

## TP 14 : Conversion analogique-numérique

### Capacités exigibles :

- Définir la fonction d'un convertisseur analogique-numérique (C.A.N).
- Définir un signal quantifié, l'erreur de quantification et le rapport signal sur bruit de quantification.
- Déterminer le nombre en sortie d'un C.A.N pour une tension donnée.
- Utiliser une documentation technique pour déterminer les caractéristiques d'un C.A.N : résolution, quantum, non-linéarité, temps de conversion.
- Définir la fonction d'un convertisseur numérique-analogique (C.N.A).
- Déterminer la tension de sortie d'un C.N.A pour un nombre donné.
- Justifier le rôle du filtre de lissage et déterminer sa fréquence de coupure.
- Utiliser une documentation technique pour déterminer les caractéristiques d'un C.N.A. : quantum, non-linéarité, temps de conversion.

### Capacités expérimentales :

- Réaliser une acquisition d'un signal grâce à LATISPRO
- Utilisation de Python pour valider divers tracés

Dans le TP 13, nous avons étudié l'échantillonnage d'un signal analogique  $s(t)$ . En sortie de l'échantillonneur bloqueur, le signal est alors nommé  $s_{e+b}(t)$ . Dans ce TP, on s'intéresse à la suite du processus permettant de numériser un signal analogique : la quantification et le codage.

### A faire à la maison sur copie double : préparer l'ensemble de l'appel 1

#### I. Quelques convertisseur analogique-numérique (CAN) :

##### A. Dans la vie quotidienne :



**Visualiser la vidéo suivante :**  
**« Chapitre 07 – Quantification et codage d'un signal »**

1. Citer le nom d'un support, stockant un signal sonore analogique.

Vous trouverez ci-dessous les caractéristiques des convertisseurs analogique-numérique (CAN) utilisés pour coder différents signaux de la « vie quotidienne » :

	Son via un téléphone	Fichier sonore « .flac »	Son stocké sur un CD	Son stocké sur un blu-ray	Son diffusé en HDTV
Fréquence d'échantillonnage	$f_e = 8 \text{ kHz}$	$f_e = 192 \text{ kHz}$	$f_e = 44,1 \text{ kHz}$	$f_e = 96 \text{ kHz}$	$f_e = 32 \text{ kHz}$
Résolution $n$ du CAN	12 bits	24 bits	12 bits	24 bits	16 bits

2. Parmi les exemples proposés dans le tableau, quel signal numérique est le plus proche du signal analogique d'origine ?
3. Un signal codé avec un CAN ayant la plus grande fréquence d'échantillonnage et la plus grande résolution  $n$  est-il de « meilleure qualité » que ce même signal mais analogique ?
4. Citer deux avantages de la numérisation d'un signal.

## B. Pour un signal sonore :

Télécharger les deux fichiers sonores nommés « TP14\_piano\_44kHz\_16bits.wav » et « TP14\_piano\_44kHz\_8bits.wav ». Écouter tout d'abord le fichier sonore codé sur  $n = 16 \text{ bits}$  puis sur  $n = 8 \text{ bits}$ .

5. Quel phénomène se superpose au signal sonore (les notes de piano) lorsque la résolution est faible ?

## C. La carte SYSAM-SP5 :

Lire les paragraphes V.B et IV.A du chapitre 07.

6. Dans la fiche technique de la carte d'acquisition SYSAM-SP5 (disponible sur le site), rechercher la valeur de la tension pleine échelle (notée  $\Delta U$  dans le chapitre 07) et la résolution (notée  $n$  dans le chapitre 07) du CAN présent dans cette carte d'acquisition.

7. Calculer la valeur théorique du pas de quantification en  $mV$ , noté  $q_{th}$ .

### **APPEL 1 : Appeler le professeur afin qu'il valide et note votre travail.**

Régler le GBF HAMEG afin de créer un signal analogique triangulaire alternatif  $s(t)$ , de fréquence  $f = 100 \text{ Hz}$ , d'amplitude  $1,5 \text{ V}$ . **La sortie OUTPUT du GBF doit être sur OFF.**

A l'aide de la fiche méthode expérimentale 06, connecter la carte d'acquisition SYSAM-SP5 afin de réaliser l'acquisition du signal  $s(t)$  sur la voie EA0.

Ouvrir le logiciel nommé LATISPRO puis cliquer sur l'image LATISPRO pour entrer dans le logiciel (la fiche méthode expérimentale 07 concerne le logiciel LATISPRO).

Sélectionner la voie EA0, en mode acquisition temporelle, mettre  $N = 256\,000 \text{ points}$  et la période d'échantillonnage sur  $T_e = 100 \text{ ns}$ .

### **APPEL 2 : Appeler le professeur afin qu'il valide et note votre travail.**

Lancer l'acquisition du signal : une fois acquis/échantillonné et quantifié, le signal analogique  $s(t)$  devient le signal numérique  $s_{num}(t)$ .

A l'aide de l'outil LOUPE, zoomer plusieurs fois sur une zone de la courbe obtenu afin de visualiser « deux paliers ».

8. A l'aide de l'outil Réticule (et de la fonction Nouvelle Origine), déterminer la valeur expérimentale du pas de quantification en  $mV$ , noté  $q_{exp}$ .

9. A l'aide d'un écart-relatif, conclure.

### **APPEL 3 : Appeler le professeur afin qu'il valide et note votre travail.**

## II. Quantification du signal échantillonné et bloqué :

### A. Première étape : l'échantillonnage

#### Rappel : critère de Nyquist-Shannon

Ce critère énonce une propriété que doit respecter la fréquence d'échantillonnage  $f_e$ , afin d'obtenir un échantillonnage correct du signal analogique.

On souhaite échantillonner un signal périodique analogique dont la représentation fréquentielle possède des harmoniques compris entre  $0 \text{ Hz}$  et une fréquence maximale, notée  $f_{max}$ .

L'échantillonnage de ce signal est réalisé correctement si la fréquence d'échantillonnage  $f_e$  est supérieure (ou égale) au double de la fréquence maximale  $f_{max}$  :

$$\text{échantillonnage correct} \Leftrightarrow f_e \geq 2 \times f_{max}$$

$f_e$  : fréquence d'échantillonnage, en hertz

$f_{max}$  : fréquence de l'harmonique de plus haut rang du signal, ayant une amplitude non nulle, en hertz

On souhaite échantillonner un signal triangulaire analogique  $s(t)$  de fréquence  $f$ , dont la représentation temporelle est tracée sur l'annexe 0. La période d'échantillonnage est  $T_e = 1,000 \text{ ms}$ .

10. Le critère de Nyquist-Shannon est-il respecté dans notre cas ? Justifier votre réponse.

11. Déterminer le nombre  $N$  d'échantillons par motif sachant que  $N = \frac{f_e}{f}$ .

A l'aide de l'exemple présent dans le *chapitre 07, paragraphe IV.C*, répondre à la question suivante :

12. Tracer en vert, sur l'annexe 0, le signal échantillonné et bloqué, noté  $s_{e+b}(t)$ . Le premier échantillon est réalisé à  $t = 0 \text{ s}$ .

Ouvrir le script nommé « TP14\_signal\_ech\_bloque.py » puis compléter les lignes vides. Lancer l'exécution du script et vérifier que le résultat obtenu correspond à votre tracé sur l'annexe 0.

#### **APPEL 4 : Appeler le professeur afin qu'il valide et note votre travail.**

##### **B. Deuxième étape : la quantification**

Lire le paragraphe VI.A du chapitre 07.

Le signal échantillonné et bloqué de l'annexe 0 est traité par un convertisseur analogique-numérique possédant une résolution de  $n = 3 \text{ bits}$  et une tension pleine échelle  $\Delta U$  allant de  $-5,00 \text{ V}$  à  $5,00 \text{ V}$ .

13. Déterminer la valeur du pas de quantification en  $V$ , noté  $q$ . On veillera au respect des chiffres significatifs.

14. Tracer en pointillé et au crayon papier, les niveaux de tension quantifiés sur l'annexe 0.

15. Sur l'annexe 0, indiquer pour chaque trait en pointillé, la valeur de la tension correspondante.

16. Les valeurs du signal échantillonné et bloqué correspondent-elles toutes aux valeurs des niveaux de tensions quantifiés ?

Ouvrir le script nommé « TP14\_signal\_ech\_bloque\_niveaux.py » puis compléter les lignes vides. Lancer l'exécution du script et vérifier que le résultat obtenu correspond à votre tracé sur l'annexe 0.

#### **APPEL 5 : Appeler le professeur afin qu'il valide et note votre travail.**

Le convertisseur étudié ici, procède par valeur inférieure : chaque valeur échantillonnée du signal se voit attribuer la valeur du niveau quantifié juste inférieure.

A l'aide de l'exemple présent dans le *chapitre 07, paragraphe VI.B*, répondre à la question suivante :

17. Sur l'annexe 0, tracer en rouge, le signal quantifié  $s_q(t)$ .

Ouvrir le script nommé « TP14\_signal\_quantifie.py » puis compléter les lignes vides.

La ligne 37 se complète à l'aide du *paragraphe VII.B du chapitre 07 (deuxième méthode)* et de la fonction `np.floor()` permettant d'obtenir l'entier inférieur d'un nombre (compris entre les parenthèses). Le signal  $s_e$  est noté  $x$  dans cette partie du code.

Lancer l'exécution du script et vérifier que le résultat obtenu correspond à votre tracé sur l'annexe 0.

**APPEL 6 : Appeler le professeur afin qu'il valide et note votre travail.**

Mettre l'amplitude du signal sur 50V et lancer l'exécution du script.

18. Quelle est la valeur de la tension crête à crête  $U_{cc}$  du signal ? Quelle est la valeur de la tension pleine échelle  $\Delta U$  du CAN ?
19. A l'aide de votre simulation, répondre à la question suivante : quel phénomène apparaît sur le signal quantifié si  $U_{cc} > \Delta U$  ?

**APPEL 7 : Appeler le professeur afin qu'il valide et note votre travail.**

Mettre l'amplitude du signal sur 4,0 V pour la suite du TP.

C. Dernière étape : le codage

*Lire le paragraphe VII.A du chapitre 07*

20. Sur l'annexe 0, faire correspondre à chaque intervalle (entre deux niveaux quantifiés de tension), le nombre binaire qui lui est associé.
21. Pour une valeur du signal analogique comprise entre  $-5,00 V$  et  $-3,76V$ , quel est le code binaire sortant du CAN ?
22. Déterminer le nombre décimal  $M$  correspondant au nombre binaire  $101_{(2)}$ . Retrouve-t-on une valeur du signal contenue dans l'intervalle qui est associé à  $101_{(2)}$ ? Justifier le nom de cette étape : le codage.
23. Écrire le code binaire sortant du CAN représentant un motif du signal analogique entrant dans ce CAN.

**APPEL 8 : Appeler le professeur afin qu'il valide et note votre travail.**

III. Qu'est-ce que l'erreur de quantification ?

A. Signal « erreur de quantification » :

Lors de la quantification d'un signal, par niveaux sur  $n$  bits, on observe que les valeurs échantillonnées et bloquées du signal ne correspondent pas, en général, aux valeurs des niveaux de tensions quantifiés. Il y a donc une erreur issue de la quantification du signal.

Exemple :

On note la valeur échantillonnée du signal (en noir) notée  $s_e$  et la valeur numérique qui lui est associée,  $s_{quantifiée}$ . On observe que :

- $s_e(t = 0) = -4,0 V$
- $s_{quantifiée}(t = 0) = -5,00 V$

A l'instant  $t = 0s$ , l'erreur de quantification, noté  $b(t)$ , est donc de :

$$\begin{aligned} b(t = 0) &= s_e(t = 0) - s_{quantifiée}(t = 0) \\ b(t = 0) &= -4,0 - (-5,00) \\ b(t = 0) &= 1,00V \end{aligned}$$

24. Pour ce type de CAN (procédant par valeur inférieure), l'erreur de quantification  $b(t)$  peut-elle être négative ? Justifier.
25. Choisir puis rédiger la proposition correcte pour ce type de CAN (procédant par valeur inférieure) :

$$b(t) > q \quad \text{ou} \quad b(t) \geq q \quad \text{ou} \quad b(t) < q \quad \text{ou} \quad b(t) \leq q$$

## B. Erreur de quantification et résolution du CAN :

L'erreur (issue de la quantification du signal) est la source d'un bruit de quantification qui vient se superposer au signal (voir question 5 de votre préparation).

26. Mettre la résolution sur  $n = 4 \text{ bits}$  et lancer l'exécution du script : à l'aide des curseurs, mesurer l'erreur  $b(t = 0)$ .
27. Mettre la résolution sur  $n = 5 \text{ bits}$  et lancer l'exécution du script : à l'aide des curseurs, mesurer l'erreur  $b(t = 0)$ .
28. Recopier et compléter la phrase suivante : « Plus la résolution d'un CAN est importante, plus l'erreur de quantification est..... donc le bruit de quantification est ..... ».

### **APPEL 9 : Appeler le professeur afin qu'il valide et note votre travail.**

## C. Rapport signal sur bruit :

Pour déterminer le rapport signal sur bruit en décibel (dû à la quantification), on travaille sur la première demi-période du signal analogique précédent dont l'amplitude est maintenant de  $5,0 \text{ V}$  (afin de « remplir » la pleine échelle du CAN).

Le convertisseur analogique-numérique possède une résolution de  $3 \text{ bits}$  et une tension pleine échelle  $\Delta U$  allant de  $-5,00 \text{ V}$  à  $5,00 \text{ V}$ .

Le convertisseur étudié ici, procède maintenant par **valeur centrale** : chaque valeur échantillonnée du signal analogique se voit attribuer la valeur centrale (moyenne) des deux niveaux quantifiés l'encadrant.

Ouvrir le script nommé « TP14\_SNR.py » puis compléter les lignes vides.

Pour la ligne 33, rédiger la formule littérale du signal d'erreur sachant que le signal échantillonné se nomme  $s$  et le signal quantifié  $sq$ .

Pour la ligne 42, rédiger la formule littérale du rapport signal sur bruit en décibel (voir *chapitre 05 – paragraphe V.B*), à l'aide de la fonction  $np.\log_{10}()$  et de la fonction « valeur efficace », notée  $rms()$ .

Lancer l'exécution du script.

29. Relever la valeur de  $SNR_{dB}$  pour  $n = 3 \text{ bits}$  (en arrondissant au  $dB$  près).
30. Qualifier à l'aide des adjectifs usuels, le signal « erreur de quantification ».
31. Expliquer, à l'aide d'un calcul, que la valeur de  $b(t = 0)$  soit égale ici à  $-0,625V$ .
32. Quel encadrement de l'erreur, parmi ceux proposés, est correct ?

$$0 < b(t) < q ; 0 \leq b(t) < q ; -\frac{q}{2} \leq b(t) < \frac{q}{2}$$

33. Relever la valeur expérimentale de  $SNR_{dB}$  pour  $n = 4$  puis  $5$  et  $6 \text{ bits}$  (en arrondissant au  $dB$  près).
34. Comment évolue l'amplitude du signal d'erreur quand la résolution  $n$  augmente ?
35. Compléter la phrase suivante : « Lorsque la résolution du CAN augmente d'une unité, le rapport signal sur bruit augmente de ..... ».

### **APPEL 10 : Appeler le professeur afin qu'il valide et note votre travail.**

## D. Expression théorique de $SNR_{dB}$ :

Le **rapport signal sur bruit** d'un CAN idéal est défini pour un signal d'entrée alternatif triangulaire (signal analogique) dont la valeur crête à crête correspond à la tension pleine échelle du CAN. Le CAN procède par valeur centrale.

L'amplitude du signal d'entrée, notée  $U_m$ , est liée à la tension pleine échelle  $\Delta U$  par la formule suivante :

$$2U_m = \Delta U$$

36. Démontrer que la puissance moyenne normalisée du signal d'entrée peut s'exprimer ainsi :

$$P_{signal} = \frac{U_m^2}{3}$$

37. Démontrer que la puissance moyenne normalisée du bruit (issu de l'erreur de quantification) peut s'exprimer ainsi :

$$P_{bruit} = \frac{q^2}{12}$$

38. Démontrer enfin que le rapport signal sur bruit en décibel peut s'exprimer ainsi :

$$SNR_{dB} \approx 6n$$

39. Déterminer la valeur théorique du rapport signal sur bruit, noté  $SNR_{dB}$  pour le CAN étudié ici, dont la résolution est de  $n = 3 \text{ bits}$ .

40. Comparer les valeurs de référence et obtenue par simulation (question 29) de  $SNR_{dB}$  et conclure.

**APPEL 11 : Appeler le professeur afin qu'il valide et note votre travail.**

E. Validation pour plusieurs  $n$  :

Ouvrir le script nommé « TP14\_SNR\_fonction\_n.py » puis compléter la ligne 41 sachant que  $y$  correspond à l'expression littérale de  $SNR_{dB}$  « théorique » de la question 38.

Lancer l'exécution du script : il permet d'obtenir le tracé de  $SNR_{dB}$  en fonction de  $n$  grâce à une simulation (équivalente à celle faite précédemment), et le tracé de  $SNR_{dB}$  en fonction de  $n$  grâce à la formule théorique de la ligne 41.

41. Conclure.

**APPEL 12 : Appeler le professeur afin qu'il valide votre travail.**

F. Validité de la formule  $SNR_{dB} \approx 6n$  pour un signal sinusoïdal alternatif :

Dans ce paragraphe, on cherche à savoir si la formule démontrée précédemment  $SNR_{dB} \approx 6n$  pour un signal alternatif triangulaire (dont la valeur crête à crête correspond à la tension pleine échelle du CAN) reste valable pour un signal possédant un autre motif : un signal sinusoïdal alternatif.

Ouvrir le script nommé « TP14\_signal\_sin\_SNR.py » puis lancer l'exécution du script.

42. A l'aide des valeurs efficaces des signaux déterminées par le script (avec 4 CS), calculer la valeur du rapport signal sur bruit, noté  $SNR_{dB}$  pour le CAN étudié ici, dont la résolution est de  $n = 3 \text{ bits}$ .

Dans le script, modifier la résolution est de  $n = 4 \text{ bits}$ .

43. A l'aide des valeurs efficaces des signaux déterminées par le script (avec 4 CS), calculer la valeur du rapport signal sur bruit, noté  $SNR_{dB}$  pour le CAN étudié ici, dont la résolution est de  $n = 4 \text{ bits}$ .
44. Lorsque la résolution du CAN augmente d'une unité, de combien de décibel augmente le rapport signal sur bruit ? Conclure.
45. Pour la résolution est de  $n = 3 \text{ bits}$ ,  $SNR_{dB}$  calculé à la question 42 correspond-il à la valeur  $6n$  ? Conclure.

Pour aller plus loin :

Le script permet de d'ajouter un bruit « blanc » au signal analogique en éliminant le # de la ligne 33. Lancer l'exécution du script, une fois ce # éliminé.

46. Décrire l'effet du bruit blanc (présent sur le signal analogique) sur l'allure du signal numérique.

IV. Caractéristique de transfert idéale d'un CAN :

On étudie le système « convertisseur analogique-numérique » possédant une résolution de  $n = 3 \text{ bits}$  et une tension pleine échelle  $\Delta U$  allant de  $-5,00 \text{ V}$  à  $5,00 \text{ V}$ . Le convertisseur étudié ici, procède par valeur inférieure.

47. Tracer la caractéristique de transfert idéale de ce CAN sur l'annexe 01.

Ouvrir le script nommé « TP14\_caracteristique\_inferieure.py » puis lancer l'exécution de ce script. Vérifier que le résultat obtenu est proche de votre tracé sur l'annexe 01.

On étudie maintenant le système « convertisseur analogique-numérique » possédant une résolution de  $n = 3 \text{ bits}$  et une tension pleine échelle  $\Delta U$  allant de  $-5,00 \text{ V}$  à  $5,00 \text{ V}$ . Le convertisseur étudié ici, procède par valeur centrale.

48. Tracer la caractéristique de transfert idéale de ce CAN sur l'annexe 02.

Ouvrir le script nommé « TP14\_caracteristique\_centrale.py » puis lancer l'exécution de ce script. Vérifier que le résultat obtenu est proche de votre tracé sur l'annexe 02.

**APPEL 13 : Appeler le professeur afin qu'il valide votre travail.**