

## Conversions numérique-analogique (CNA) et analogique-numérique (CAN)

### Module : Acquisition, traitement et transmission du signal

Les sources bibliographiques pour construire ce cours sont les suivantes :

[physiquedehez.free.fr/](http://physiquedehez.free.fr/)

[f.holst.pagesperso-orange.fr/pages/CRSA.html](http://f.holst.pagesperso-orange.fr/pages/CRSA.html)

### TABLE DES MATIERES

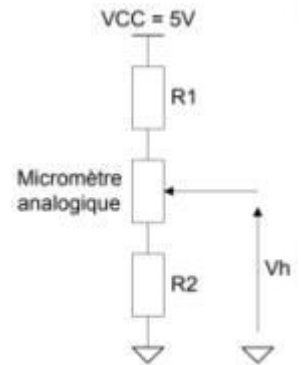
|   |    |
|---|----|
| PROBLEMATIQUE.....  | 2  |
| A QUOI SERVENT LES CAN ET LES CNA ? .....                       | 3  |
| QUELQUES ELEMENTS SUR LA NUMEROTATION DE BASE 2 (BINAIRE) ..... | 3  |
| LA NUMERISATION D'UN SIGNAL ANALOGIQUE.....                     | 5  |
| LA RESTITUTION D'UN SIGNAL ECHANTILLONNE .....                  | 6  |
| LA CARACTERISTIQUE ENTREE-SORTIE D'UN CNA.....                  | 7  |
| CONVERTISSEUR ANALOGIQUE-NUMERIQUE (CAN) .....                  | 8  |
| RETOUR A LA PROBLEMATIQUE.....                                  | 10 |
| RETOUR SUR LE ROLE DE L'ECHANTILLONNEUR-BLOQUEUR .....          | 11 |
| CORRECTION DES EXERCICES .....                                  | 14 |

**PROBLEMATIQUE**

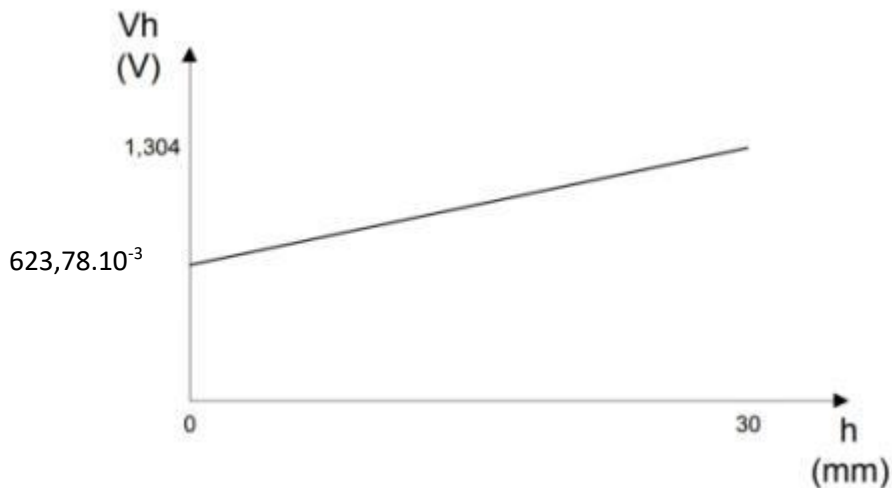
Un système automatisé modulaire, appelé système FESTO, permet de percer et de stocker des pièces réalisées dans des matériaux divers en fonction de leur nature.

Ce système utilise un micromètre analogique pour mesurer la hauteur  $H$  des pièces comprise entre 0 et 30 mm.

Le schéma électrique équivalent du micromètre est un potentiomètre représenté ci-contre dont la position du curseur dépend de la hauteur de la pièce.



La caractéristique de la tension délivrée par le micromètre en fonction de la hauteur de la pièce  $V_h = f(h)$  est la suivante :



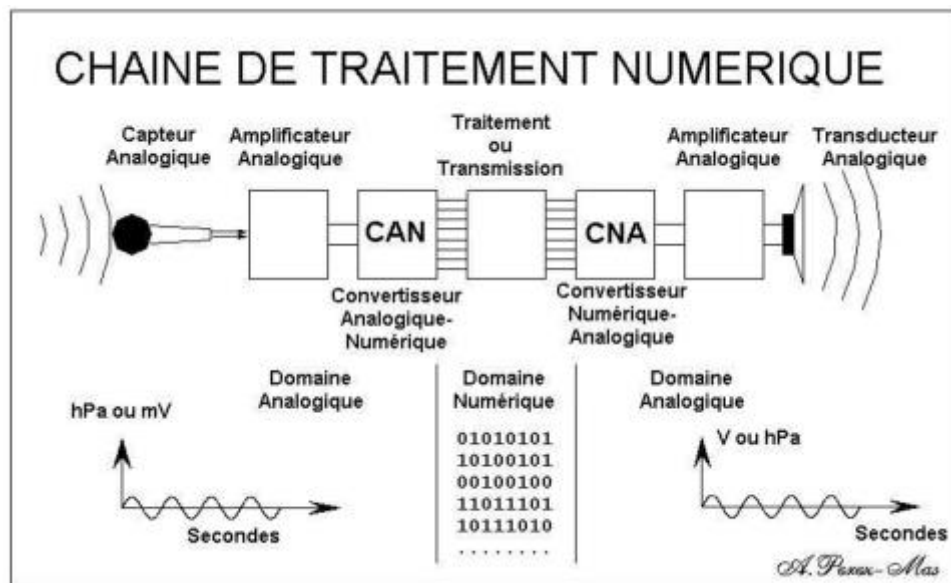
Par ailleurs, la tension  $V_h$  est convertie en un nombre  $N$ . **Cette fonction est réalisée par un convertisseur analogique numérique 8 bits**. L'**excursion** de son signal d'entrée est de **5V** (tension de référence notée  $V_{CC}$  dans le schéma ci-dessus).

**Problématique** : comment cette conversion s'effectue-t-elle ? Que signifie 8 bits ? Une excursion de 5V ?

## A QUOI SERVENT LES CAN ET LES CNA ?

De nombreux systèmes de régulation industrielle comportent des appareils **analogiques** (capteur, actionneur,...) et des appareils **numériques** (ordinateur, automate,...).

Pour relier les appareils entre eux, il est alors nécessaire de réaliser des conversions de l'analogique vers le numérique et inversement. Il existe pour ce faire des convertisseurs numérique-analogique (CNA) et des convertisseurs analogique-numérique (CAN).



On trouvera également ces convertisseurs dans la chaîne de traitement du son : les studios ou les salles de spectacle sont passées au numérique pour les tables de mixages depuis un bon nombre d'années. Par contre, pour capter le son en début de chaîne (micro) et le restituer en fin de chaîne (haut-parleur) on doit passer par un signal analogique. Comme le montre le schéma ci-dessus, les tables de mixage (et autres appareils numérique de traitement ou transmission du son) comportent donc forcément des CAN et des CNA.

Il est nécessaire de connaître quelques éléments sur la numérotation de base 2 (binaire) pour comprendre le fonctionnement des convertisseurs.

## QUELQUES ELEMENTS SUR LA NUMEROTATION DE BASE 2 (BINAIRE)

Qu'est-ce que la numérotation de base 2 (binaire) ?

C'est la numération la plus répandue dans le domaine technique car elle correspond aux états logiques.

Les symboles utilisés sont les deux chiffres 0 et 1 appelés **bit** (binary digit). Comme pour la base 10 et toutes les autres bases, le bit le plus à droite est le bit de rang le plus petit (noté **LSB** pour *Least Significant Bit*) tandis que le bit le plus à gauche est le bit de rang le plus grand (noté **MSB** pour *Most Significant Bit*).

Chaque bit est à multiplier par le poids qui est égal à  $2^{\text{rang}}$ . C'est pourquoi on lui donne le nom de base 2.

Exemple :



La succession des chiffres 11100110 correspond en base 2 à :

$$(11100110)_2 = 1x2^7 + 1x2^6 + 1x2^5 + 0x2^4 + 0x2^3 + 1x2^2 + 1x2^1 + 0x2^0 = (230)_{10} \text{ (lire : « 230 en base 10 »).}$$

**En utilisant n bits :**

- on peut écrire  $2^n$  nombres différents
- le plus grand nombre que l'on peut écrire est  $2^n - 1$

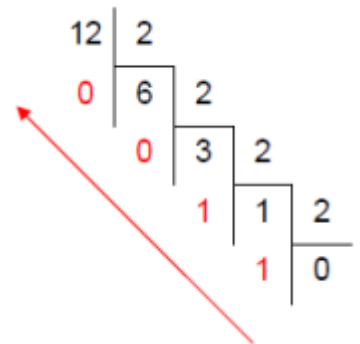
Par exemple : avec 8 bits, le plus grand nombre est 255 ( $=2^8-1$ ). On peut donc écrire les 256 nombres ( $=2^8$ ) compris entre 0 et 255.

Comment convertir un nombre décimal (base 10) en nombre binaire (base 2) ?

**Principe :** on divise successivement par 2 le nombre décimal et la lecture du nombre binaire se fait en écrivant les restes des divisions de bas en haut.

Exemple : le nombre 12 en base 10 s'écrit 1100 en base 2.

$$(12)_{10} = (1100)_2$$



**Exercice 1:**

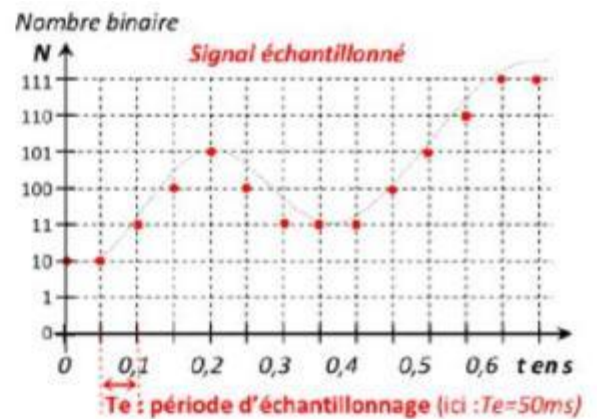
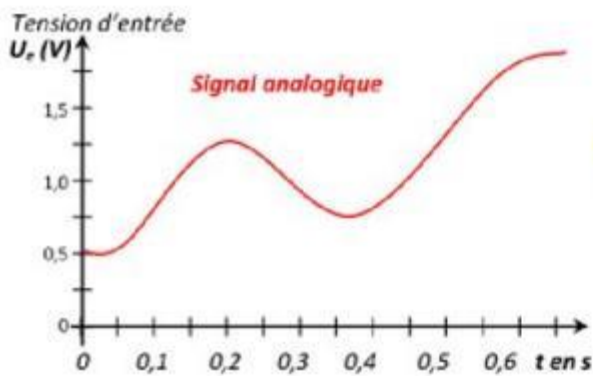
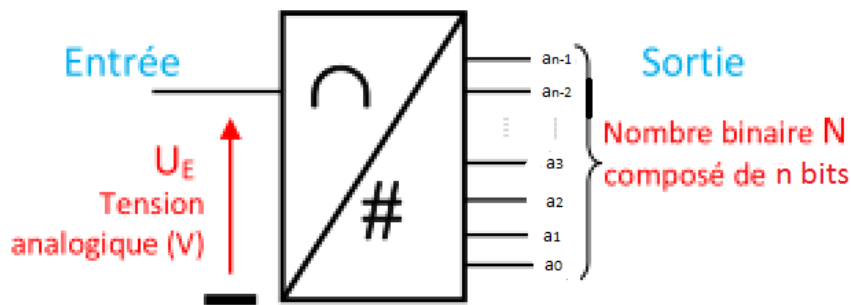
Convertir les nombres décimaux 144, 15, 255 et 100 en binaire.

**LA NUMERISATION D'UN SIGNAL ANALOGIQUE**

Pour stocker ou analyser une tension (ou un courant) provenant d'un capteur, il est nécessaire de la numériser. Pour cela on utilise en électronique un composant nommé le **Convertisseur Analogique Numérique (CAN)**. Le CAN convertit une tension (ou un courant) analogique, que l'on notera  $U_E$ , en mot binaire.



**SYMBOLE DU CAN :**



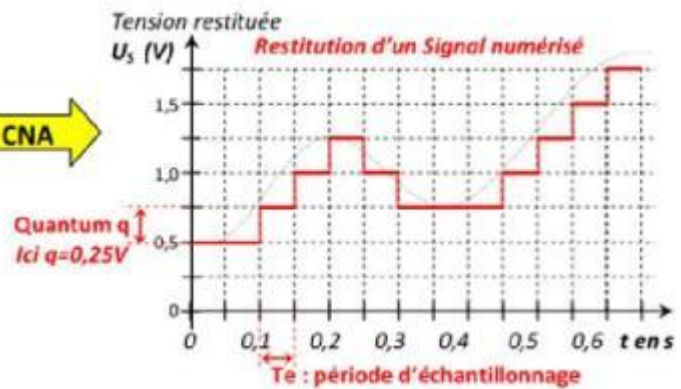
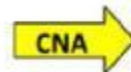
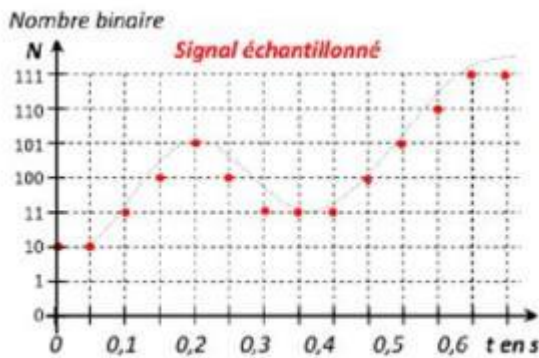
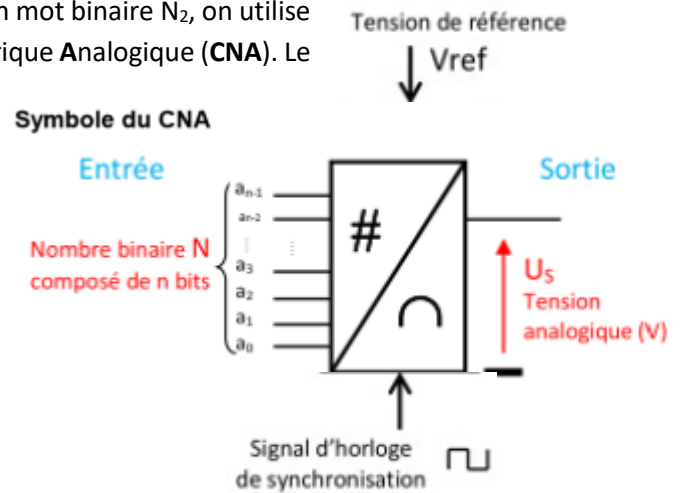
L'**échantillonnage** d'un signal analogique doit être réalisé à intervalle de temps régulier. Cette durée se nomme la période d'échantillonnage  $T_e$  (en seconde). On dit alors que le convertisseur est cadencé par un signal d'horloge.

Lorsqu'on choisit un convertisseur analogique-numérique, il faut donc prendre en compte sa **fréquence d'échantillonnage  $f_e$**  (en Hz) :

$$f_e = \frac{1}{T_e}$$

**LA RESTITUTION D'UN SIGNAL ECHANTILLONNE**

Pour restituer une tension (ou un courant) analogique à partir d'un mot binaire  $N_2$ , on utilise un composant électronique qui se nomme le **Convertisseur Numérique Analogique (CNA)**. Le CNA convertit un mot binaire en tension (ou en courant).



Pour restituer correctement le signal, il faut cadencer l'envoi des nombres vers le CNA par un signal d'horloge à la même fréquence d'échantillonnage  $f_e$ .

Lors de la restitution on peut observer la « hauteur d'une marche » qui correspond au « pas » du convertisseur.

Ce « pas » se nomme le **quantum q** du convertisseur (en V ou A). Le quantum est la plus petite tension (ou courant) que le convertisseur peut sortir. Lorsque le nombre augmente d'une unité alors la tension (ou courant) de sortie augmente d'un quantum.

Le CNA permet de convertir un nombre  $N_{10}$  en tension analogique  $U_s$  proportionnelle. La relation entre  $U_s$  et  $N_{10}$  est donnée par :

$$U_s = q \times N_{10}$$

$\swarrow$  *Tension de sortie (en V)*       $\uparrow$  *quantum du convertisseur (en V)*       $\nwarrow$  *Nombre décimal à convertir*

L'un des moyens pour calculer le quantum en fonction de la tension de référence du constructeur est d'utiliser la relation :

$$q = \frac{E}{2^n - 1}$$

↖
↖
↑

Quantum du convertisseur (en V)      Excursion (en V)      n : nombre de bits

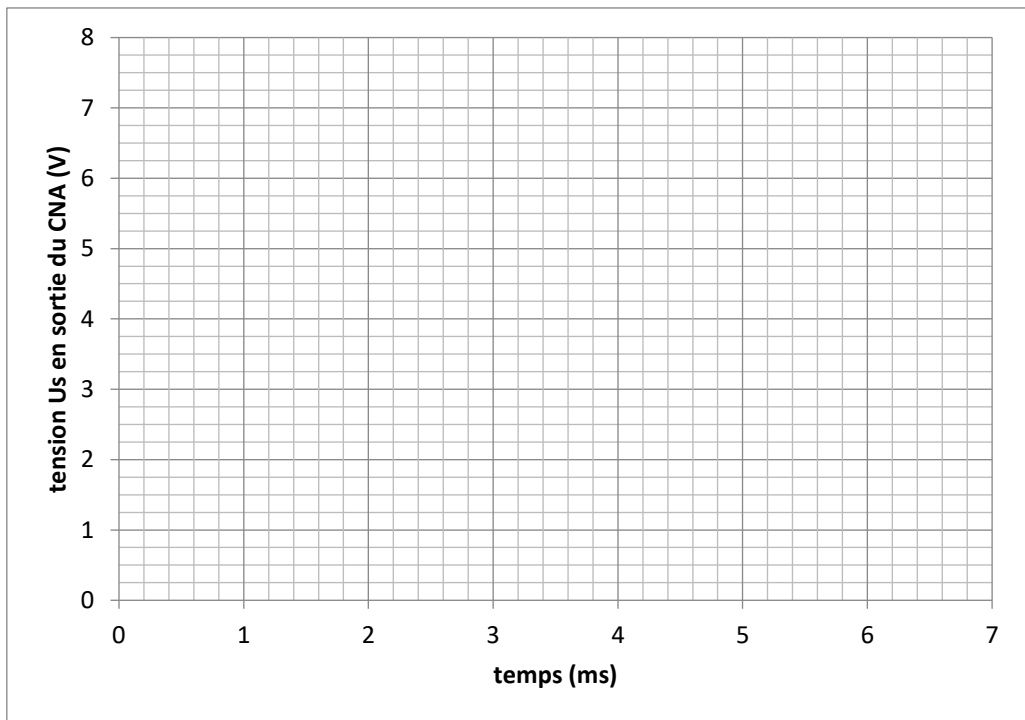
L'excursion E représente la valeur maximale de la tension de sortie  $U_s$  donc quand tous les bits sont à 1.

**Exercice 2 :**

Un microprocesseur envoie une suite de nombres successifs avec une fréquence  $f_e = 5$  kHz sur un CNA de 4 bits de d'excursion 7,5 V :

8-9-10-11-12-12-13-13-14-14-14-13-13-13-12-12-11-10-9-8-7-6-5-4-4-3-3-2-2-2-3-3-4-4-5-6-....

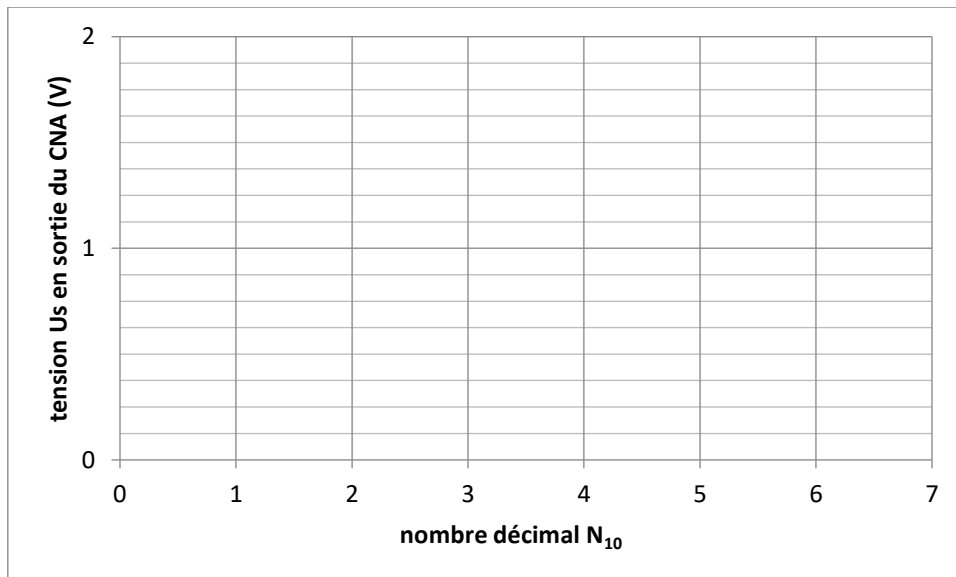
- 1) Calculer la période d'échantillonnage  $T_e$ .
- 2) Calculer le quantum du convertisseur q.
- 3) Représenter la tension en sortie du convertisseur :



**LA CARACTERISTIQUE ENTREE-SORTIE D'UN CNA**

La caractéristique d'un CNA représente l'évolution de la tension de sortie  $U_s$  (V) en fonction du nombre entier N en entrée. N peut-être indiqué en nombre binaire ( $N_2$ ) ou décimal ( $N_{10}$ ).

**Exercice 3 :** Après avoir calculé le quantum du convertisseur, représenter la caractéristique d'un CNA 3 bits d'excursion  $E = 1,75$  V.



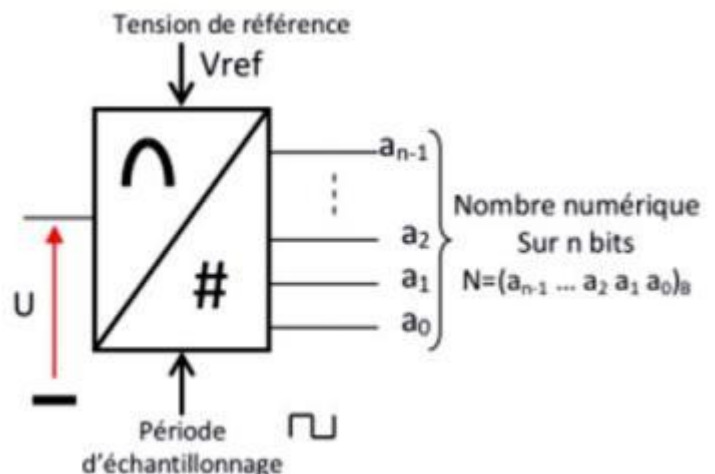
### CONVERTISSEUR ANALOGIQUE-NUMERIQUE (CAN)

Il permet de convertir une tension  $U$  en un nombre binaire.

Il est possible de déterminer, par calcul, le nombre décimal associé à la valeur de  $U$  :

$$N_{10} = \frac{U}{q}$$

Remarque : il faut prendre, après avoir fait le calcul, la valeur entière du nombre obtenu.



Un CAN associe un nombre à une tension qui doit rester constante pendant toute la durée de la conversion. Comme le signal est susceptible de varier, il est indispensable d'associer le CAN à un **échantillonneur bloqueur** qui va :

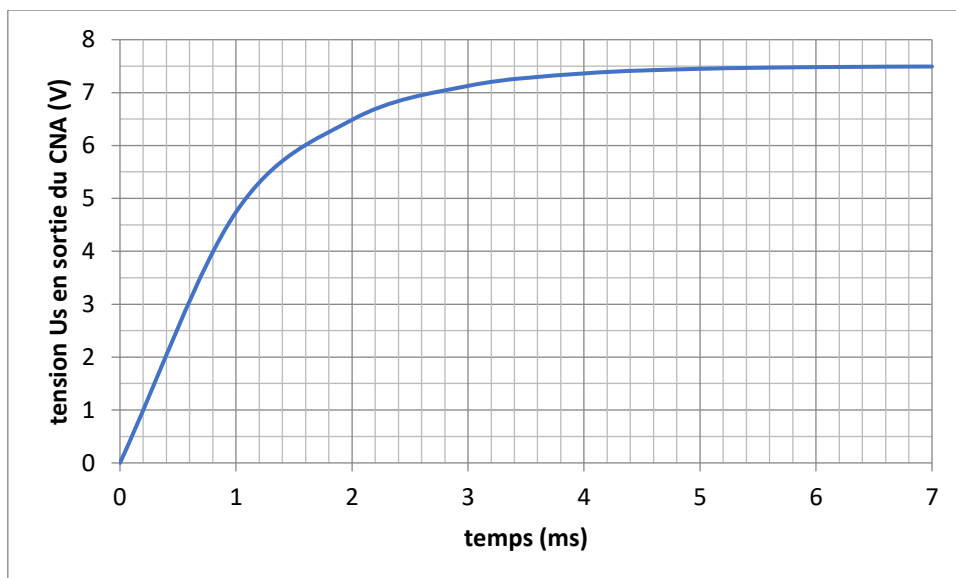
- Prélever des échantillons du signal à intervalles de temps réguliers
- Maintenir la valeur prélevée pendant une durée suffisante pour que le CAN puisse effectuer la conversion.

Dans une chaîne d'acquisition d'un signal, l'échantillonneur bloqueur est placé en amont du CAN.

**Exercice 4** : Soit une tension analogique  $U(t)$  qui arrive sur un convertisseur analogique-numérique de période d'échantillonnage  $T_e = 0,2$  ms.

Tracer la tension obtenue à la sortie de l'échantillonneur-bloqueur.



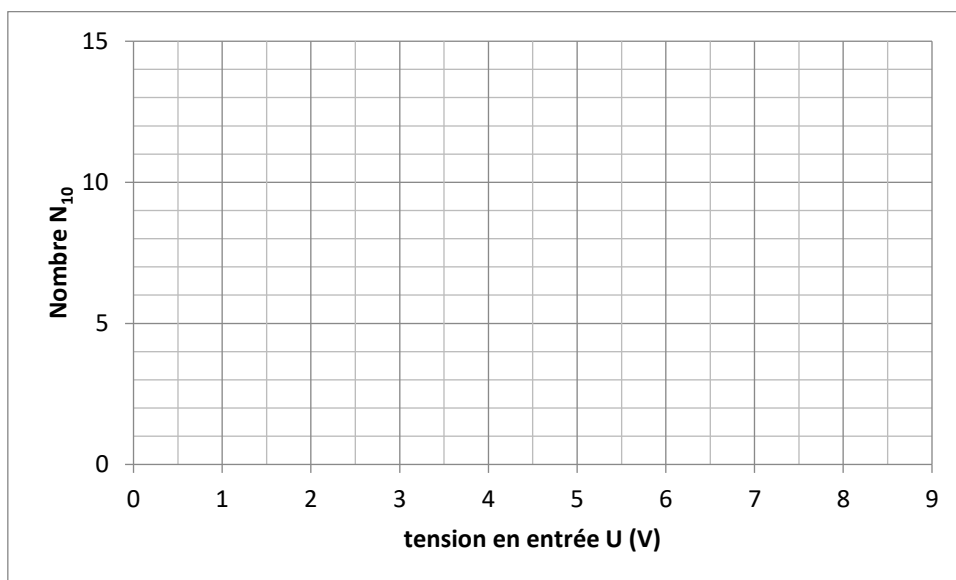


Le signal numérisé sera d'autant plus riche en informations que l'intervalle de tension qui sera codé par le même nombre binaire sera petit.

**Définition :** la résolution du CAN sera l'intervalle de tension d'entrée à laquelle correspondra un même nombre binaire.

**Définition :** la caractéristique d'entrée-sortie d'un CAN représente l'évolution du nombre binaire  $N_2$  (ou nombre décimal  $N_{10}$ ) en fonction de la tension d'entrée  $U$  en V analogique.

**Exercice 5 :** Après avoir calculé le quantum  $q$  du convertisseur, représenter la caractéristique d'entrée-sortie d'un CAN 4 bits, d'excursion  $E = 7,5$  V.



**RETOUR A LA PROBLEMATIQUE**

1) Etude de la caractéristique  $V_h = f(h)$  (voir page 1) :

- a. On a  $V_h = k \times h + V_{h_0}$ . Déterminer  $k$  et  $V_{h_0}$ . Quelles sont leurs unités?
- b. Compléter la première colonne du tableau suivant en calculant la valeur de  $V_h$  pour les différentes hauteurs de pièces :

| Hauteur (mm) | $V_h$ (V) | $N_{10}$ | $a_7$ | $a_6$ | $a_5$ | $a_4$ | $a_3$ | $a_2$ | $a_1$ | $a_0$ |
|--------------|-----------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0            |           |          |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 22           |           |          |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 25           |           |          |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 27           |           |          |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 30           |           |          |       |       |       |       |       |       |       |       |

2) Etude du convertisseur analogique-numérique  $V_h/N$  (8 bits, excursion 5V)

- a. Calculer le quantum du convertisseur.
- b. Quelle est la relation entre le nombre décimal  $N_{10}$  et  $V_h$  ?
- c. Compléter alors le tableau précédent en indiquant les valeurs  $N_{10}$  (deuxième colonne).
- d. Compléter le tableau en indiquant les nombres binaires ( $a_7, a_6, \dots a_0$ ) correspondants.

**RETOUR SUR LE ROLE DE L'ÉCHANTILLONNEUR-BLOQUEUR**

**Rappel :** un CAN associe un nombre à une tension qui doit rester constante pendant toute la durée de la conversion. Comme le signal est susceptible de varier, il est indispensable d'associer le CAN à un échantillonneur bloqueur qui va :

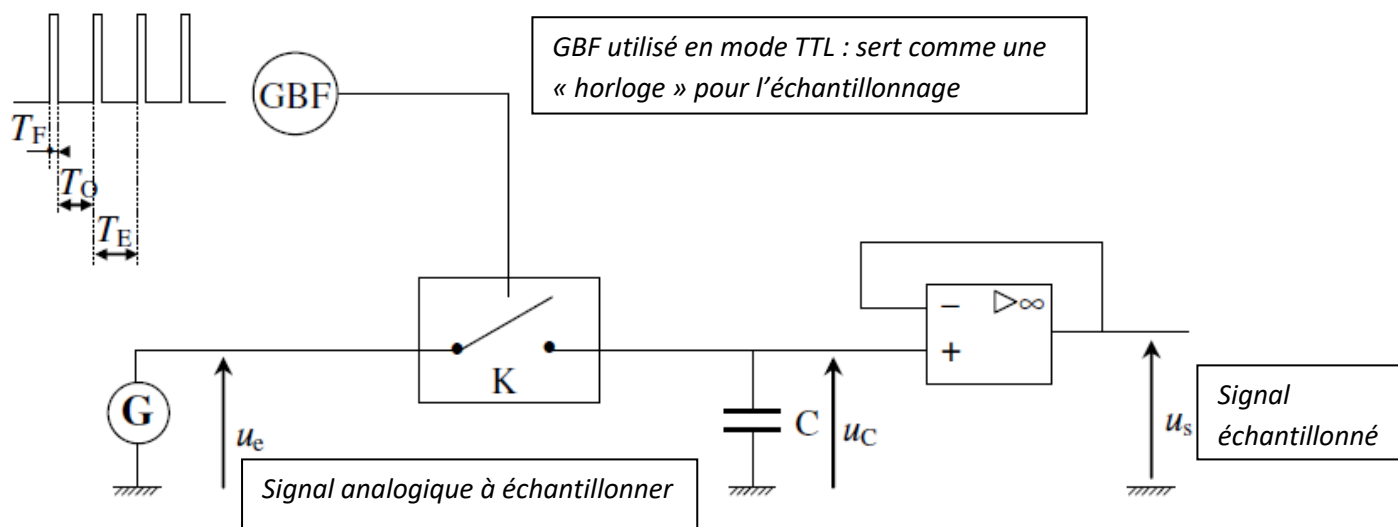
- Prélever des échantillons du signal à intervalles de temps réguliers
- Maintenir la valeur prélevée pendant une durée suffisante pour que le CAN puisse effectuer la conversion.

Dans une chaîne d'acquisition d'un signal, l'échantillonneur bloqueur est placé en amont du CAN.

Un signal appelé horloge régit l'échantillonnage de la grandeur analogique d'entrée. Dans la pratique, l'échantillonnage peut être cadencé par un GBF extérieur en sortie TTL.

Remarque : un GBF utilisé en sortie TTL envoie une tension créneau (tout ou rien) de valeur minimale 0V et de valeur maximale 5V. La fréquence et le rapport cyclique peuvent être commandés. On a donc bien une « horloge » qui va régir l'échantillonnage.

Le schéma de principe de l'échantillonneur-bloqueur est le suivant :



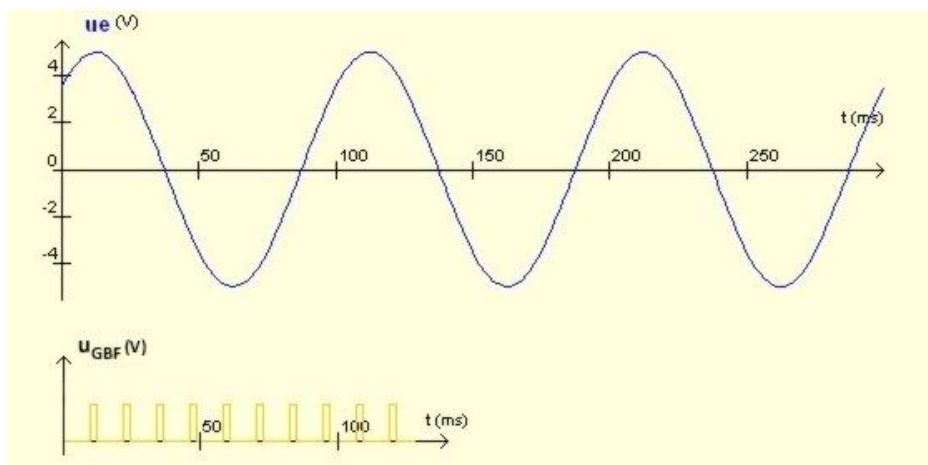
Le signal analogique à échantillonner (signal envoyé par une alimentation G ou microphone amplifié) est branché aux bornes d'un condensateur C par l'intermédiaire d'un interrupteur K commandé par un GBF en sortie TTL. Le condensateur est branché à l'entrée positive d'un amplificateur opérationnel (AOp) monté en suiveur.

Lorsque la sortie TTL est en mode « rien », l'interrupteur est ouvert. Lorsqu'elle est en mode « tout », l'interrupteur est fermé. La fréquence des créneaux est la fréquence d'échantillonnage. On utilise le rapport cyclique de la sortie TTL pour limiter la durée  $T_F$  de l'interrupteur et, corrélativement, augmenter la durée  $T_0$  d'ouverture de l'interrupteur.

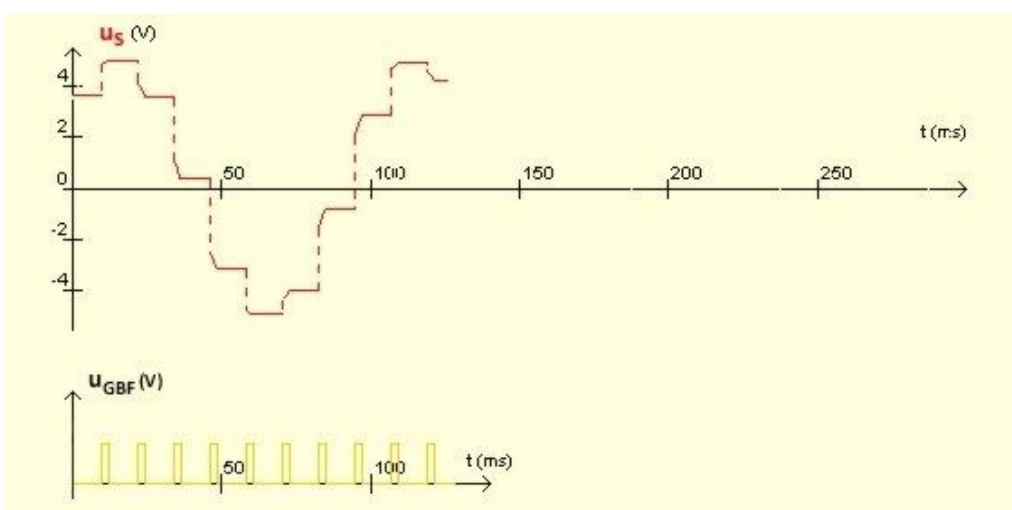
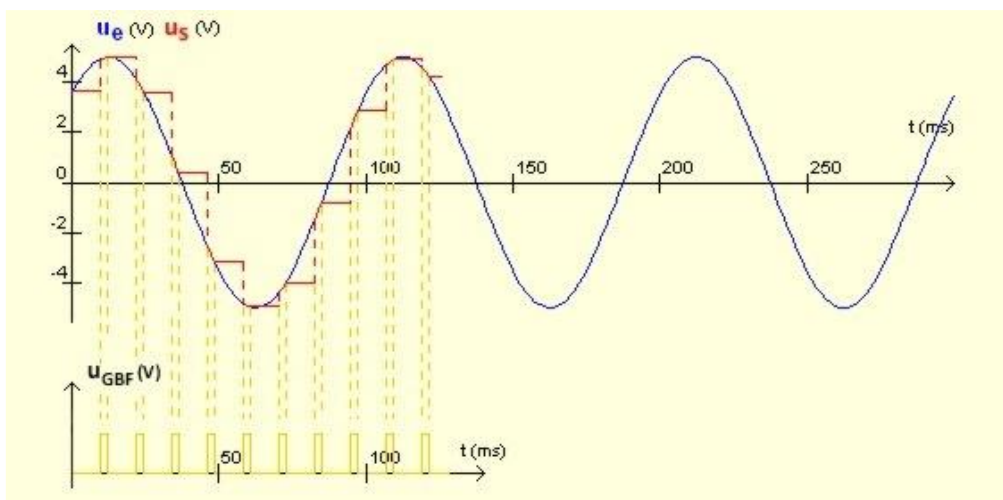
Lorsque l'interrupteur est fermé, la tension aux bornes du condensateur  $u_C$  est égale à la tension d'entrée  $u_E$ . Lorsque l'interrupteur est ouvert, le condensateur ne peut se décharger grâce au montage suiveur et la tension à ses bornes reste constante et égale à la valeur atteinte à l'ouverture de l'interrupteur. Dans ce montage, on a  $u_s = u_C$ .

Exemple : soit  $u_e$  un signal analogique à échantillonner. La fréquence du signal est de 10 Hz.

$u_{GBF}$  représente la sortie TTL d'un générateur de fréquence 80 Hz et de rapport cyclique 25%.



Le signal échantillonné obtenu est celui représenté en rouge :



**Exercice 6 (expérience)** : Quelle est l'influence de la fréquence d'échantillonnage sur le signal obtenu en sortie de l'échantillonneur bloqueur ?

Signal analogique

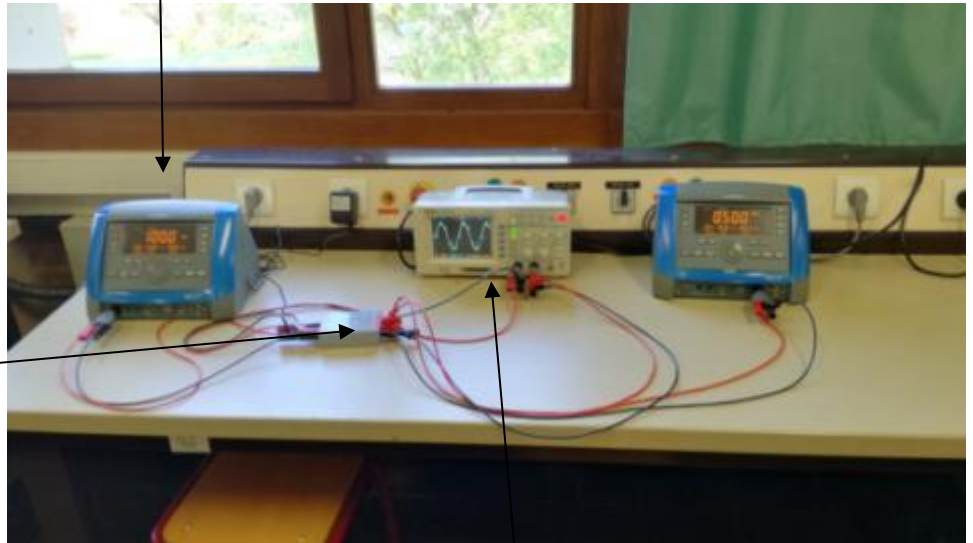
GBF en sortie TTL (cadence l'échantillonnage)

**Manipulation bureau :**

On souhaite échantillonner un signal analogique sinusoïdal de fréquence 100 Hz à l'aide d'un échantillonneur-bloqueur.

Le montage est représenté ci-contre :

Echantillonneur-bloqueur



Oscilloscope  
CH1 : signal analogique  
CH2 : signal échantillonné

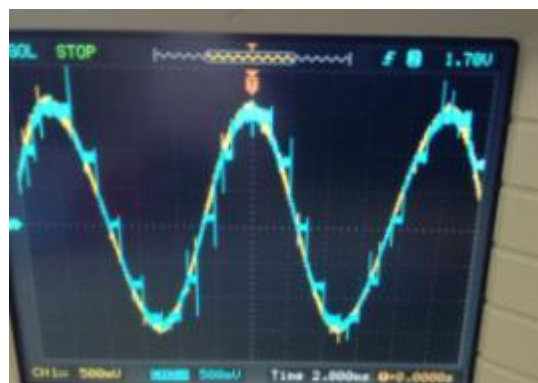
On réalise l'échantillonnage-blocage avec plusieurs fréquences d'échantillonnage : 50 Hz, 100 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz et 2000 Hz.

1) Associer à chaque signal échantillonné ci-dessous la fréquence d'échantillonnage correspondant. Justifier.

1



2



3



4





5



6

2) Commenter le théorème de Shannon<sup>1</sup> :

Pour une bonne restitution d'un signal sinusoïdal de fréquence  $f$  à partir d'échantillons prélevés à la fréquence  $f_E$ , il faut que :

$$f_E > 2f$$

3) Dans quel cas (1 à 6), la fréquence d'échantillonnage est-elle satisfaisante ?

### CORRECTION DES EXERCICES

Exercice 1 :

$$(144)_{10} = (10010000)_2$$

$$(15)_{10} = (1111)_2$$

$$(255)_{10} = (11111111)_2$$

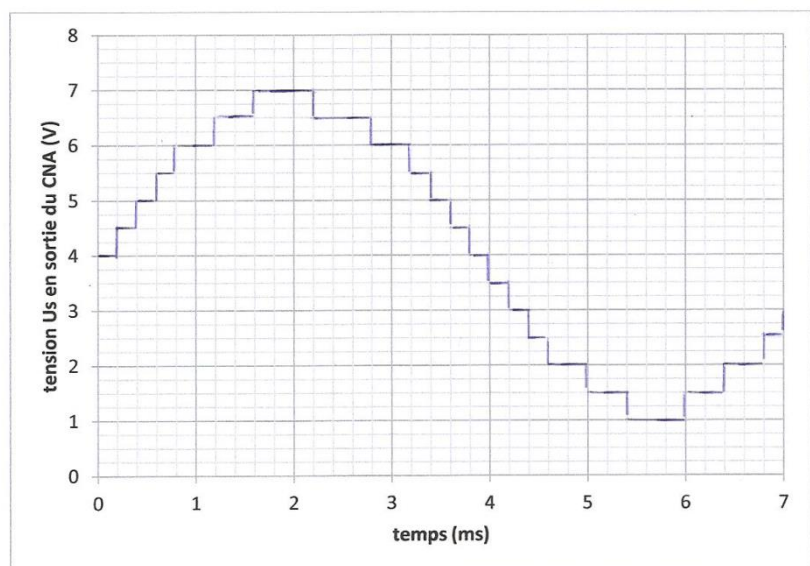
$$(100)_{10} = (1100100)_2$$

Exercice 2 :

$$1) T_e = \frac{1}{f_e} = \frac{1}{5000} = 0,2 \text{ ms}$$

$$2) q = \frac{7,5}{2^4 - 1} = 0,5 \text{ V}$$

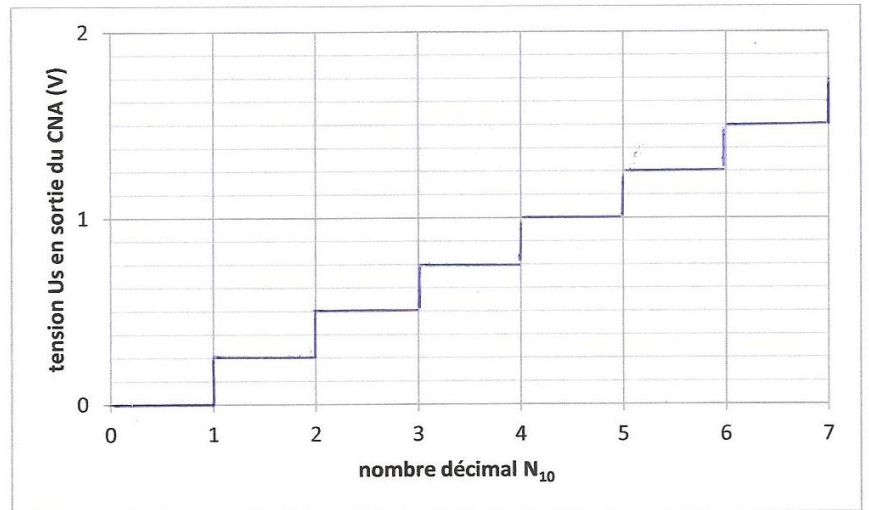
$$3) \text{ On utilise } U_S = q \times N_{10}$$



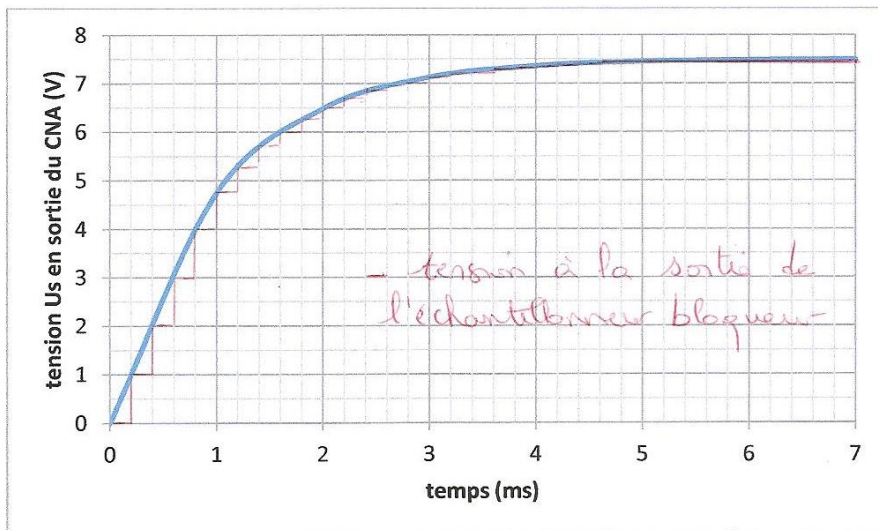
<sup>1</sup> <https://centenaire-shannon.cnrs.fr/>

Exercice 3 :

$$q = \frac{E}{2^n - 1} = \frac{1,75}{2^3 - 1} = 0,25 \text{ V}$$

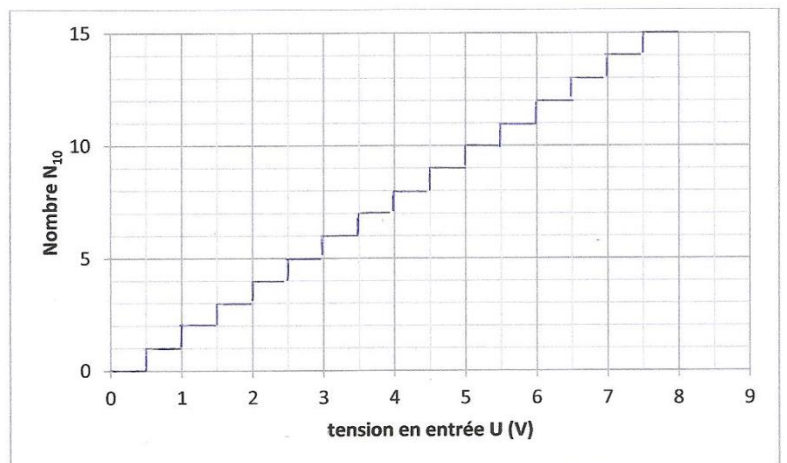


Exercice 4 :



Exercice 5 :

$$q = \frac{E}{2^n - 1} = \frac{7,5}{2^4 - 1} = 0,5 \text{ V}$$



Retour à la problématique :

1)

- a.  $V_{h0}$  est l'ordonnée à l'origine :  $V_{h0} = 623,78 \cdot 10^{-3} \text{ V} = 623,78 \text{ mV}$   
 k est le coefficient directeur de la droite.

$$k = \frac{1,304 - 623,78 \cdot 10^{-3}}{30 - 0} = 2,267 \cdot 10^{-2} \text{ V} \cdot \text{mm}^{-1}$$

b.

| Hauteur (mm) | $V_h$ (V)              | $N_{10}$ | $a_7$ | $a_6$ | $a_5$ | $a_4$ | $a_3$ | $a_2$ | $a_1$ | $a_0$ |
|--------------|------------------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0            | $623,78 \cdot 10^{-3}$ | 31       | 0     | 0     | 0     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     |
| 22           | 1,123                  | 57       | 0     | 0     | 1     | 1     | 1     | 0     | 0     | 1     |
| 25           | 1,191                  | 60       | 0     | 0     | 1     | 1     | 1     | 1     | 0     | 0     |
| 27           | 1,236                  | 63       | 0     | 0     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     |
| 30           | 1,304                  | 66       | 0     | 1     | 0     | 0     | 0     | 0     | 1     | 0     |

2)

- a.  $q = \frac{E}{2^{n-1}} = \frac{5}{2^{8-1}} = 19,6 \text{ mV}$   
 b.  $V_h = q \times N_{10} \Leftrightarrow N_{10} = \frac{V_h}{q}$   
 c. Voir tableau  
 d. Voir tableau

Exercice 6 :

1)

| Fréquence (Hz) | Image |
|----------------|-------|
| 50             | 5     |
| 100            | 6     |
| 250            | 3     |
| 500            | 1     |
| 1000           | 2     |
| 2000           | 4     |

- 2) 3) On remarque que plus la fréquence d'échantillonnage augmente, meilleur est celui-ci. Le critère de Shannon est un peu léger. Pour 250 Hz, soit deux fois et demi la fréquence du signal, l'échantillonnage n'est pas acceptable (image 3). Pour une fréquence d'échantillonnage égale à 2000 Hz, soit 20 fois la fréquence du signal, nous obtenons un résultat satisfaisant (image 4).