

# Module d'Electronique

3<sup>ème</sup> partie : Conversion de données

©Fabrice Sincère (version 3.0.1)

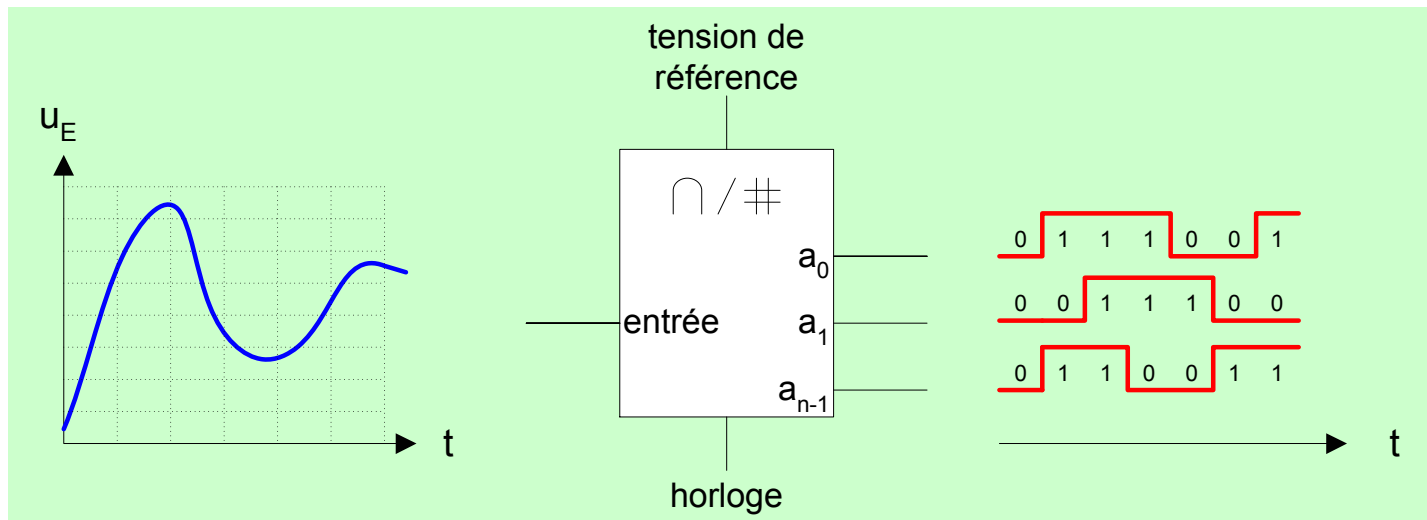
<http://pagesperso-orange.fr/fabrice.sincere>

# Introduction

- 2 catégories de circuits électroniques :
  - circuits analogiques ( $\cap$ )
  - circuits numériques (#)

- Le convertisseur analogique/numérique permet de communiquer d'un système analogique vers un système numérique :

– Fig. 1a

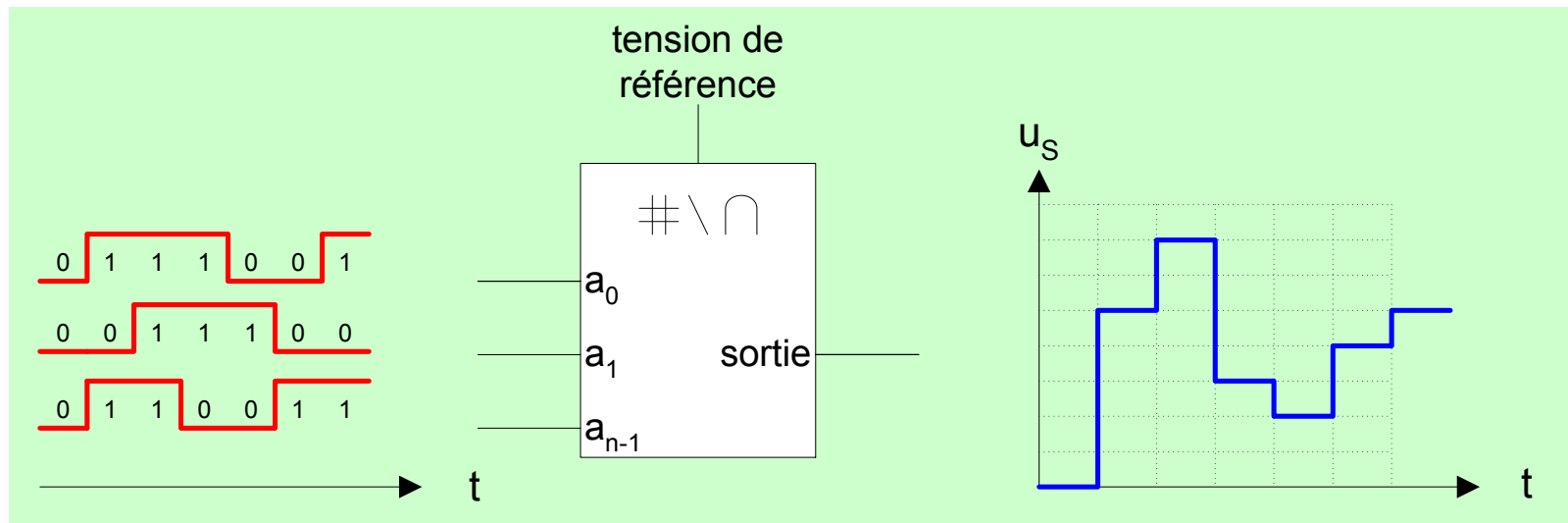


– Exemples

- Capteur de son (microphone)  $\cap$  → Carte-son  
→ Ordinateur #
- Capteur de température  $\cap$   
→ Carte d'acquisition → Ordinateur #

- Le convertisseur numérique/analogique permet de communiquer d'un système numérique vers un système analogique :

– Fig. 1b



– Exemples

- Ordinateur # → Carte-son → amplificateur et haut-parleurs  $\cap$
- CD # → Lecteur CD → amplificateur et haut-parleurs  $\cap$

# Chapitre 1

## Convertisseur numérique/analogique (CNA)

Digital-to-Analog Converter (DAC)

### 1-1- Définitions

- Un CNA convertit un nombre binaire en une tension (ou un courant) qui lui est proportionnel.

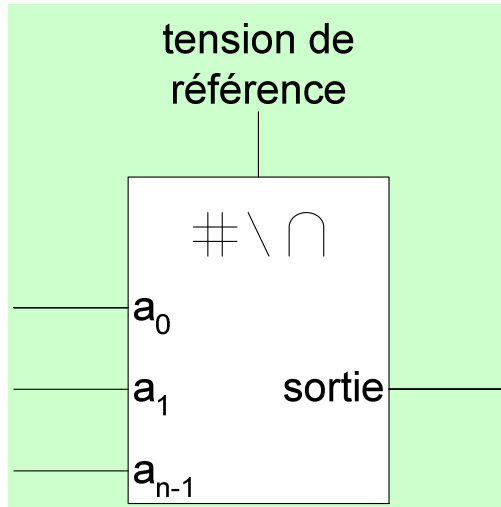
– L'entrée est numérique (n bits) :  $N = (a_{n-1} \dots a_1 a_0)_2$

n est la *résolution numérique*

$$N_{\min} = (0 \dots 00)_2 = 0$$

$$N_{\max} - 1 = (1 \dots 11)_2 = 2^n - 1$$

- La sortie est analogique (tension) :  $u_S = Nq + u_{Smin}$



$q$  est le *quantum* ou *résolution analogique* (en V)

L'*étendue* de la tension de sortie est :

$$u_{Smax} - u_{Smin} = 2^n q$$

- Relation entre résolution ( $n$ ) et quantum ( $q$ )

$$\text{quantum} = \text{étendue de la tension de sortie} / 2^n$$

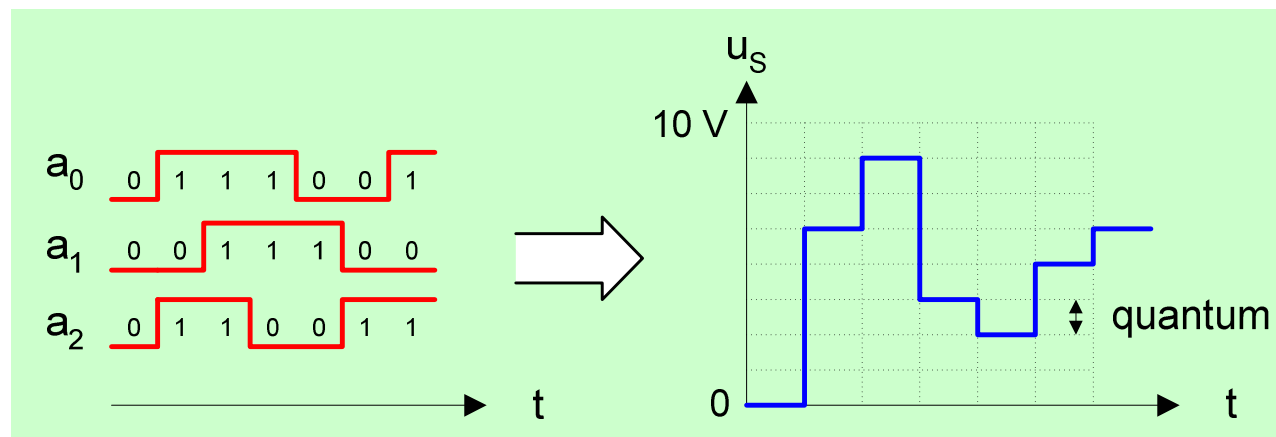
## 1-2- Caractéristiques d'un CNA

- résolution (“précision”)
- durée de conversion (“vitesse”)
- plage de la tension de sortie
- prix

- Exemple n°1 (fig. 2a) : CNA 3 bits, plage [0,10 V]

$$q = (10 - 0) / 2^3 = 10/8 = 1,25 \text{ V}$$

N	$a_2$	$a_1$	$a_0$	$u_s$ (V)
0	0	0	0	0
1	0	0	1	1,25
2	0	1	0	2,5
3	0	1	1	3,75
4	1	0	0	5
5	1	0	1	6,25
6	1	1	0	7,5
7	1	1	1	8,75





- Exemple n°2 (fig. 2b) : CNA 8 bits, plage [-5,+5 V]

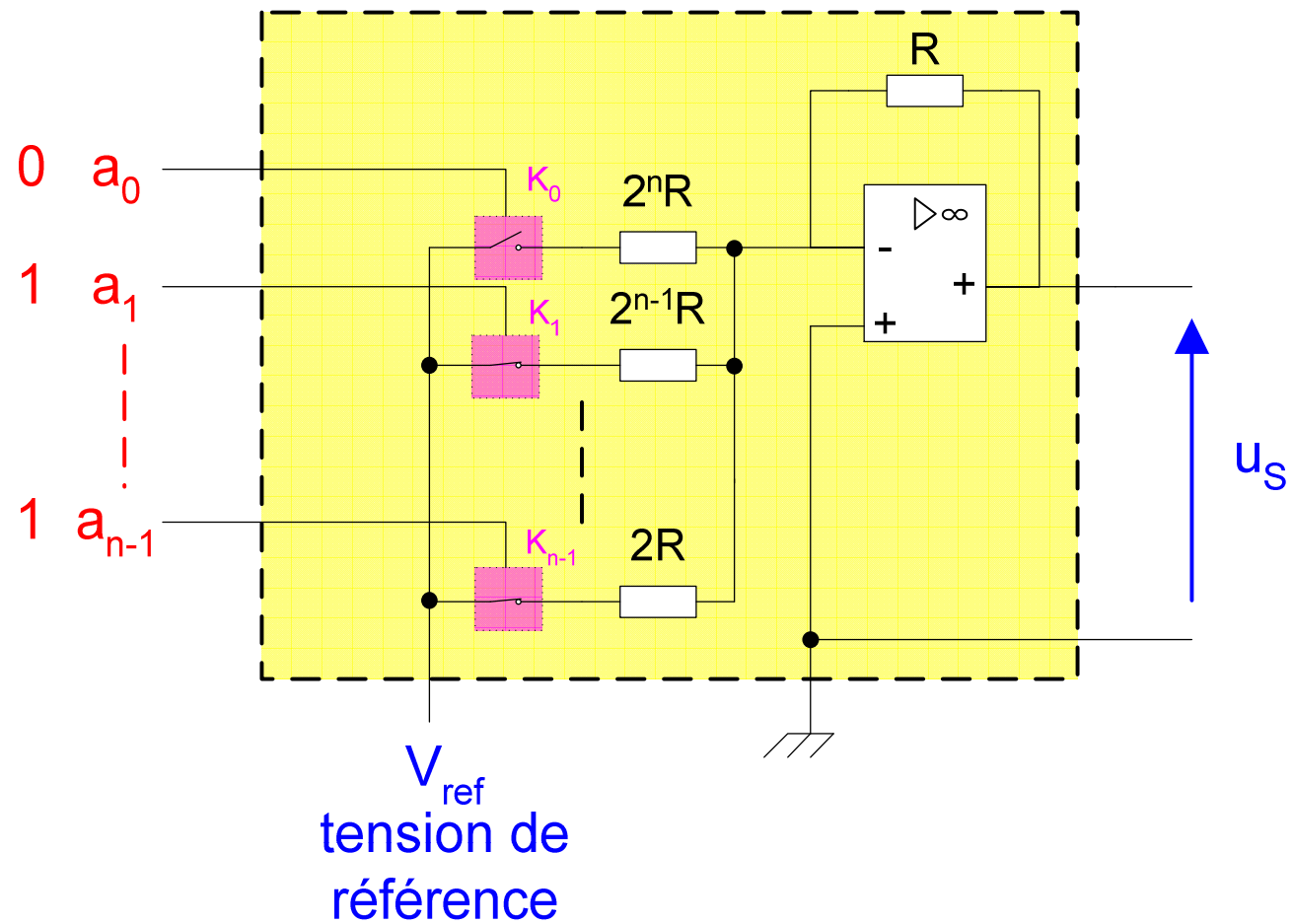
$$q = (5 - (-5)) / 2^8 = 10/256 \approx 0,04 \text{ V}$$

N	a <sub>7</sub>	a <sub>6</sub>	a <sub>5</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>0</sub>	u <sub>S</sub> (V)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	-5
1	0	0	0	0	0	0	0	1	-4,96
2	0	0	0	0	0	0	1	0	-4,92
128	1	0	0	0	0	0	0	0	0
254	1	1	1	1	1	1	1	0	+4,92
255	1	1	1	1	1	1	1	1	+4,96

## 1-3- Les principaux types de CNA

### 1-3-1- CNA à réseau de résistances pondérées

• Fig. 3a



- Analyse du fonctionnement

Les interrupteurs électroniques  $K_i$  sont des transistors :

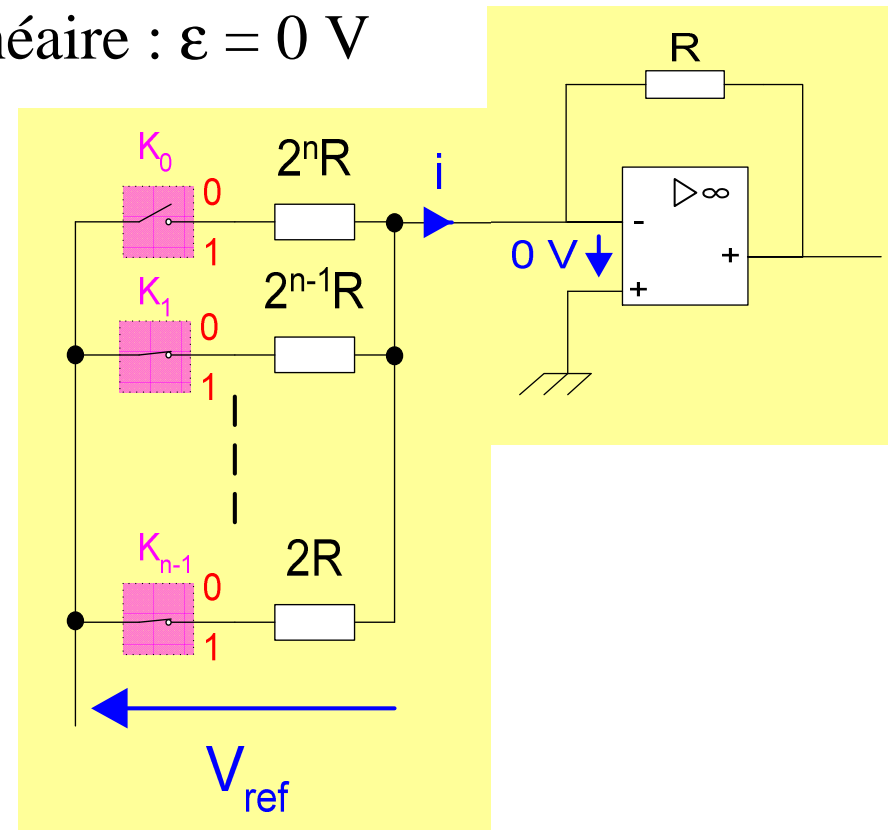
$K_i$  est fermé quand  $a_i = 1$  (niveau de tension haut)

$K_i$  est ouvert quand  $a_i = 0$  (niveau de tension bas)

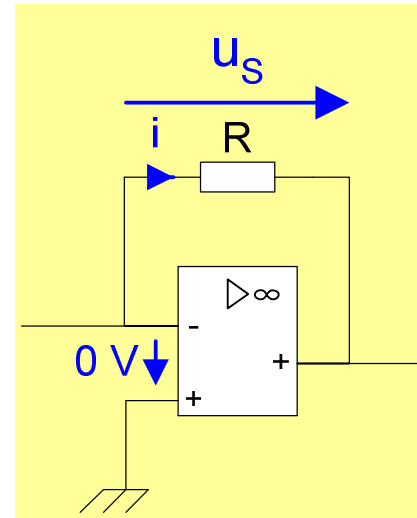
L'A.O. fonctionne en régime linéaire :  $\varepsilon = 0 \text{ V}$

Loi des nœuds :

$$i = a_{n-1} \cdot \frac{V_{\text{ref}}}{2R} + \dots + a_0 \cdot \frac{V_{\text{ref}}}{2^n R}$$



D'autre part :  $u_S = -Ri$



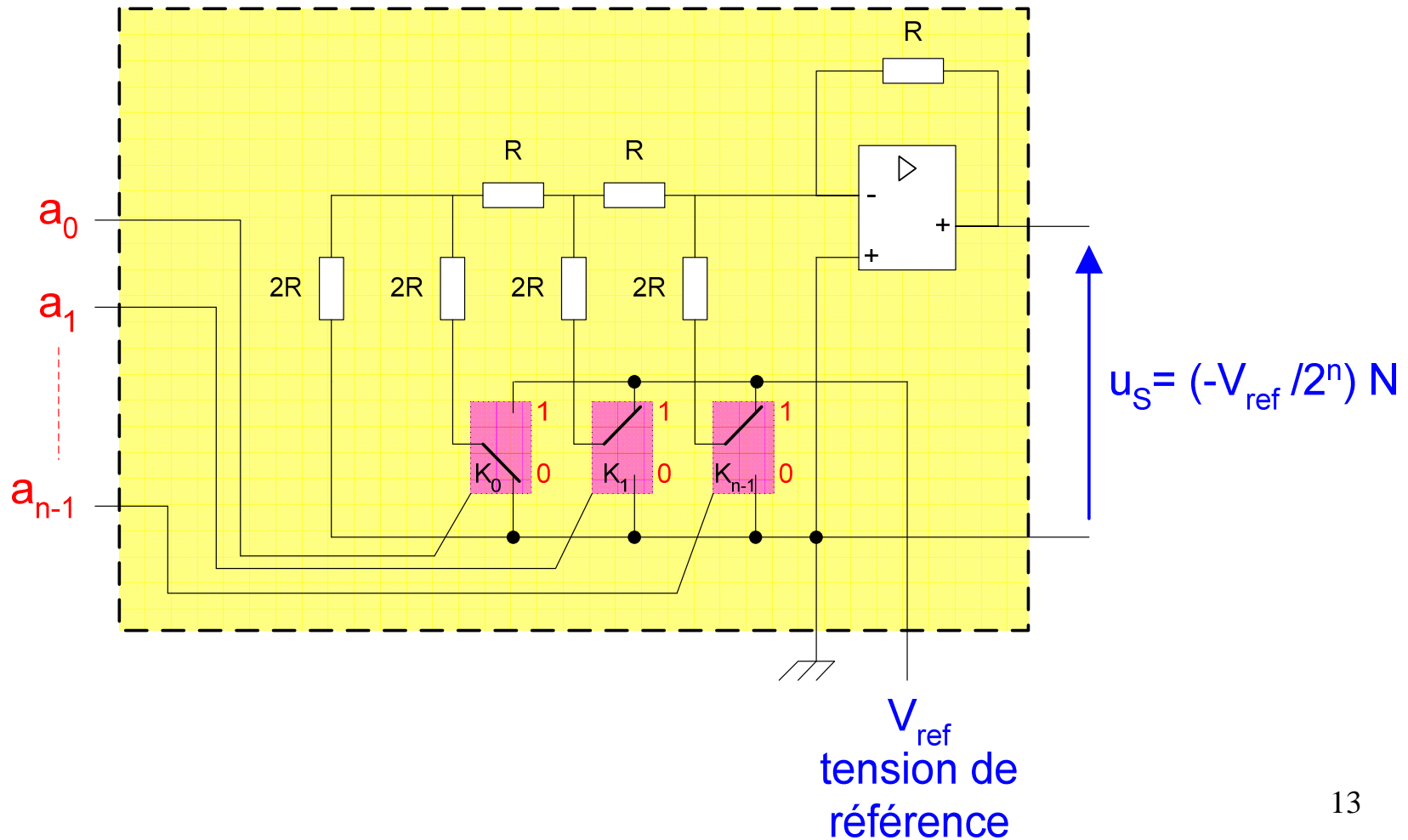
d'où :  $u_S = -(V_{\text{ref}}/2^n) \cdot (2^{n-1}a_{n-1} + \dots + 4a_2 + 2a_1 + a_0)$

**Finalemment :  $u_S = -(V_{\text{ref}}/2^n) \cdot N$**

- quantum :  $q = -(V_{\text{ref}}/2^n)$
- plage de la tension de sortie : 0 à  $-V_{\text{ref}}$

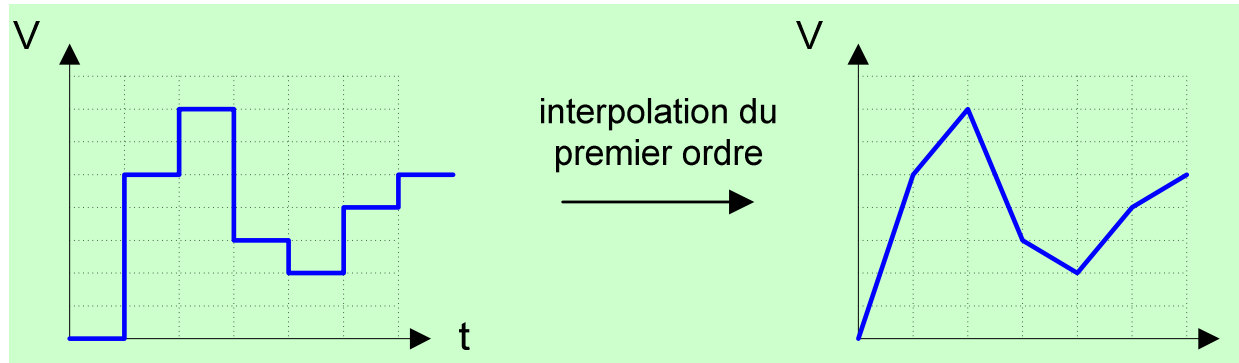
## 1-3-2- CNA à réseau de résistances R-2R

- Fig. 3b

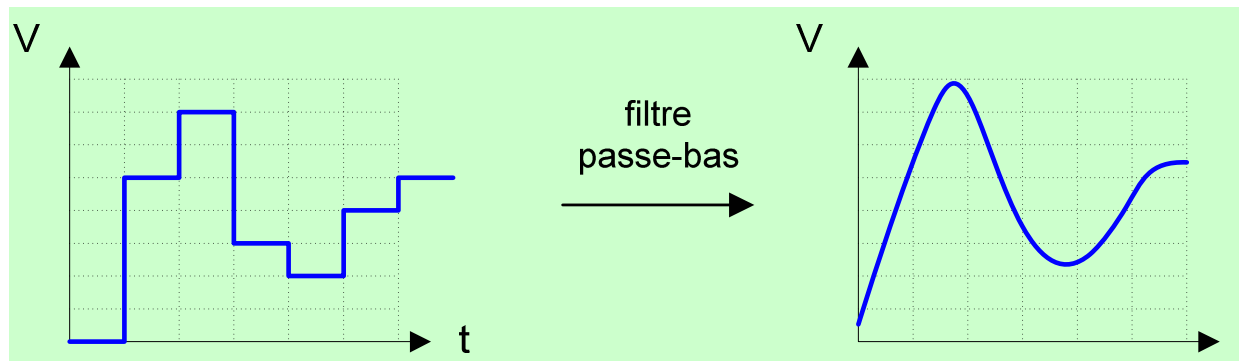


## 1-4- Restitution du signal analogique initial

### 1-4-1- Par interpolation (fig. 4a)



### 1-4-2- Par filtrage analogique (fig. 4b)



# Chapitre 2

## Convertisseur analogique/numérique (CAN)

Analog-to-Digital Converter (ADC)

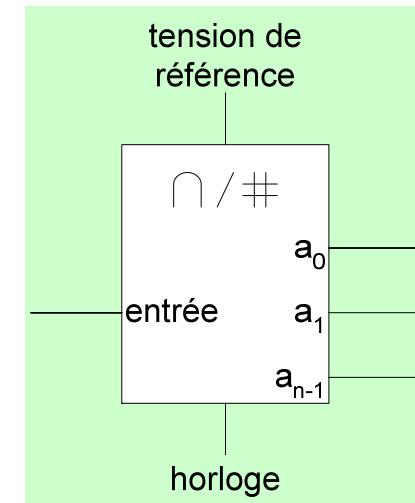
### 2-1- Définitions

Un CAN convertit une tension (ou un courant) en un nombre binaire qui lui est proportionnel.

L'entrée est une tension analogique comprise entre  $u_{Emin}$  et  $u_{Emax}$ .

La sortie est numérique (n bits) :  $N = (a_{n-1} \dots a_1 a_0)_2$

Remarque : la conversion A/N est plus complexe à réaliser que la conversion N/A.

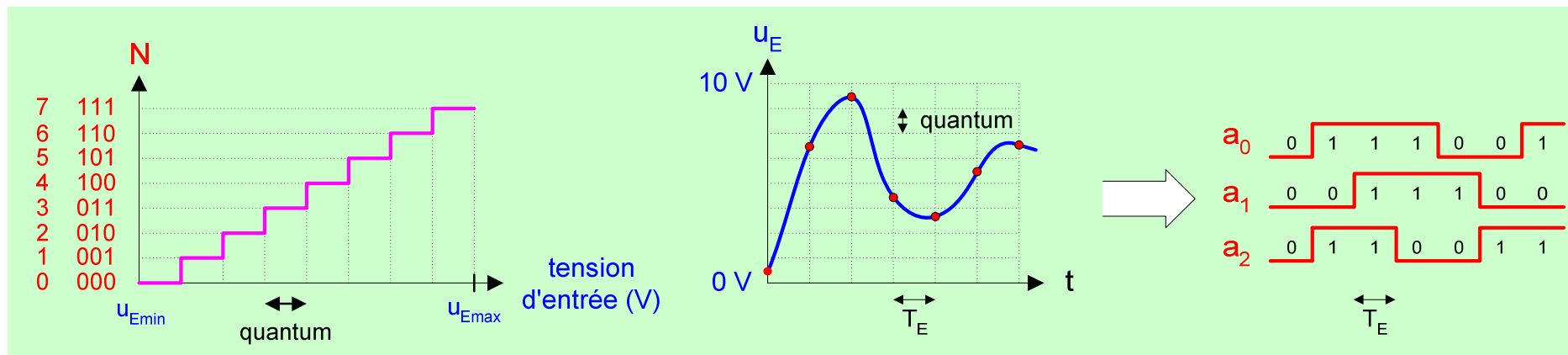


## 2-2- Fonction de transfert

- $N = [(u_E - u_{Emin}) / \text{quantum}]$

[les crochets désignent la partie entière]

- Exemple (fig. 5) : CAN 3 bits, plage [0,10 V]





## 2-3- Caractéristiques

- résolution
  - durée de conversion ( $T_C$ )
  - plage de la tension d'entrée
  - prix
- 
- Exemple du circuit intégré ADC0804 (20 broches) :
    - $n = 8$  bits
    - $T_C = 100 \mu s$
    - 0 à 5 V en entrée
    - 3 euros

## 2-4- Echantillonnage (“ numérisation ” “ sampling ”)

L'échantillonnage consiste à numériser (échantillonner) un signal analogique.

L'élément principal est le convertisseur A/N.

### 2-4-1- « Vitesse » d'échantillonnage (sampling frequency)

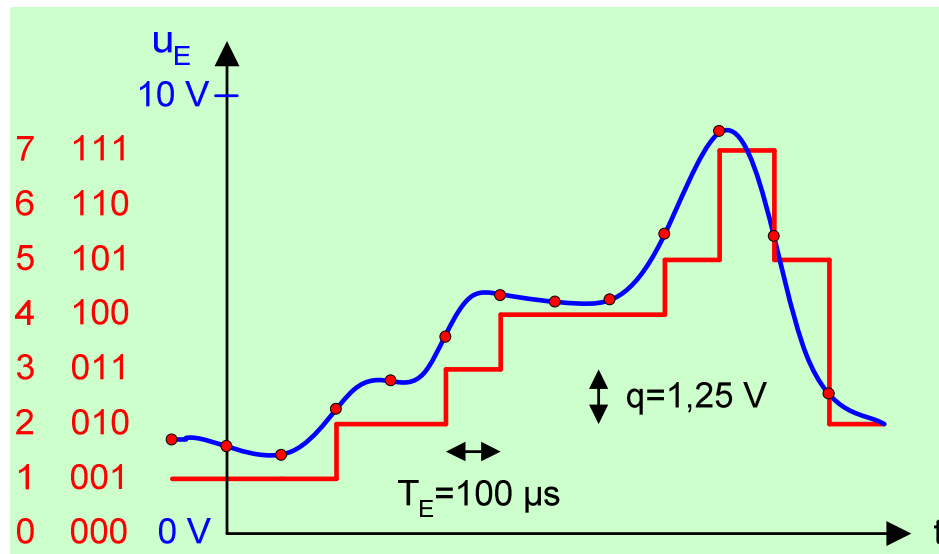
- L'échantillonnage est caractérisé par sa période  $T_E$
- Fréquence d'échantillonnage :  $f_E = 1/T_E$
- Limite :  $T_C < T_E$

- Exemple : ADC0804

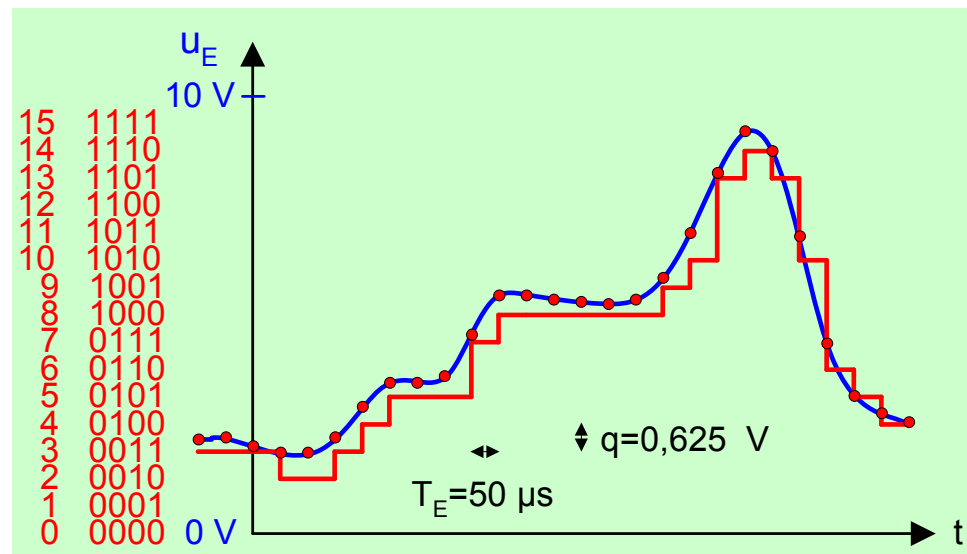
$f_E$  limitée à  $1/100 \mu s = 10 \text{ kHz}$  :  
10 000 échantillons (de 8 bits) par seconde

## 2-4-2- Influence de la résolution et de la fréquence d'échantillonnage

- Fig. 6a :  
CAN 3 bits,  $f_E = 10$  kHz



- Fig. 6b :  
CAN 4 bits,  $f_E = 20$  kHz

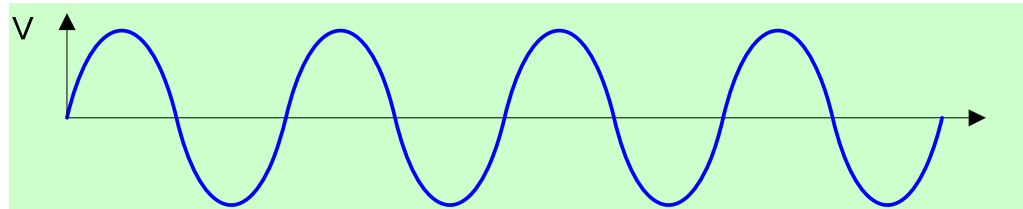


- L'échantillonnage est d'autant meilleur que :

$f_E$  est élevée (vitesse)  
 $n$  est élevée (précision)

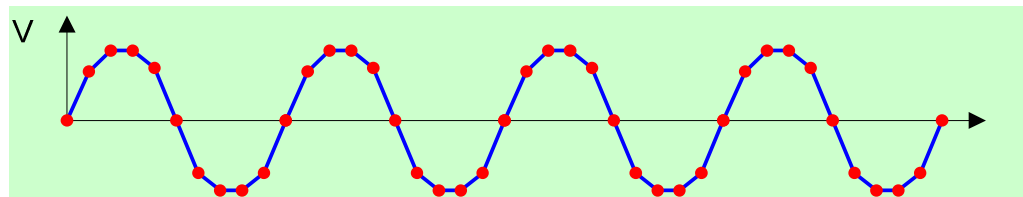
## 2-4-3- Théorème de Shannon (1948)

Considérons un signal sinusoïdal de fréquence  $f$  (fig. 7a) :



Avec  $f_E = 10f$  (10 échantillons par période) :  
échantillonnage correct.

Après restitution par interpolation linéaire (fig. 7b) :



Avec  $f_E < 2f$ , l'échantillonnage est incorrect (fig. 7c) :



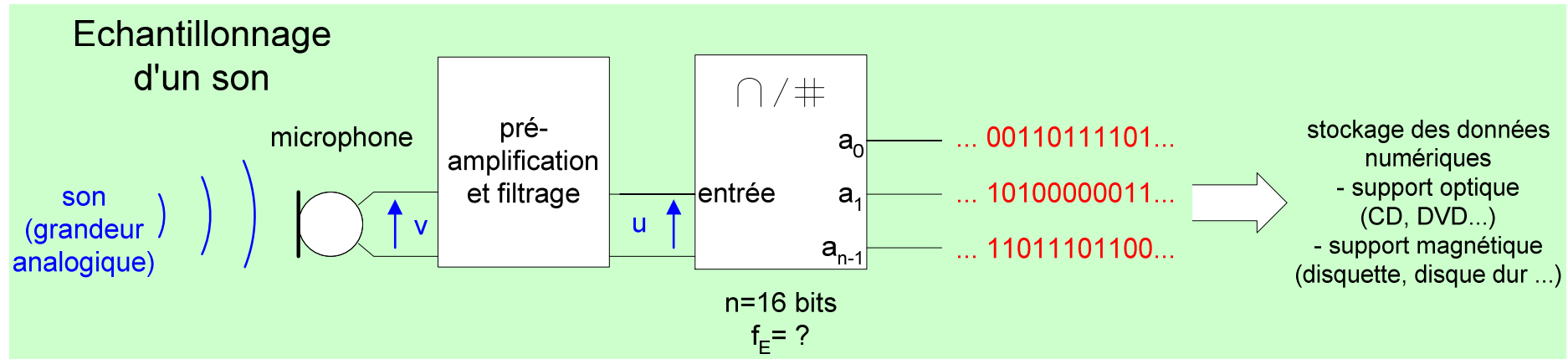
## Théorème de Shannon

La fréquence d'échantillonnage  $f_E$  doit être au moins double de la plus grande fréquence  $f$  contenue dans le signal à échantillonner :

$$f_E > 2f$$

## 2-4-4- Application : le son “ numérique ”

### 2-4-4-1- Echantillonnage d'un son (fig. 8a)



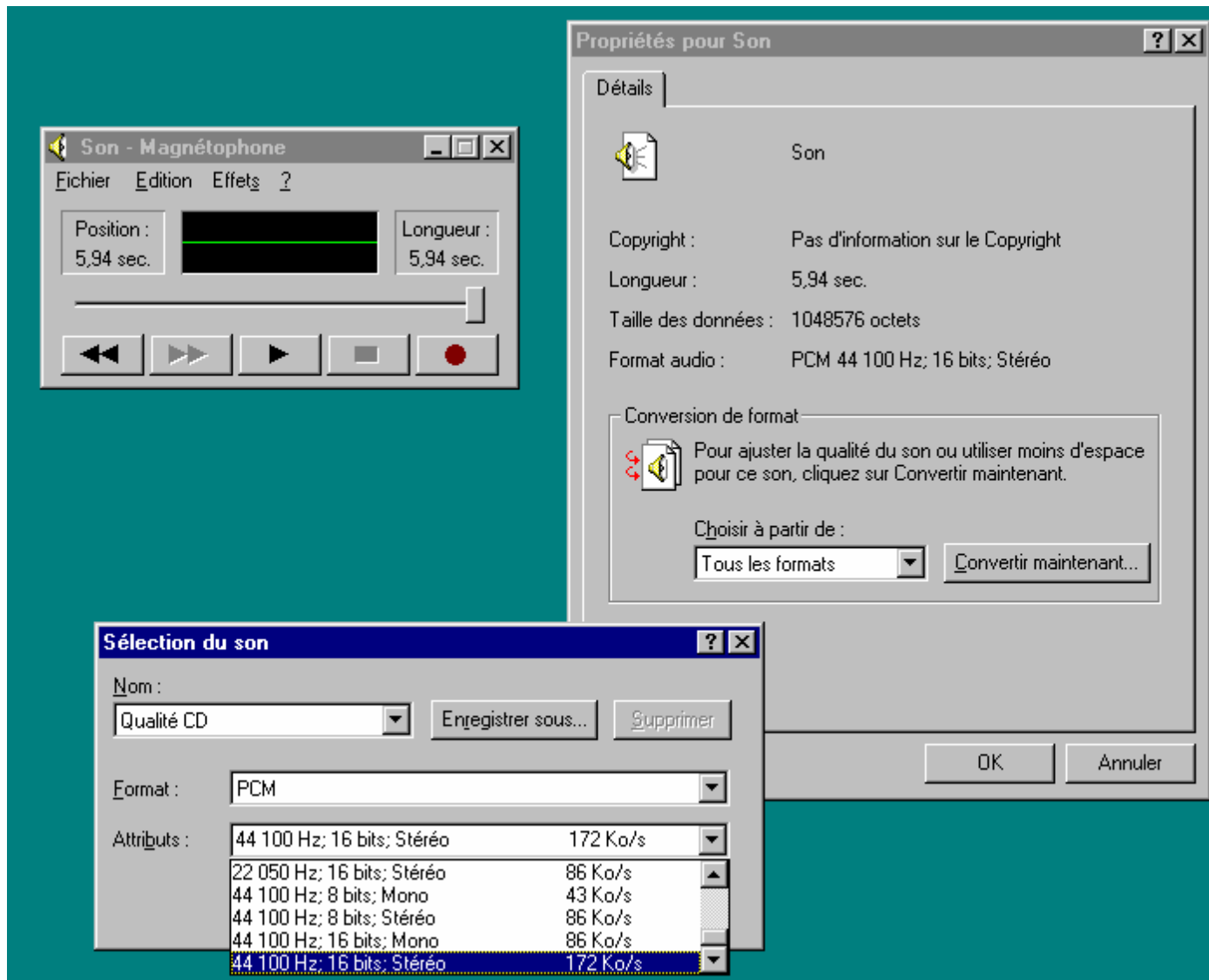
Question : comment faut-il choisir la fréquence d'échantillonnage ?

Bande passante d'un son : 20 Hz (grave) à 16 kHz (aigu)

Théorème de Shannon :

Fréquence d'échantillonnage d'au moins  $2 \times 16 = 32$  kHz

Son de « qualité CD » : 44,1 kHz



## Taille mémoire

Une seconde d'enregistrement nécessite :

$2$  (stéréo)  $\times$   $16$  (résolution)  $\times$   $44\ 100$  (nombre d'échantillons)  
 $= 1\ 411\ 200$  bits  $= 176\ 400$  octets  $= 172$  ko

Capacité d'un CD audio : 650 Mo

172 ko /s      soit 74 min de son

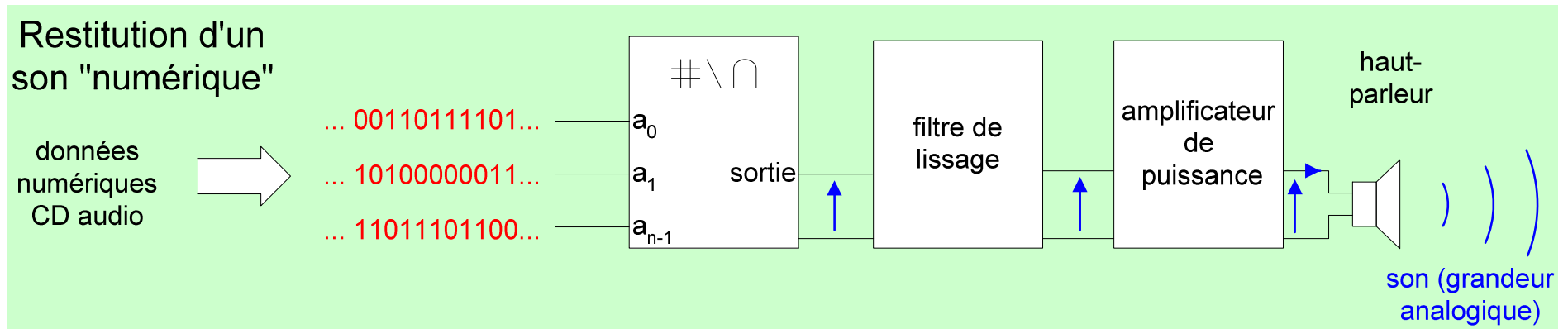




## 2-4-4-2- Restitution d'un son "numérique"

La restitution est l'opération inverse de l'échantillonnage.

Fig. 8b :



Le lecteur de CD effectue la lecture optique du CD, la conversion N/A et le filtrage (lissage des marches d'escalier).

## 2-5- Les différents types de CAN

### 2-5-1- CAN à comparateurs en échelle ("Flash")

#### Exemple de réalisation

$n = 3$  bits

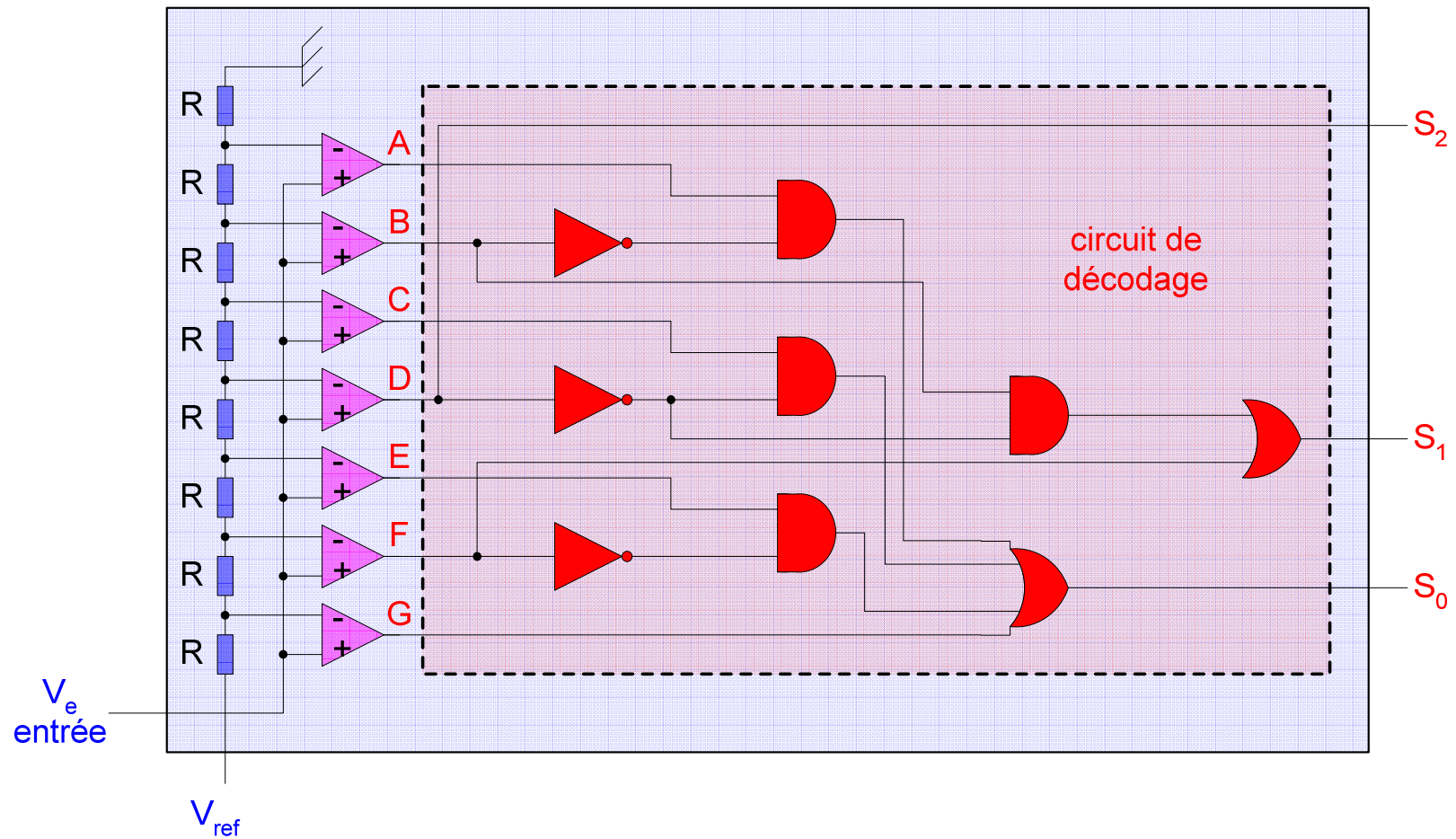
plage de la tension d'entrée : 0 à  $V_{\text{ref}}$

quantum :  $(V_{\text{ref}} - 0)/2^n = V_{\text{ref}}/8$

#### Fonction de transfert (fig. 9a)

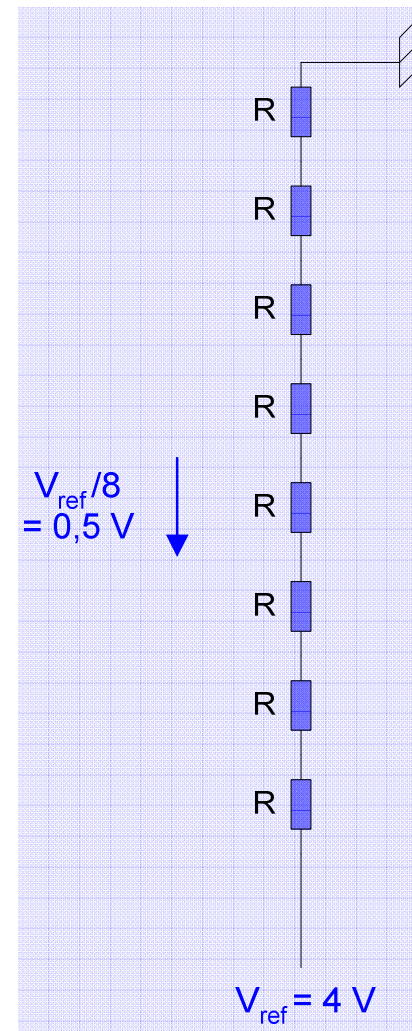
$V_e$	$S_2$	$S_1$	$S_0$	N
$0 < V_e < V_{\text{ref}}/8$	0	0	0	0
$V_{\text{ref}}/8 < V_e < V_{\text{ref}}/4$	0	0	1	1
$V_{\text{ref}}/4 < V_e < 3V_{\text{ref}}/8$	0	1	0	2
$3V_{\text{ref}}/8 < V_e < V_{\text{ref}}/2$	0	1	1	3
$V_{\text{ref}}/2 < V_e < 5V_{\text{ref}}/8$	1	0	0	4
$5V_{\text{ref}}/8 < V_e < 3V_{\text{ref}}/4$	1	0	1	5
$3V_{\text{ref}}/4 < V_e < 7V_{\text{ref}}/8$	1	1	0	6
$7V_{\text{ref}}/8 < V_e < V_{\text{ref}}$	1	1	1	7

# Schéma (fig. 9b)

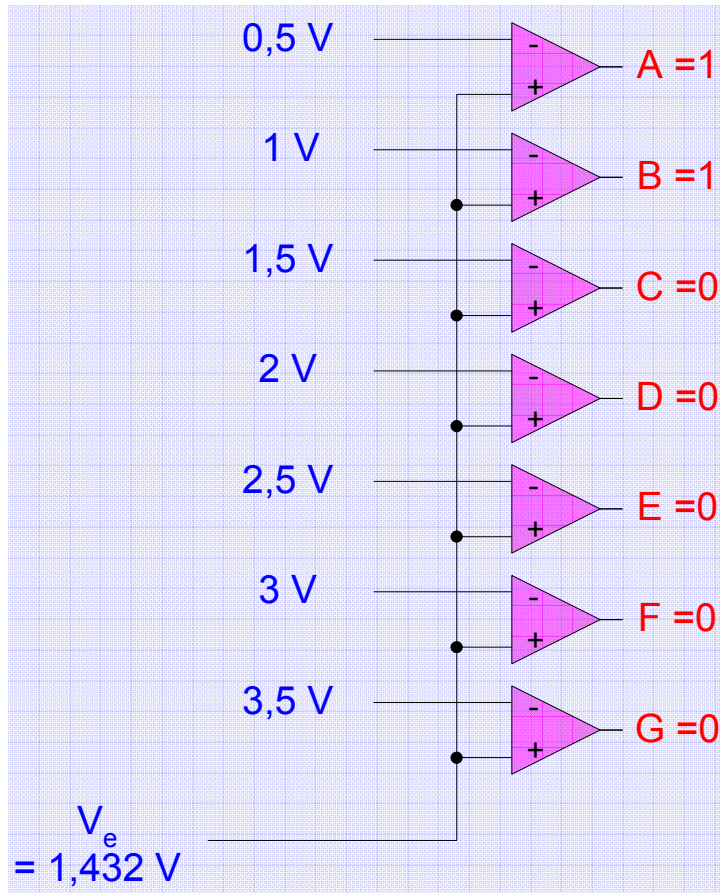


## Analyse du fonctionnement

a) Pont diviseur de tension :

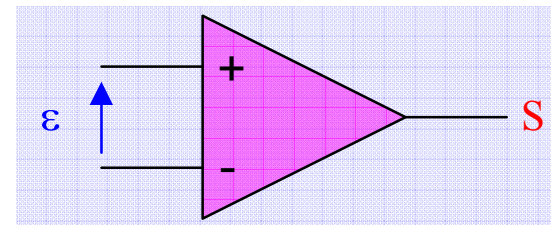


b) Comparateurs en « échelle » :



Rappel sur le comparateur (fig. 9c) :

Si  $\varepsilon > 0 \text{ V}$  alors  $S = 1$   
(niveau de tension haut)  
Si  $\varepsilon < 0 \text{ V}$  alors  $S = 0$   
( ' ' bas)



$A = 1$  quand  $V_e > V_{ref}/8$

...

$G = 1$  quand  $V_e > 7V_{ref}/8$

c) Le circuit de décodage est un circuit combinatoire :

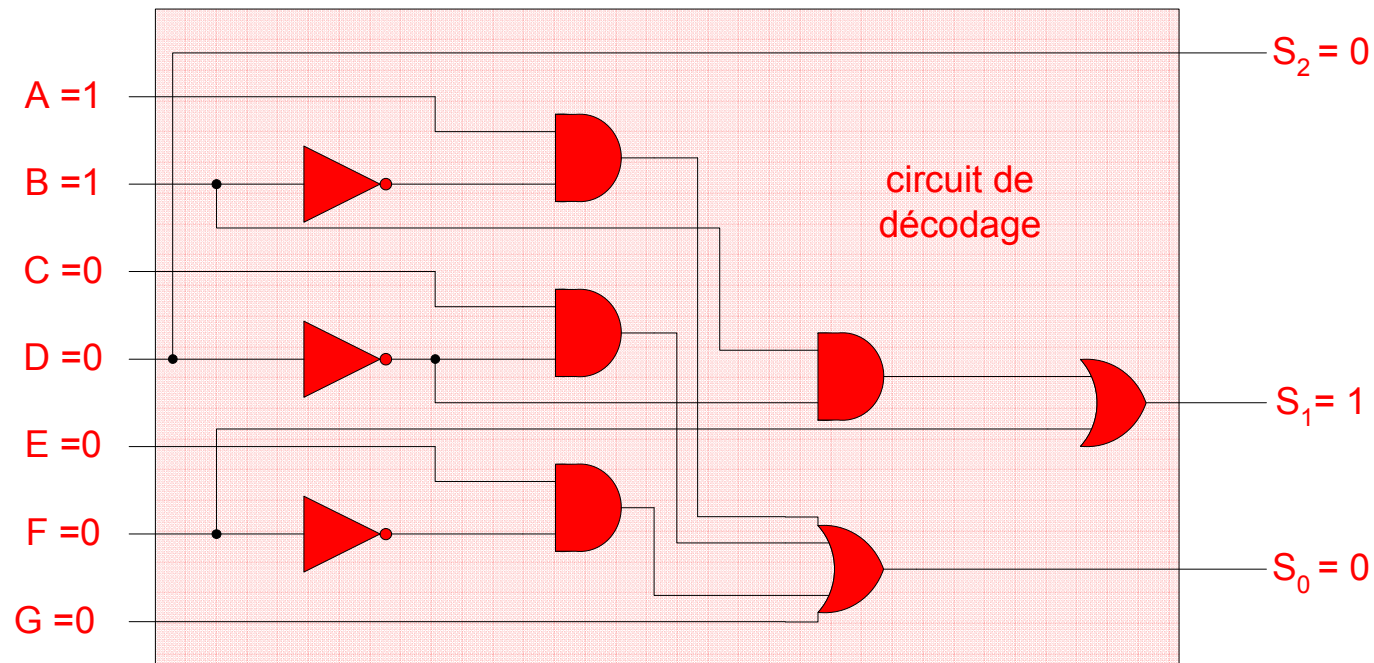


Table de vérité (fig. 9d) :

G	F	E	D	C	B	A	S <sub>2</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>0</sub>
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
0	0	0	0	0	1	1	0	1	0
0	0	0	0	1	1	1	0	1	1
0	0	0	1	1	1	1	1	0	0
0	0	1	1	1	1	1	1	0	1
0	1	1	1	1	1	1	1	1	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

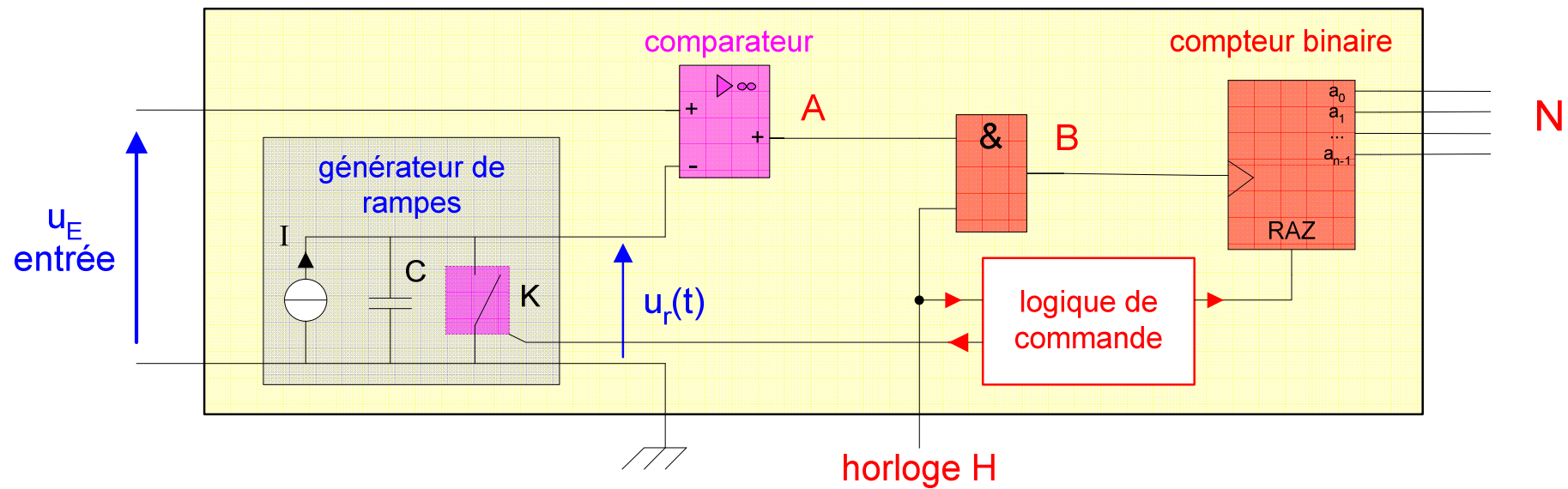
Expressions booléennes correspondantes :

$$\begin{cases} S_2 = D \\ S_1 = B\bar{D} + F \\ S_0 = A\bar{B} + C\bar{D} + E\bar{F} + G \end{cases}$$

Avantage : conversion très rapide (applications militaires ...)

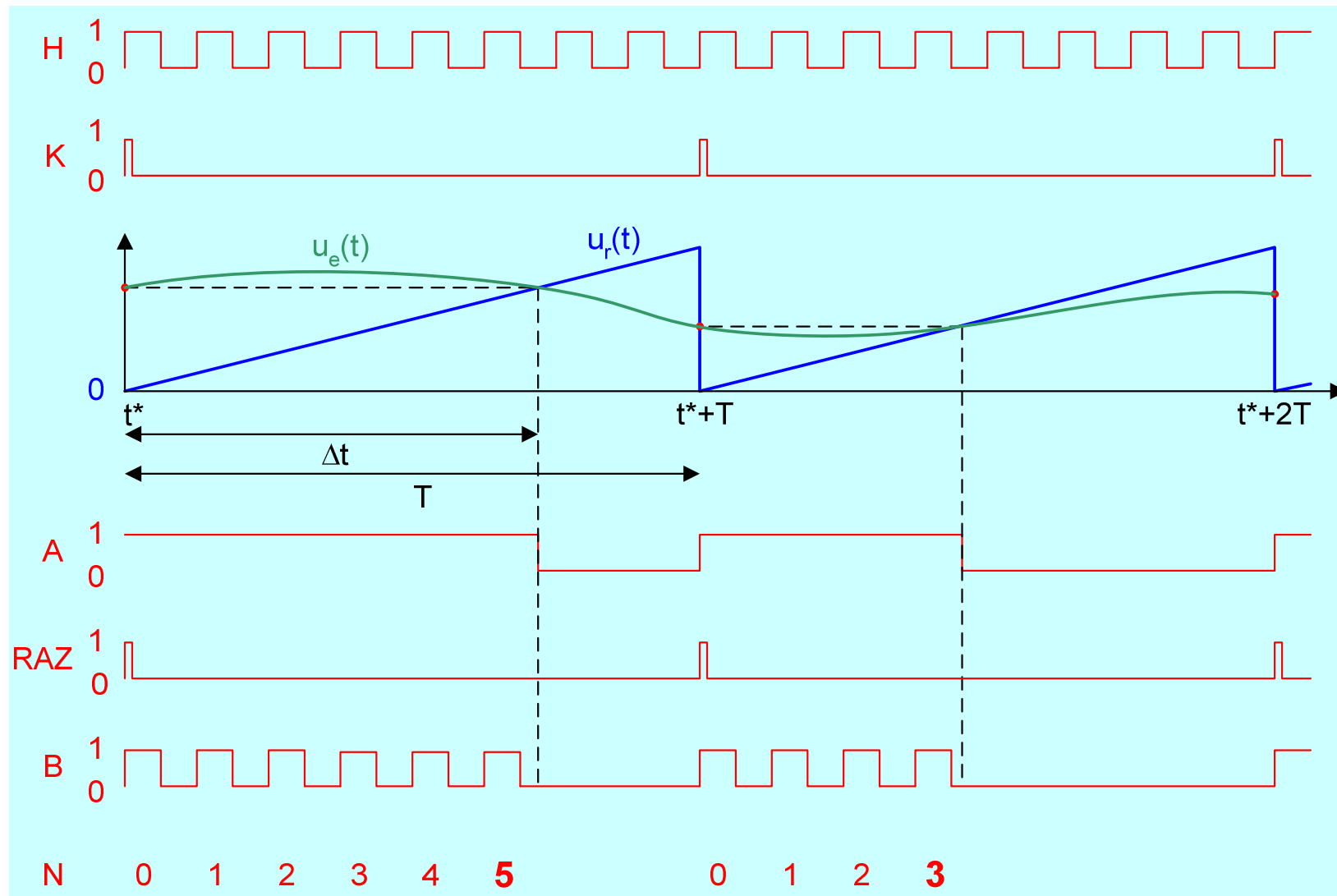
## 2-5-2- CAN « simple rampe »

Schéma (fig. 10a)





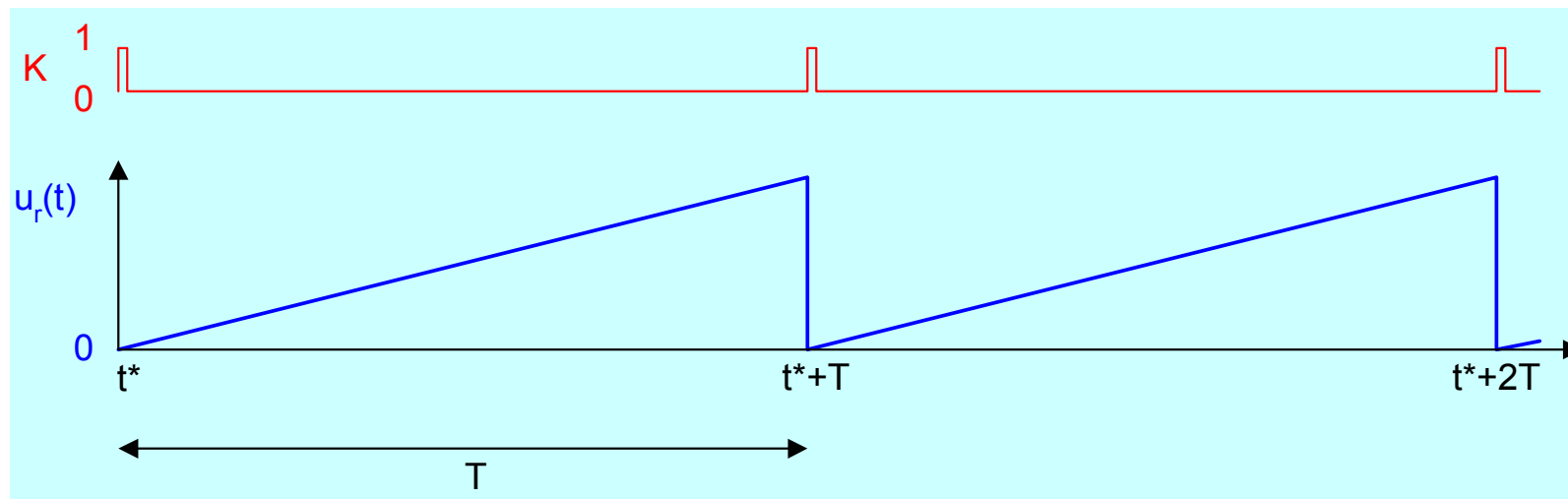
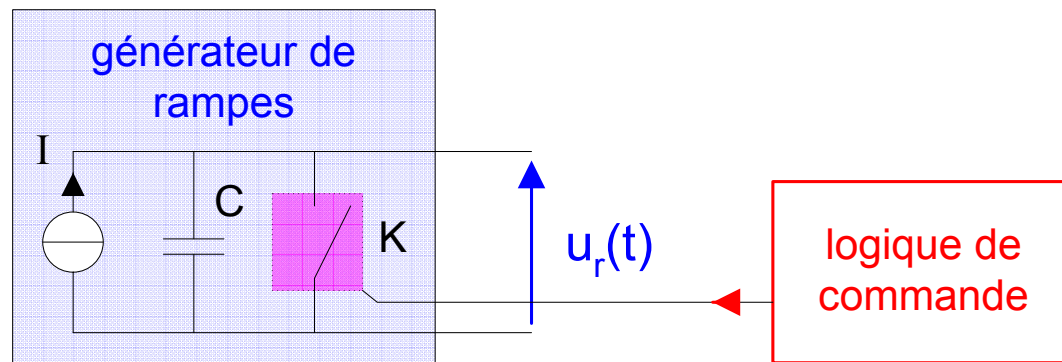
# Chronogrammes (avec $n = 3$ bits) : fig. 10b



## Principe de fonctionnement

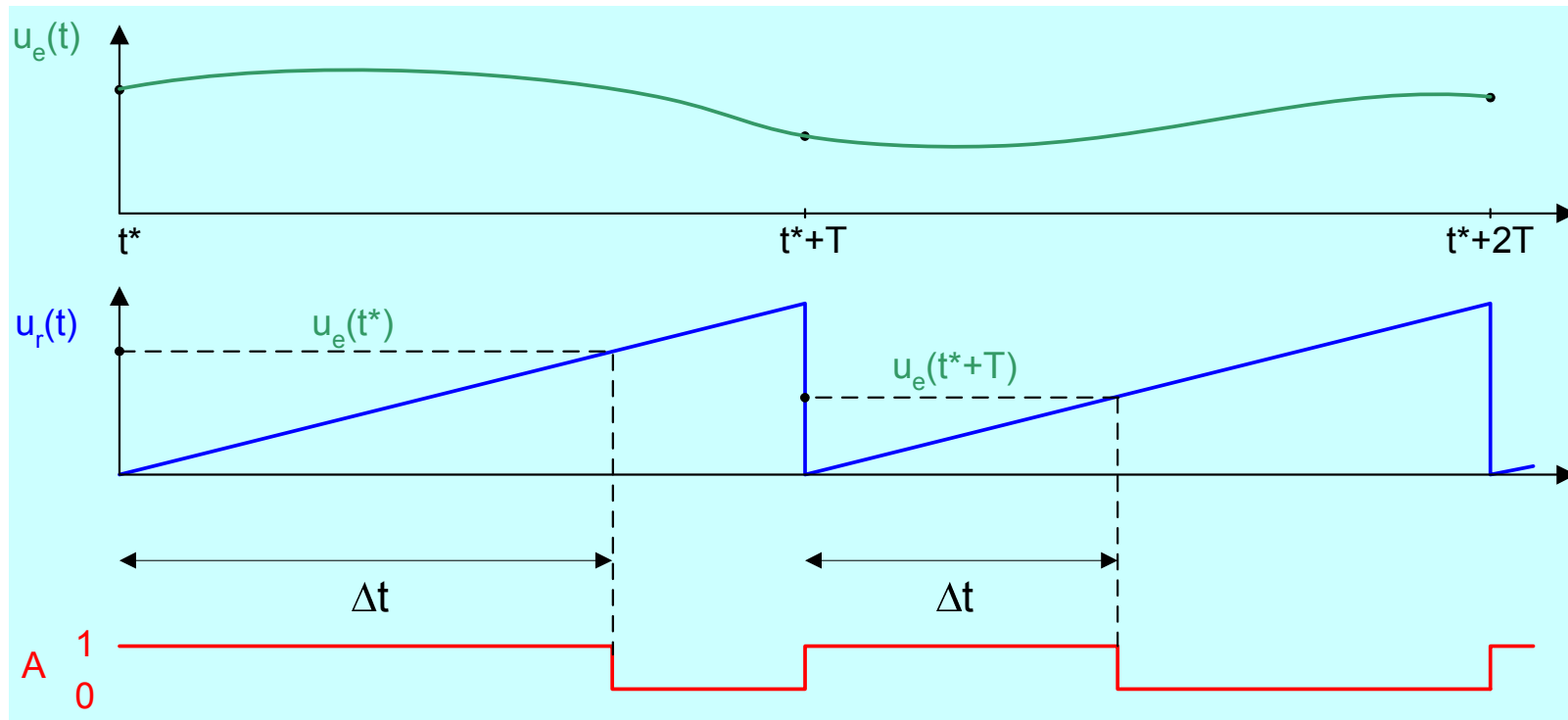
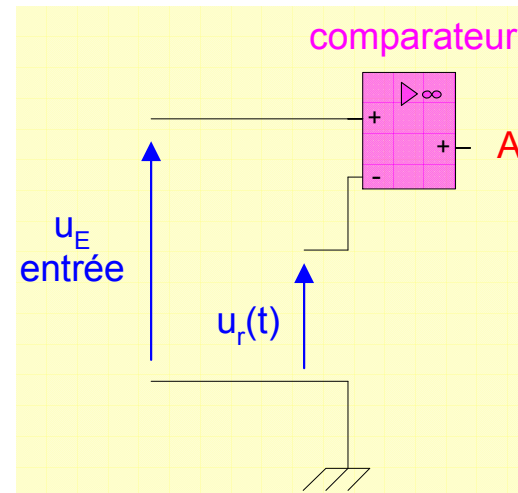
La conversion A/N est indirecte : on se ramène au comptage d'une durée.

### a) Générateur de rampes



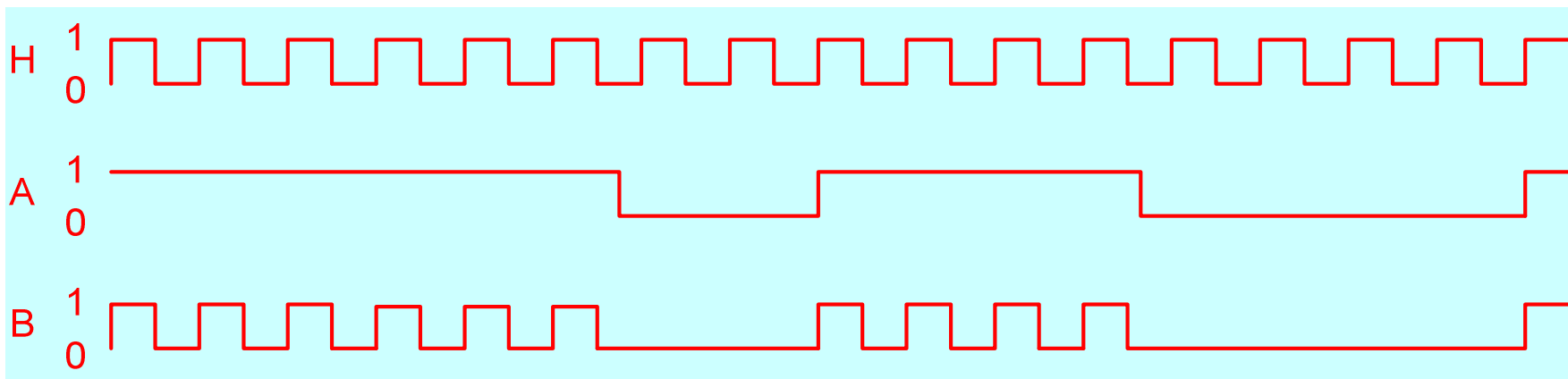
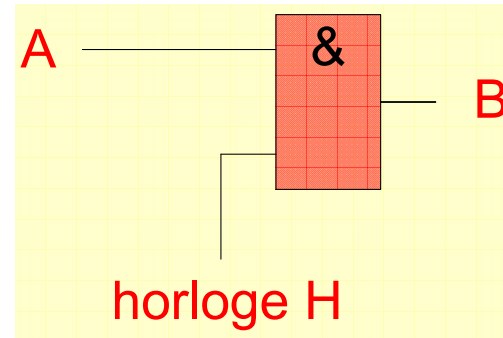
## b) Comparateur

$A = 1$  tant que  $u_E > u_r(t)$

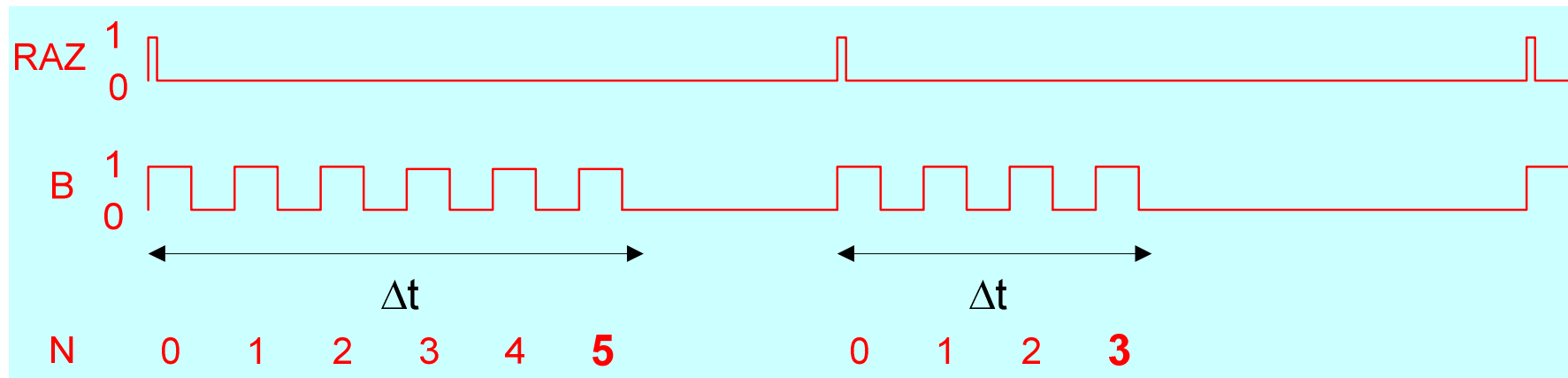
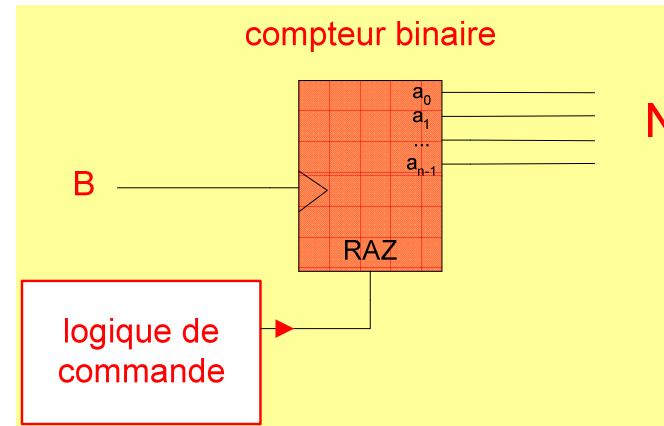


La durée  $\Delta t$  est *proportionnelle* à  $u_E$ .

### c) Porte logique ET



## d) Compteur binaire



**Le résultat en fin de comptage est proportionnel à  $u_E$ .**

La durée de conversion est :  $T_C = T_E = T = 2^n T_H$

Avantage : résolution élevée (application : multimètre numérique)

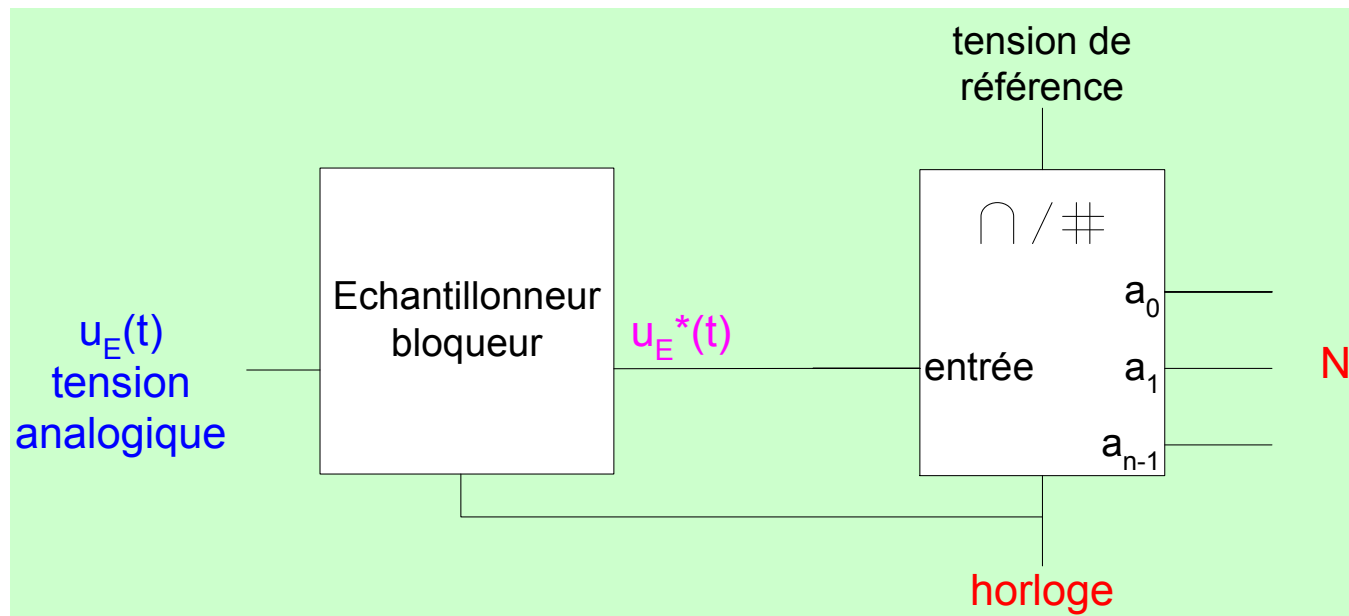
## 2-6- Echantillonneur-bloqueur (sample-and-hold)

La conversion A/N n'est pas instantanée.

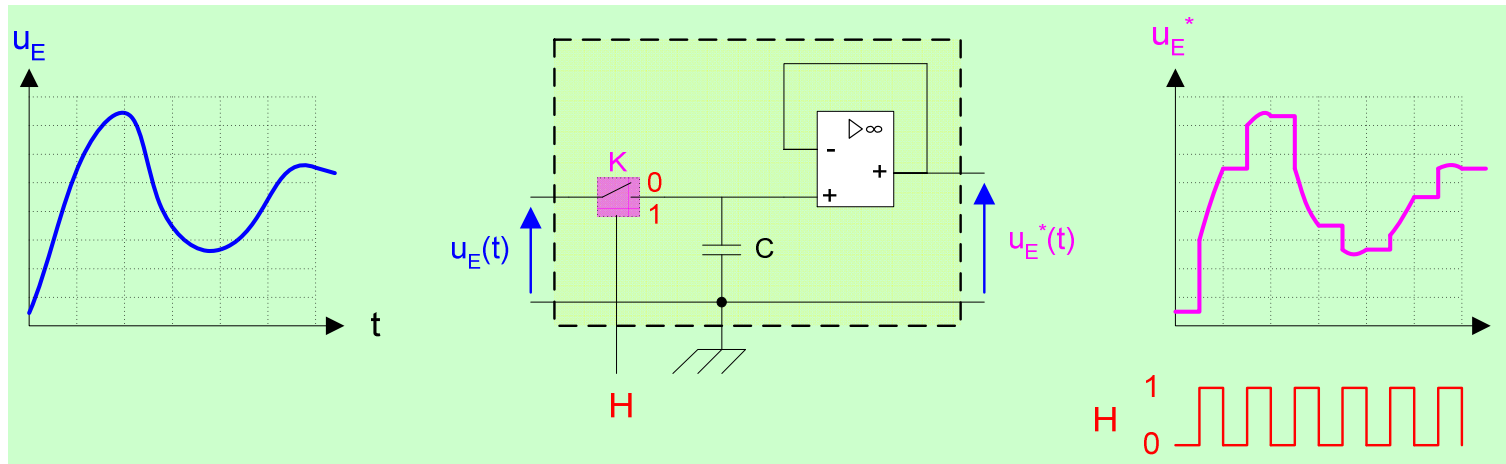
Il faut maintenir la tension d'entrée constante pendant toute la durée de la conversion ( $T_C$ ).

C'est le rôle de l'E-B.

Fig. 11a :



## Exemple de réalisation (fig. 11b)



### Principe de fonctionnement

L'interrupteur  $K$  est commandé par l'horloge  $H$ .

$H = 1$  :  $u_E^* = u_E$

$H = 0$  : phase de blocage (maintien).

C'est pendant cette phase que le CAN réalise la conversion.

### Remarques

$$T_E = T_H$$

E-B inutile si :  $T_{\text{signal d'entrée}} > T_C \pi 2^n$