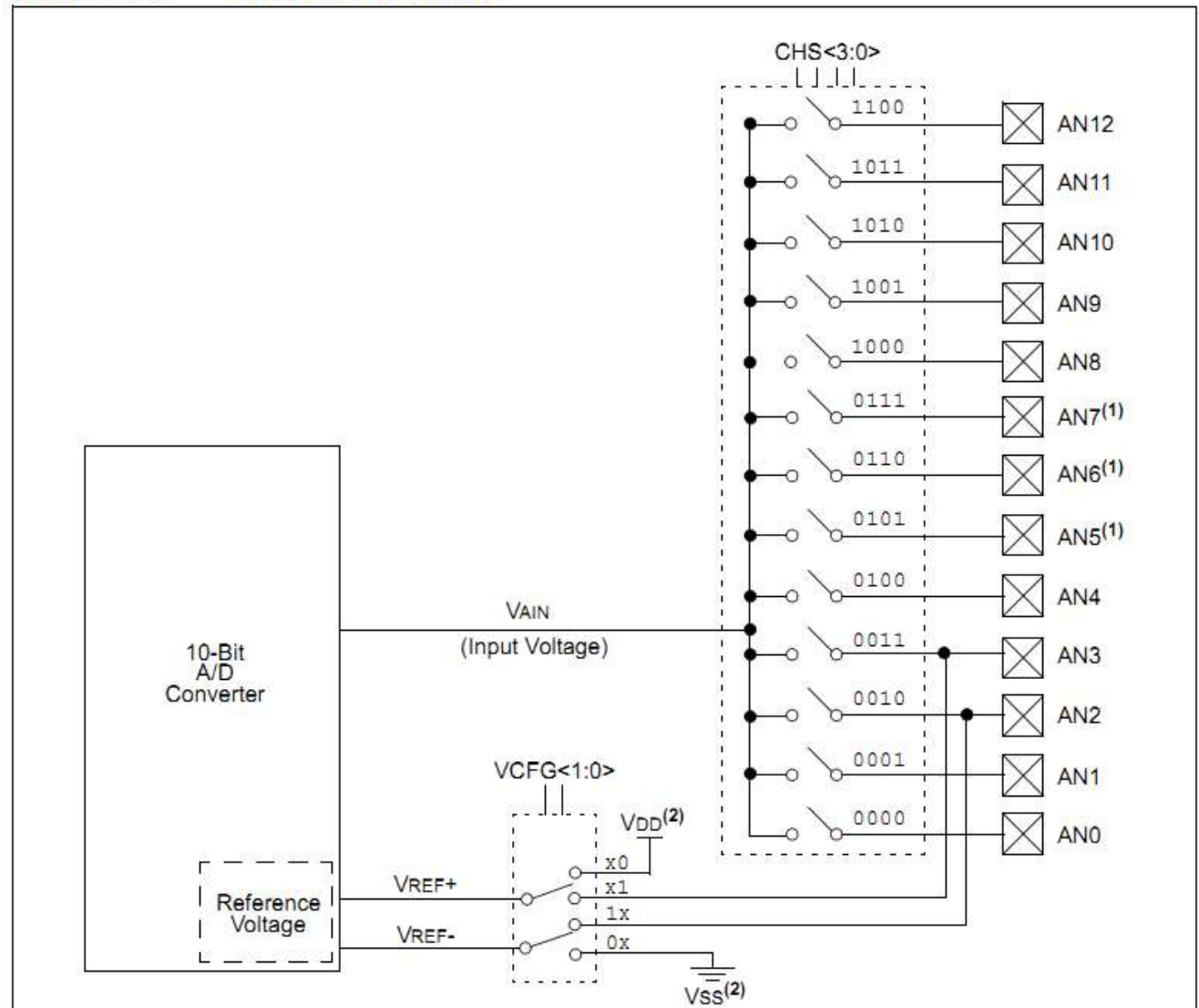
CAN du PIC18F4520 : multiplexage analogique

Un seul CAN dans le PIC18F4520 (10 bits, à approximations successives) mais 13 canaux AN0 à AN12. Possibilité de régler V_{REF+} et V_{REF-} via les canaux AN3 et AN2.

Il n'y a pas de CNA au sein du PIC18F4520. C'est d'ailleurs assez rare d'intégrer un CNA dans un μC car la plupart des actionneurs, même si leur sortie est analogique, se pilotent de façon numérique.

Note : Microchip fabrique des μC mais aussi des puces diverses dont des CNA et CAN, avec interface SPI par exemple.

FIGURE 19-1: A/D BLOCK DIAGRAM



CAN : Echantillonneur-Bloqueur en entrée

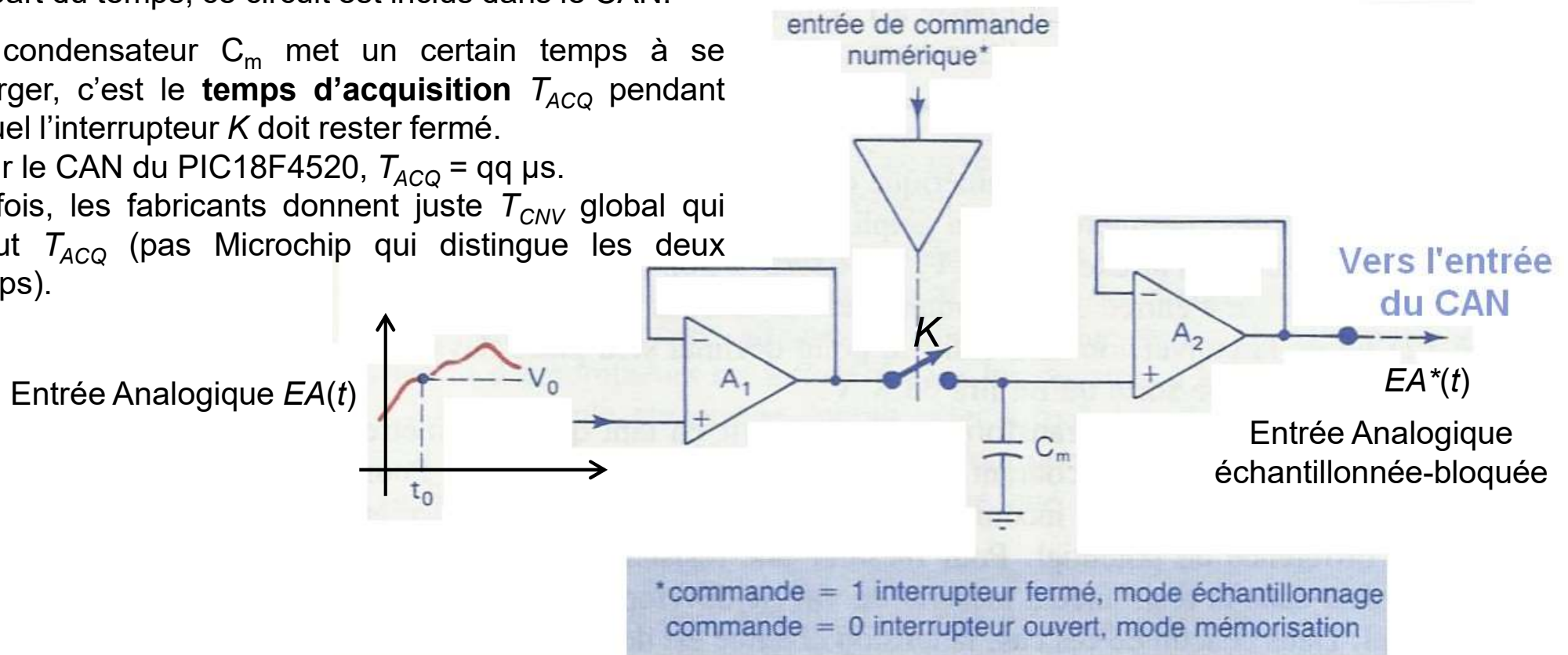
Nécessité d'avoir une tension d'entrée analogique EA stable

Quand on raccorde directement une tension analogique à l'entrée d'un CAN, le processus de conversion peut être perturbé si la tension change pendant la conversion. La tension doit donc être maintenue constante pendant la conversion. En amont du CAN, il y a un circuit **Echantillonneur-Bloqueur** (*sample and hold*). La plupart du temps, ce circuit est inclus dans le CAN.

Le condensateur C_m met un certain temps à se charger, c'est le **temps d'acquisition** T_{ACQ} pendant lequel l'interrupteur K doit rester fermé.

Pour le CAN du PIC18F4520, $T_{ACQ} = \text{qq } \mu\text{s}$.

Parfois, les fabricants donnent juste T_{CNV} global qui inclut T_{ACQ} (pas Microchip qui distingue les deux temps).



CAN : Théorème d'échantillonnage de Nyquist-Shannon

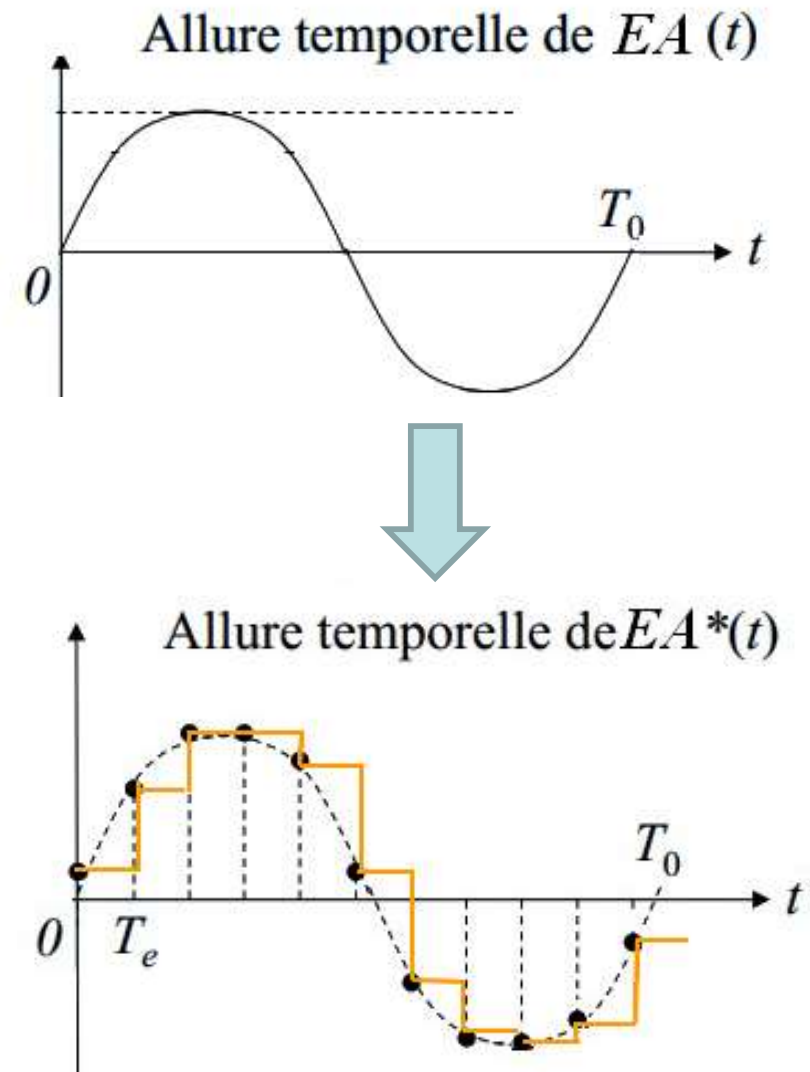
Soit un signal dont on connaît la décomposition spectrale : La sinusoïde de fréquence la plus élevée du spectre a pour fréquence f_0 (période T_0).

Pour faire simple, considérons un signal sinusoïdal pur de fréquence f_0 . Cf. ci-contre.

A quelle fréquence f_E (période T_E) faut-il échantillonner-bloquer ce signal pour en avoir une image correcte ?

Le théorème de Nyquist-Shannon dit qu'il faut $f_E > 2 f_0$ afin de pouvoir reconstituer le signal d'origine à partir du signal échantillonné.

Dans la pratique on choisit plutôt $f_E > 10$ à $20 f_0$.



Bibliographie

- Circuits numériques - Théorie et applications, Ronald J. TOCCI, Dunod
- Sites des fabricants : Texas Instruments, Microchip, MaximIntegrated, etc.
- <http://www.ti.com/lit/an/slaa013/slaa013.pdf>
- Wikipedia, notamment « Convertisseur analogique-numérique »