

**Comment fonctionne un convertisseur analogique ↔ numérique ?**

Un convertisseur analogique – numérique (CAN) est un dispositif électronique permettant la conversion d'un signal analogique (c'est-à-dire un signal continu en temps et en amplitude) en un signal numérique (c'est-à-dire un signal discret en temps et en amplitude).

**1. NUMERISATION D'UN SIGNAL TRIANGULAIRE**

- A l'aide de l'oscilloscope, régler le générateur pour qu'il délivre un signal triangulaire de fréquence environ 20 Hz et d'amplitude 5 V. (si nécessaire, utiliser un contrôleur en fréquencemètre pour le réglage de la fréquence)
- Brancher le générateur basse fréquence à l'entrée de la maquette.
- Relier:
  - les bornes d'entrée de la maquette aux bornes EA0 et masse (  ) du boîtier d'acquisition
  - les bornes de sortie de la maquette aux bornes EA1 et masse (  ) du boîtier d'acquisition
- Dans le menu Paramètres du logiciel Synchronie, régler les paramètres d'acquisition comme suit:
  - Entrée EA0, Automatique, calibre -5 / +5, cocher fenêtre 1
  - Entrée EA1, Automatique, calibre -5 / +5, cocher fenêtre 1
  - Acquisition 10 000 points, Durée échantillon 10 µs, Durée totale 100 ms
  - Déclenchement EA0, niveau 0, sens croissant.
- Sur la maquette sélectionner: 2 bits, Direct.
- Déclencher une acquisition en appuyant sur F10.
- Observer les signaux à l'écran. EA0 est le signal analogique, EA1 est le signal numérique.

Pour numériser EA0, il a fallu le découper en échantillons. Pendant la durée d'un échantillon, la valeur du signal numérique est maintenue constante. Cette valeur est stockée dans le convertisseur sous la forme d'un nombre binaire. Ainsi, conceptuellement, la conversion analogique – numérique peut être divisée en trois étapes :

1. ***L'échantillonnage temporel***: on découpe le signal analogique en échantillons
2. ***la quantification***: pendant la durée d'un échantillon la valeur du signal numérique ne peut être égale qu'à certaines valeurs
3. ***le codage***: la valeur du signal numérique est traduite en un nombre binaire.

Le but de ce TP est de comprendre la mise en œuvre de ces trois étapes ainsi que leur influence sur la qualité du signal numérique final.

Dans un premier temps nous verrons les étapes quantification et codage. L'échantillonnage temporel sera vu dans un deuxième temps.

**2. QUANTIFICATION ET CODAGE**

**2.1. Le paramètre important: le nombre de bits du convertisseur**

- Observer l'acquisition précédente et à l'aide du réticule déterminer les valeurs possibles pour le signal numérique. Au total combien de valeurs obtenez-vous? Sont-elles régulièrement espacées? Compléter le tableau ci-dessous.
- Recommencer une acquisition similaire à celle du paragraphe 1 (dans les paramètres d'acquisition de Synchronie, cliquer sur Courbes, Remplacer) mais en sélectionnant: 4 bits, Direct sur la maquette. Refaire alors le décompte du nombre de valeurs possibles pour le signal numérique et déterminer l'intervalle minimal entre deux valeurs ou le ***pas du convertisseur***. Compléter le tableau ci-dessous.

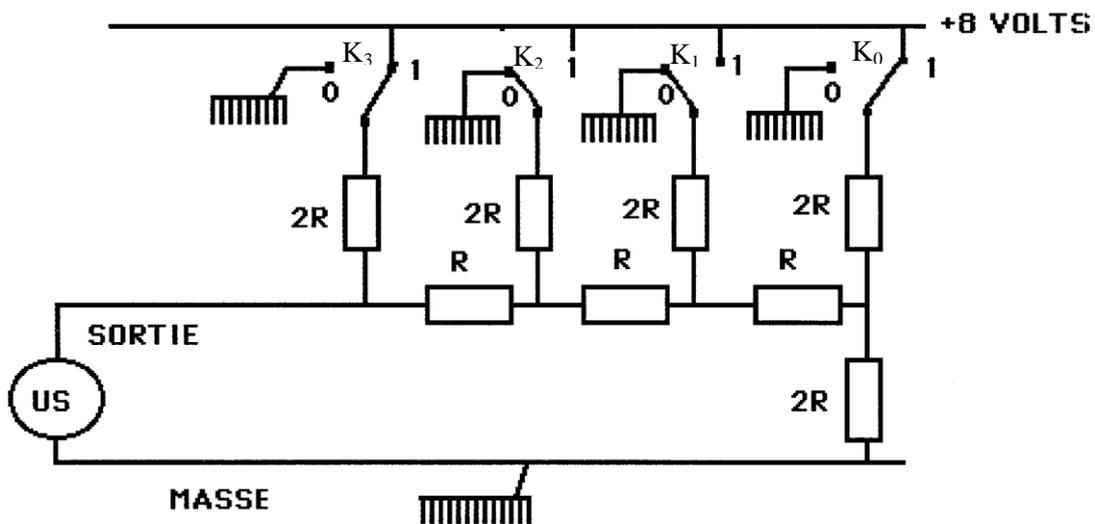
Nombre de bits	Valeurs possibles du signal numérique (V)	Nombre total de valeurs possibles	Intervalle minimal entre deux valeurs possibles <i>Pas du convertisseur</i>
2			
4			

- **Conclusion:** indiquer comment varie le nombre total de valeurs disponibles et le pas du convertisseur lorsque le nombre de bits du convertisseur augmente:

**2.2. Quantification: principe d'un convertisseur 4 bits** (manipulation à la paillasse prof: venir voir par binôme le montage)

Le but de ce paragraphe est d'étudier le fonctionnement d'un convertisseur analogue à celui qui se trouve dans la maquette.

Réaliser le montage correspondant au schéma ci-dessous:



Consignes pour le montage:

- la tension de 8 V est la tension de référence (notée  $U_{ref}$ ); elle est délivrée par une alimentation stabilisée continue. Commencer par régler précisément (c'est-à-dire en utilisant un voltmètre) la sortie de l'alimentation à la valeur 8 V.
- les interrupteurs  $K_0$ ,  $K_1$ ,  $K_2$  et  $K_3$  seront remplacés par 4 petits fils qui seront, à partir du résistor  $2R$ , soit reliés à la masse, soit reliés à la ligne de 8 V.
- la tension de sortie  $U_s$  est mesurée avec un voltmètre réglé sur 20 V continu.
- suivant les postes  $R$  vaut 1 k $\Omega$  ou 10 k $\Omega$ .

Les interrupteurs  $K_0$ ,  $K_1$ ,  $K_2$  et  $K_3$  représentent respectivement les 4 bits  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  et  $a_3$  du convertisseur. Pour chaque bit on a:

- fil relié à la masse  $\Leftrightarrow$  interrupteur  $K$  ouvert  $\Rightarrow$  valeur du bit: 0
- fil relié à la ligne de 8 V  $\Leftrightarrow$  interrupteur  $K$  fermé  $\Rightarrow$  valeur du bit: 1

L'état de l'ensemble des interrupteurs  $K_0$ ,  $K_1$ ,  $K_2$  et  $K_3$  est associé à un nombre binaire de 4 bits ( $a_3$ ,  $a_2$ ,  $a_1$ ,  $a_0$ ). Par exemple la position des interrupteurs sur le schéma correspond au nombre binaire 1001.

En positionnant correctement les fils servant d'interrupteurs selon les valeurs des bits dans le tableau ci-dessous, mesurer la tension  $U_s$  et compléter le tableau ci-dessous:

Nombre binaire	a <sub>3</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>0</sub>	Us (V)
0000	0	0	0	0	
0001	0	0	0	1	
0010	0	0	1	0	
0011	0	0	1	1	
0100	0	1	0	0	
0101	0	1	0	1	
0110	0	1	1	0	
0111	0	1	1	1	
1000	1	0	0	0	
1001	1	0	0	1	
1010	1	0	1	0	
1011	1	0	1	1	
1100	1	1	0	0	
1101	1	1	0	1	
1110	1	1	1	0	
1111	1	1	1	1	

- Combien de valeurs différentes de Us obtient-on?
- Quelle est la valeur maximale U<sub>max</sub> atteinte par Us?
- Quel est le pas p de ce convertisseur?
- Montrer que ces résultats sont en accord avec les résultats généraux et théoriques suivants:

Si U<sub>ref</sub> désigne la tension de référence d'un convertisseur analogique-numérique à n bits, alors:

- le convertisseur peut coder 2<sup>n</sup> valeurs de tension

- la valeur maximale de la tension de sortie Us est:  $U_{ref} \left(1 - \frac{1}{2^n}\right)$

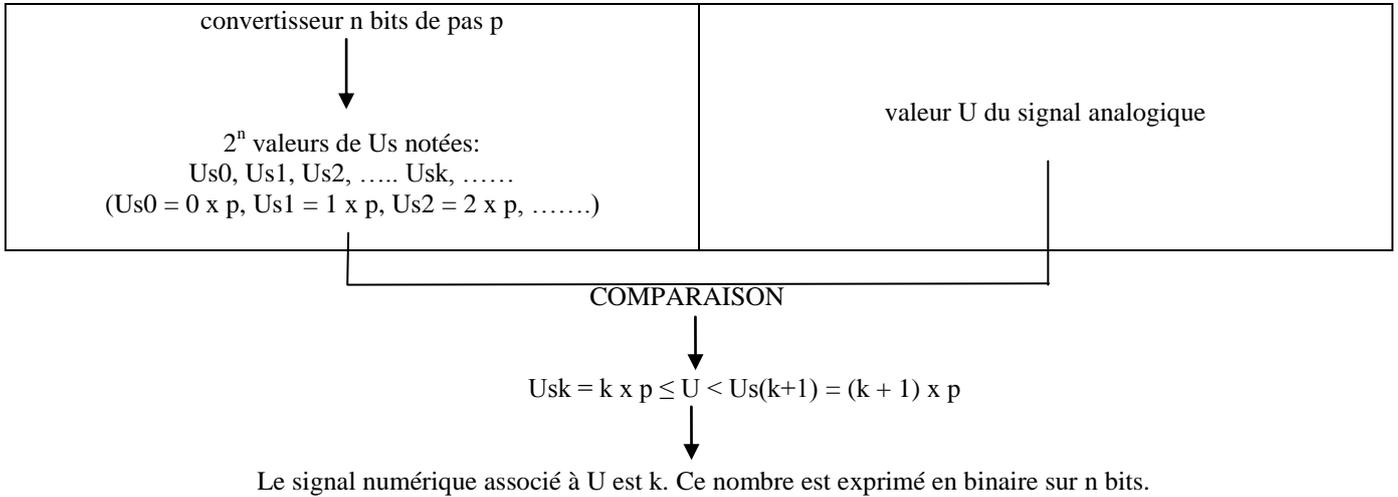
- le pas p du convertisseur vaut  $\frac{U_{ref}}{2^n}$ .

- Retrouver la valeur du pas du convertisseur Jeulin à 2 bits et à 4 bits déterminée au 2.1. en sachant que pour cette maquette la tension de référence U<sub>ref</sub> vaut 10 V.

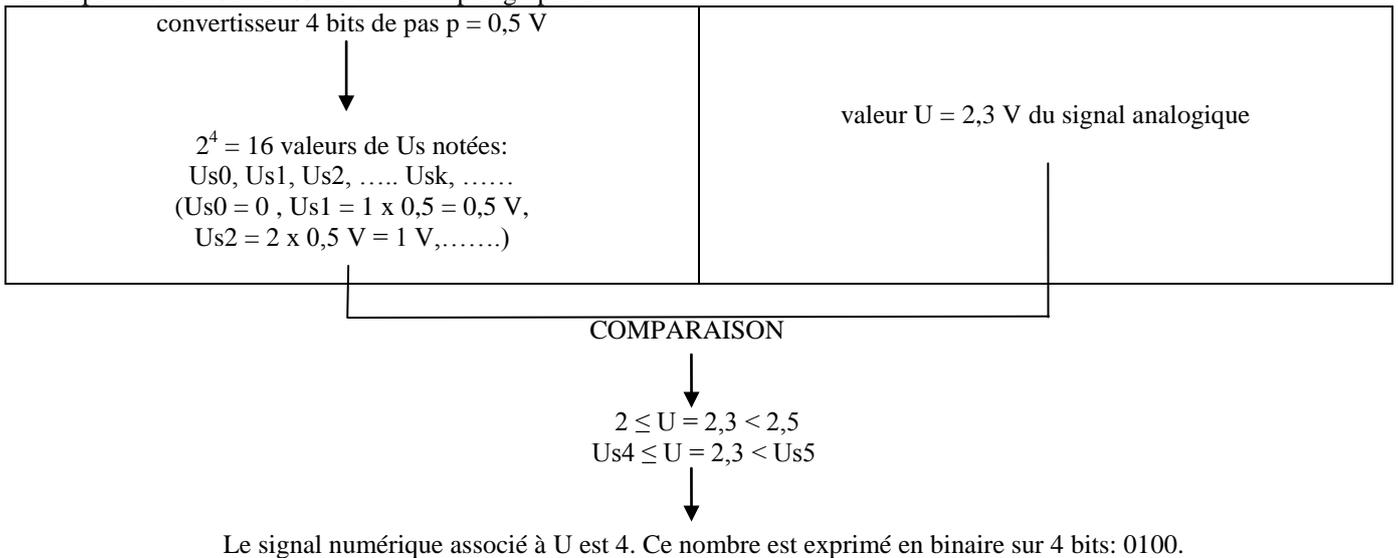
**2.3. Codage: principe d'un comparateur de tension**

Pour numériser une tension U, un convertisseur la compare à sa propre tension de sortie Us obtenue par un montage similaire au montage précédent. Les plus curieux peuvent venir manipuler un montage comparateur de tension à la paillasse du professeur.

Les étapes de la quantification et du codage peuvent se résumer ainsi:



Exemple avec le convertisseur étudié au paragraphe 1:



**2.4. Codage sur la maquette Jeulin**

La barre-graphe en haut de la maquette Jeulin indique le codage du signal numérique. Une diode éteinte correspond au chiffre 0. Une diode allumée correspond au chiffre 1.

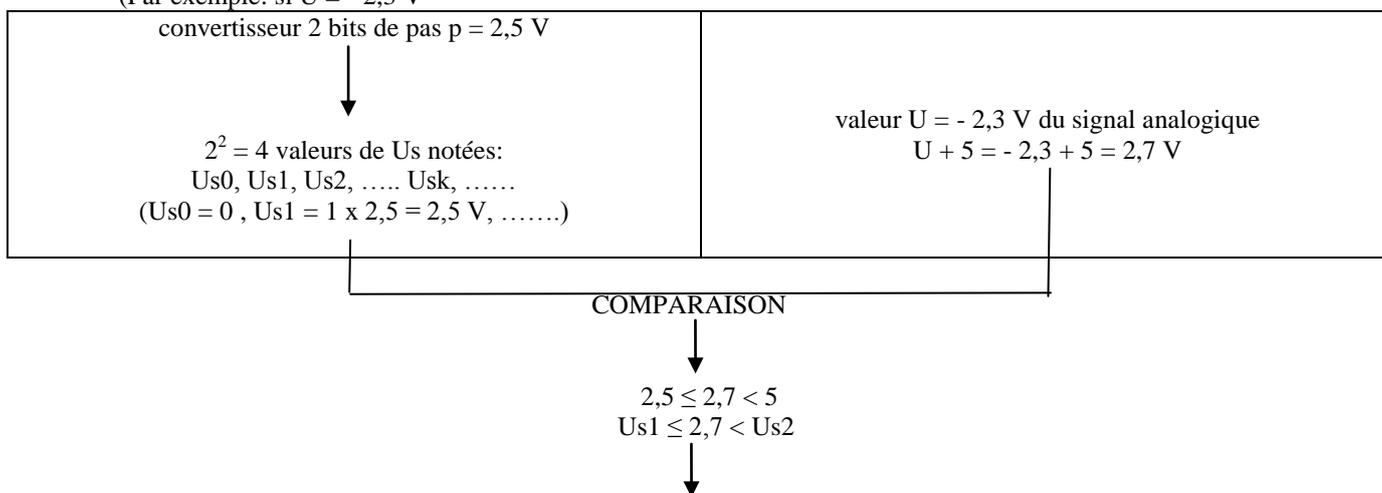
- Alimenter la maquette de conversion avec la sortie variable de l'alimentation stabilisée continue.
- Brancher un voltmètre aux bornes de l'alimentation afin de mesurer la tension d'entrée de la maquette.
- Ne rien brancher aux bornes de sortie de la maquette.
- Sélectionner 2 bits Direct sur la maquette
- Faire varier lentement la tension de sortie de l'alimentation et observer l'état des diodes de la barre-graphe. Compléter le tableau ci-dessous: ■

Remarque : les bits sur la maquette correspondent aux n diodes « les plus à gauche » de l'affichage de la maquette  
 Ex : pour n = 4 bits et 1110 l'affichage correspond à ■■■■

Intervalle de variations du signal analogique	Etat des diodes de la barre-graphe (hachurer les diodes allumées)	Nombre binaire correspondant à l'état des diodes de la barre-graphe
$[- 5 \text{ V} ; - 2,5 \text{ V} [$	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	
	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	
	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	
	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	

- Le raisonnement pour retrouver les conclusions du tableau ci-dessus est le même que celui expliqué au 2.3. au détail suivant près: afin de pouvoir coder les valeurs numériques négatives du signal analogique, le comparateur utilise la valeur  $(U + \frac{U_{ref}}{2})$  soit ici la valeur  $(U + 5)$  et non simplement la valeur de  $U$ .

(Par exemple: si  $U = - 2,3 \text{ V}$



Le signal numérique associé à  $U$  est 1. Ce nombre est exprimé en binaire sur 2 bits: 01.

- Sélectionner 4 bits, Direct sur la maquette. Choisir successivement deux valeurs quelconques (une positive et une négative) de tension d'entrée de la maquette avec l'alimentation stabilisée et le voltmètre. Observer l'état des diodes de la barre-graphe et expliquer. Compléter le tableau ci-dessous.

Convertisseur 4 bits, calibre - 5 V / + 5 V (i.e. tension de référence: 10 V):

Calcul du pas du convertisseur	
Nombre de valeurs de tension disponibles:	
Valeurs des tensions $U_s$ disponibles	
Codage associé à la valeur $U = \dots\dots\dots \text{ V}$ (choisir ici une valeur de $U$ positive inférieure à 5 V <i>par ex : <math>U = 3,6 \text{ V}</math></i> )	Nombre binaire déduit de l'état des diodes: <hr/> Calculs justifiant ce codage:

Codage associé à la valeur $U = \dots\dots\dots V$ (choisir ici une valeur de $U$ négative supérieure à $-5 V$ <i>par ex : <math>U = -3,6 V</math>)</i>	Nombre binaire déduit de l'état des diodes:
	Calculs justifiant ce codage:

### 3. ECHANTILLONNAGE TEMPOREL

(Arrêter le logiciel Synchronie et le redémarrer pour s'affranchir des réglages du début du TP)

La maquette Jeulin permet aussi de faire varier la fréquence d'échantillonnage. Si  $F_e$  est la fréquence d'échantillonnage, la durée de chaque échantillon découpé sur le signal analogique est  $T_e = 1/F_e$ .

- Alimenter la maquette avec le générateur GBF Jeulin: signal sinusoïdal, fréquence 600 Hz, amplitude 5 V (Utiliser au besoin l'oscilloscope pour faire les réglages ou un fréquencemètre pour régler la fréquence)
- Relier les bornes EA0 et masse du boîtier d'acquisition aux bornes de sortie du GBF.
- Paramétrer l'acquisition dans le logiciel Synchronie:
  - Entrées: EA0 automatique, calibre  $-5 / +5$ , cocher fenêtre 1
  - Acquisition 10 000 points, Durée échantillon 600 ns, Durée totale 6 ms,
  - Déclenchement EA0, niveau 0, sens croissant.
- Réaliser une acquisition en appuyant sur F10.  
Ceci est le signal analogique que l'on va numériser de différentes manières en faisant varier la fréquence d'échantillonnage. Le but ici est d'afficher dans une même fenêtre le signal analogique de départ et les différentes numérisations.
- Pour chaque fréquence d'échantillonnage faire l'acquisition comme suit:
  - a) Relier les bornes de sortie de la maquette aux bornes EA1 et masse du boîtier d'acquisition
  - b) Paramètres de Synchronie: EA0 inactif, EA1 automatique  
10 000 points d'acquisition, durée échantillon 600 ns, durée totale 6 ms.  
Cocher: ajouter les courbes  
Déclenchement: EA1, niveau 0, sens croissant.
  - c) Sur la maquette Jeulin, sélectionner *10 bits, 1 kHz*  
(cette valeur de 1 kHz est la valeur de la fréquence d'échantillonnage)
  - d) Numériser le signal avec la maquette en appuyant sur le bouton poussoir *Acquisition*  
(Attendre assez longtemps que la seule diode la plus à gauche soit allumée => fin de l'Acquisition)
  - e) Ensuite, déclencher une acquisition de Synchronie en appuyant sur F10 puis sur le bouton poussoir *Restitution* de la maquette. (Si un message de Synchronie s'affiche demandant si on désire conserver les données précédentes, répondre OUI)

Recommencer avec deux autres valeurs de fréquence d'échantillonnage (5 et 10 kHz) (reprendre le protocole de c) à e)). Choisir des couleurs différentes pour chaque fréquence d'échantillonnage afin de conserver la lisibilité de l'enregistrement.

- Pour chaque valeur de fréquence d'échantillonnage, calculer la durée de chaque échantillon et indiquer comment on retrouve cette durée sur le signal numérique enregistré.

### 4. CONCLUSION DU TP

Si l'on a le choix du nombre de bits et de la fréquence d'échantillonnage pour numériser un signal analogique, comment les choisir afin d'obtenir un signal numérique très proche du signal analogique? Quels problèmes ces choix vont-ils générer?  
(On attend une réponse clairement rédigée et justifiée).

DESCRIPTION DE LA MAQUETTE JEULIN

