



Lycée Charles Coëffin — Sciences physique

Fiche de travaux pratiques — CPGE TSI2

TP 4 : Électronique numérique

Durée : 2 h

Objectifs

- Mettre en évidence l'influence de la fréquence d'échantillonnage.
- Mettre en évidence le phénomène de repliement de spectre dû à l'échantillonnage lors de l'utilisation d'une carte d'acquisition.
- Réaliser, à l'aide d'un langage de programmation, un filtrage numérique passe-bas d'un signal issu d'une acquisition et mettre en évidence la limitation introduite par l'échantillonnage.

Pré-requis : régime sinusoïdal forcé, méthode complexe, associations d'impédances complexes ; signal périodique, décomposition d'un signal ; systèmes linéaires, continus et invariants (LCI) ; propriétés des ALI.

Matériel

Équipement	Spécifications / Remarques	Quantité
GBF	Attention au type d'amplitude sélectionné : <i>root mean square</i> ou <i>peak to peak</i> .	1
Microcontrôleur ESP32		1
Plaquette d'essai microélectronique	Ne pas toucher le montage.	1

Sécurité

- Couper l'alimentation avant tout câblage.
- Éviter les courts-circuits prolongés.

Introduction

On souhaite convertir un signal électrique analogique en signal numérique à l'aide d'un microcontrôleur. Pour ce faire le microcontrôleur dispose d'un CAN (Convertisseur Analogique Numérique ou *ADG* pour *Analog to Digital Converter*).

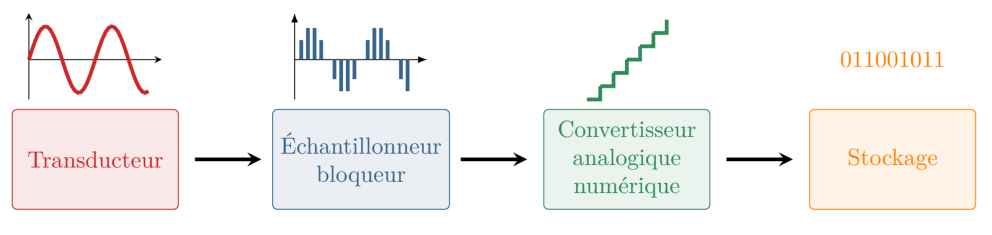
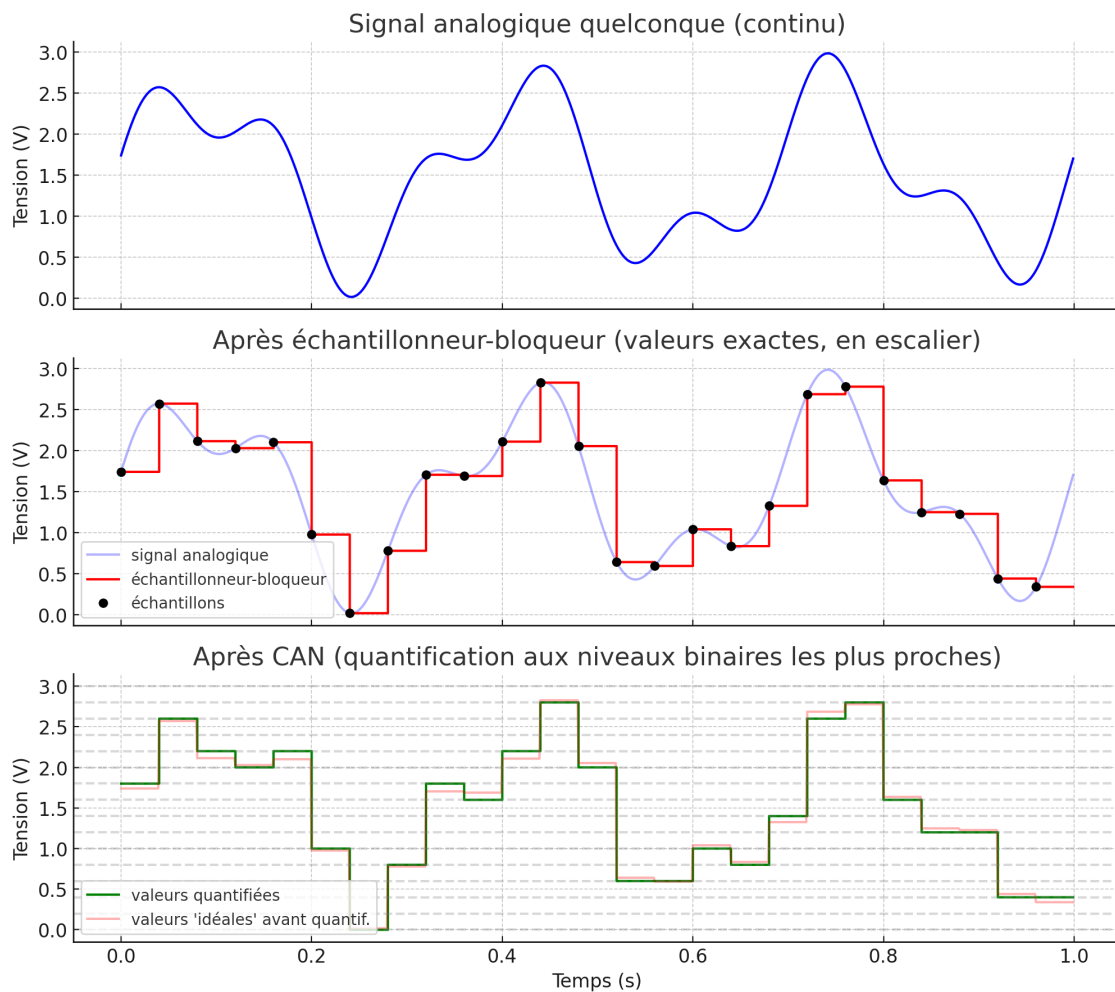


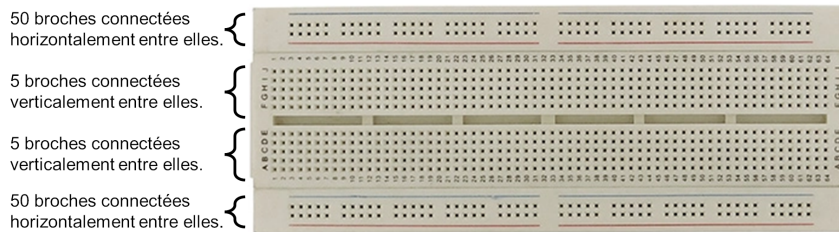
FIGURE 1 – Structure d'une chaîne d'acquisition et de numérisation.

- Un signal analogique d'intérêt est d'abord converti en tension analogique par un **transducteur**. Exemple : un microphone converti un signal acoustique en tension, une sonde de température converti une température en tension.
- La tension analogique est ensuite envoyée vers un **échantillonneur bloqueur**. À l'instant initial t_0 ce dernier lit la valeur du signal de tension reçu et la bloque jusqu'à l'instant $t_0 + T_e$, avec T_e la période d'échantillonnage ; puis il lit la nouvelle valeur de tension à l'instant $t_0 + T_e$ et la bloque jusqu'à l'instant $t_0 + 2T_e$. L'opération recommence jusqu'à la fin du signal. T_e est appelé **période d'échantillonnage**.
- En sortie de l'échantillonneur bloqueur la tension est encore analogique : on connaît sa valeur à toute instant t et toutes les valeurs sont permises. Un signal numérique ne peut, lui, contenir qu'un nombre de valeurs fini, il faut donc discrétiser le signal à l'aide d'un **convertisseur analogique numérique** (CAN) qui attribue à la valeur de tension lue une valeur binaire, souvent la plus proche de la valeur réelle.
- Les valeurs issues du CAN sont finalement **stockées en mémoire** pour être affichées ou manipulées.



1 Acquisition d'un signal

On utilise un microcontrôleur ESP32 montée sur une plaque de connexion représentée ci-dessous.



Le montage utilisé est donné ci-contre. La broche 34 du microcontrôleur est une de ses broches qui est associée à un CAN pouvant convertir des signaux de tensions analogiques de 0 V à 3,6 V.

Ce CAN possède une **résolution** de $N = 12$ bits : on peut donc encoder le signal entrant sur $2^{12} = 4096$ valeurs possible. Si on attribue une valeur à une tension de 0 V, il reste 4095 valeurs non nulles. Ainsi le **pas de quantification** q du CAN est

$$q = \frac{\text{tension max}}{2^N - 1} = \frac{3,6 \text{ V}}{4095} = 0,88 \text{ mV/unité numérique.}$$

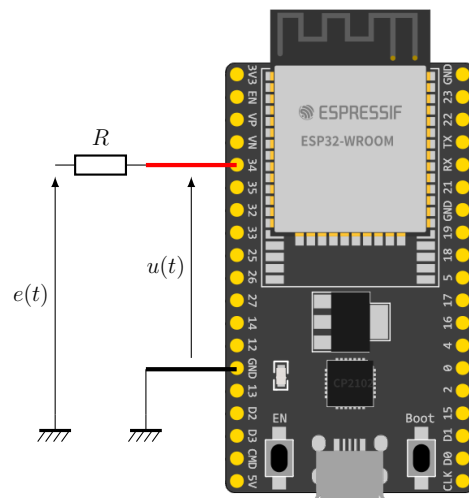
Le convertisseur approximerait donc une valeur de tension réelle à 0,88 mV près.

Le débit d'échantillonnage D du CAN du microcontrôleur correspond au volume d'informations par seconde qu'il peut produire. Il est défini tel que

$$D = f_e \times \text{nombre de bits} \times \text{nombre d'entrées mesurées}$$

avec f_e la **fréquence d'échantillonnage** du signal choisie ($f_e = 1/T_e$). Le débit maximal du CAN ici est de 12 kbit/s pour une seule entrée.

La valeur du courant entrant dans le microcontrôleur est de quelques μA .



Procédure

1. **Déterminer** la valeur de la tension d'entrée dans le microcontrôleur $u(t)$ en fonction de $e(t)$.
2. **Déterminer** la valeur de la fréquence d'échantillonnage maximale $f_{e, \max}$ que l'on peut imposer au microcontrôleur.
3. **Déterminer** les valeurs d'amplitude pic-à-pic et d'*offset* à imposer au GBF afin de ne pas détériorer le microcontrôleur. **Appeler** le professeur avant d'enclencher le GBF pour qu'il produise un signal sinusoïdal de fréquence $f = 40 \text{ Hz}$.
4. **Ouvrir** le fichier notebook fourni et **exécuter** les quatre premiers blocs de code. **Décrire** les figures obtenues.

2 Influence de la fréquence d'échantillonnage

Afin de convertir des signaux analogiques en signaux numériques il faut respecter **le critère de** : la fréquence la plus importante que contient un signal doit être inférieure à la moitié de la fréquence d'échantillonnage : $f < \frac{f_e}{2}$.

Procédure

5. À partir des figures obtenues précédemment **déterminer** les valeurs de la durée de l'acquisition T , la période d'échantillonnage T_e , la résolution en fréquence du spectre Δf et la fréquence maximale affichée par le spectre $f_{\max}$.
6. **Calculer** $\frac{1}{T}$ et $\frac{1}{2T_e}$. **Conclure**.
7. **Déterminer** si le critère de Nyquist-Shannon est respecté.
8. **Changer** la fréquence d'échantillonnage f_e dans le deuxième bloc afin de ne pas respecter la condition de Nyquist-Shannon tout en respectant l'inégalité $f < f_e$ avec f la fréquence du signal.
9. **Exécuter** le deuxième, troisième et quatrième blocs de code. **Comparer** le spectre obtenu avec le spectre précédent.
10. **Décrire** en quoi le non respect de la condition de Nyquist-Shannon perturbe la conversion du signal.

3 Filtrage passe-bas

Afin de garder uniquement la composante continue du signal, nous allons utiliser un **filtre numérique** passe-bas du premier ordre. On rappelle que la fonction de transfert et l'équation différentielle que respecte un filtre passe-bas du premier ordre est

$$\underline{H} = \frac{\underline{s}}{\underline{e}} = \frac{H_0}{1 + j\frac{\omega}{\omega_0}} \quad ; \quad \underline{s} + \frac{1}{\omega_0} j\omega \underline{s} = H_0 \underline{e} \quad ; \quad s(t) + \frac{1}{\omega_0} \frac{ds}{dt} = H_0 e(t)$$

$$\frac{ds}{dt} = \omega_0 H_0 e(t) - \omega_0 s(t).$$

Pour transformer cette relation différentielle en une équation sur les échantillons, il faut approximer la dérivée. Le plus simple est d'utiliser **le schéma d'Euler**, en prenant la période d'échantillonnage T_e comme pas de temps. Toutefois, pour des questions de précision des calculs, il est nécessaire d'utiliser le schéma d'Euler implicite au lieu du schéma explicite : la dérivée est toujours approximée par un taux de variation entre les instants t_k et t_{k+1} , mais toutes les autres grandeurs sont à considérer au pas de temps $k+1$, au lieu du pas de temps k dans le schéma explicite. Ainsi

$$\frac{s_{k+1} - s_k}{T_e} \simeq \omega_0 H_0 e_{k+1} - \omega_0 s_{k+1} \quad ; \quad s_{k+1} \simeq s_k + T_e (\omega_0 H_0 e_{k+1} - \omega_0 s_{k+1})$$

$$s_{k+1} (1 + T_e \omega_0) \simeq s_k + T_e \omega_0 H_0 e_{k+1} \quad ; \quad s_{k+1} \simeq \frac{s_k + T_e \omega_0 H_0 e_{k+1}}{1 + T_e \omega_0}.$$

Ainsi on peut obtenir le signal filtré au pas de temps $k+1$ s_{k+1} à partir de la valeur du signal d'entrée à filtrer au pas de temps $k+1$ e_{k+1} et le signal filtré au pas de temps k s_k .

Procédure

11. **Choisir** une pulsation de coupure ω_0 permettant de supprimer la plus petite fréquence observée précédemment.
12. **Compléter** le cinquième bloc de code afin de filtrer le signal obtenue précédemment $e(t)$ et obtenir l'allure temporelle et le spectre du signal filtré $s(t)$ en **exécutant** le cinquième et sixième bloc.
13. **Décrire** les figures obtenues et les **interpréter**.
14. **Exécuter** le septième bloc de code qui permet de visualiser le diagramme de Bode en amplitude du filtre passe-bas numérique. Le **comparer** à celui d'un filtre passe-bas analogique. **Conclure**.

Grille d'évaluation

Critère	Points
Présentation (propreté, orthographe, schéma)	4
Rigueur (résultats calculatoires, utilisations de lois et de théorèmes, ...)	6
Interprétation et validation	4
Implication (nombres de questions traitées)	6