



Lycée Charles Coëffin — Sciences physiques

Fiche de travaux pratiques — CPGE TSI2

TP 4 : Électronique numérique**Durée : 2 h**

Objectifs

- Mettre en œuvre un microcontrôleur ESP32 comme système d'acquisition d'une tension analogique.
- Identifier les paramètres essentiels d'une acquisition numérique : résolution du CAN, fréquence d'échantillonnage, nombre d'échantillons et durée d'acquisition.
- Mettre en évidence expérimentalement le phénomène de repliement spectral lorsque le critère de Nyquist–Shannon n'est pas respecté.
- Modifier un programme simple d'acquisition et exploiter les données mesurées dans les domaines temporel et fréquentiel.
- Réaliser un filtrage numérique passe-bas d'un signal acquis.

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

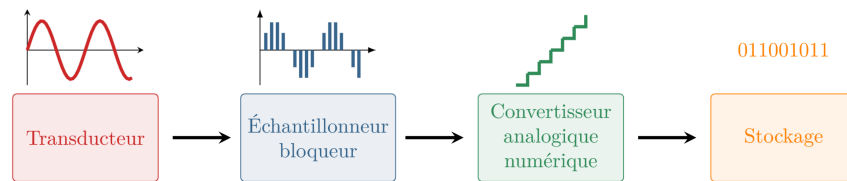
Équipement	Spécifications / Remarques	Quantité
GBF	Attention au type d'amplitude sélectionné <i>root mean square (RMS)</i> ou <i>peak to peak</i> (crête-à-crête).	1
Microcontrôleur ESP32	Entrées analogiques limitées à la plage de tension indiquée dans le TP.	1
Multimètre	Mesure de la tension continue appliquée à l'entrée du CAN.	1
Plaque d'essai microélectronique	Montage de connexion de l'ESP32.	1

Sécurité

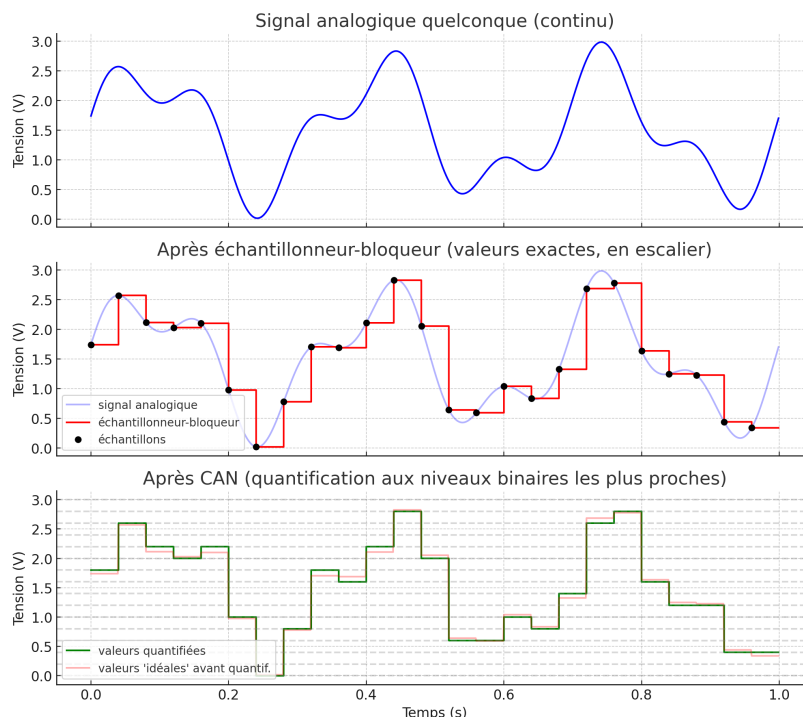
- Couper l'alimentation avant tout câblage.
- Éviter les courts-circuits prolongés.
- Faire vérifier le montage avec microcontrôleur par le professeur avant de l'alimenter.

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 *ADC* pour *Analog to Digital Converter*).

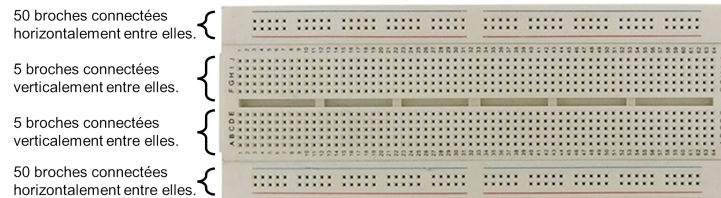


- Un signal analogique d'intérêt est d'abord converti en tension analogique par un **transducteur**. Exemple : un microphone convertit un signal acoustique en tension, une sonde de température convertit une température en tension.
- La tension analogique est ensuite envoyée vers un **échantillonneur 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 tout instant t et toutes les valeurs sont permises. Le **convertisseur analogique-numérique** (CAN) associe ensuite à chaque tension échantillonnée l'un des niveaux de quantification disponibles, puis code ce niveau par un nombre binaire.
- Les valeurs issues du CAN sont finalement **stockées en mémoire** pour être affichées ou manipulées.



1 Prise en main du CAN de l'ESP32

On utilise un microcontrôleur ESP32 monté sur une plaque de connexion. La broche 34 est reliée à une entrée analogique du CAN. L'objectif de cette première partie est de comprendre ce que renvoie concrètement le CAN avant d'acquérir un signal variable.



Plage de tensions mesurables

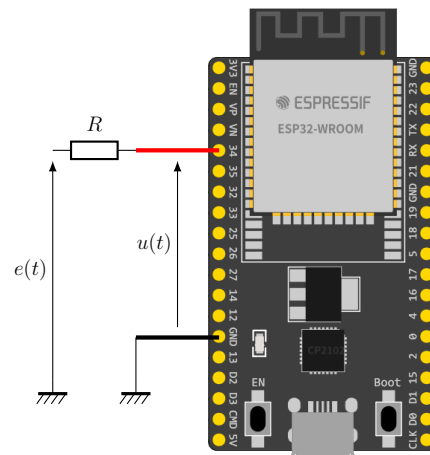
La tension appliquée sur l'entrée analogique doit rester comprise dans la plage admissible. Dans tout le TP, on imposera par sécurité

$$0 \text{ V} \leq u(t) \leq 3,3 \text{ V}.$$

Pas de quantification

Le CAN possède une résolution de $N = 12$ bits : il peut donc délivrer $2^{12} = 4096$ codes différents. Avec la convention utilisée dans ce TP et une pleine échelle de 3,6 V, le pas de quantification vaut

$$q = \frac{3,6 \text{ V}}{2^{12} - 1} = 0,88 \text{ mV/unité numérique}.$$



Premiers éléments de programmation

Un programme d'acquisition doit au minimum **sélectionner** une entrée analogique, **effectuer** une conversion, **stocker** la valeur mesurée puis recommencer. On utilise le code ci-dessous dans le deuxième bloc du fichier notebook fourni exploitant le langage de programmation MicroPython.

```
from machine import ADC, Pin

adc = ADC(Pin(34))          # entree analogique utilisée (conversion analogique vers
                             ↪ numérique)
adc.atten(ADC.ATTN_11DB)   # plage de mesure adaptée a l'ESP32 (paramétrage de l'ESP32)

N_CAN = adc.read()         # lecture de la tension stockée comme valeur numérique
```

Procédure

1. **Exécuter** le premier bloc du notebook (connexion du microcontrôleur), puis dans le deuxième bloc, **identifier** la ligne qui sélectionne la broche d'entrée et celle qui déclenche une conversion analogique-numérique. Dans le fichier notebook fourni, **modifier** le programme afin d'effectuer dix mesures successives d'une même tension continue et **commenter** leur éventuelle dispersion.
2. **Déterminer** la tension $u(t)$ appliquée théoriquement à l'entrée du microcontrôleur en fonction de $e(t)$. **Justifier** que la résistance R ne modifie pratiquement pas cette tension sachant que le courant d'entrée est de quelques μA .
3. **Régler** le GBF en tension continue et imposer successivement plusieurs tensions comprises entre 0,5 V et 2,5 V. **Mesurer** chaque tension U_m au multimètre puis **relevé** le valeur numérique renvoyé par le CAN de l'ESP32 notée N_{CAN} à l'aide du deuxième bloc modifié. **Ne jamais dépasser** 3,3 V.
4. Dans le bloc suivant, **entrer** les valeurs N_{CAN} et U_m mesurées précédemment et **tracer** N_{CAN} en fonction de U_m . **Interpréter** la pente obtenue et la **comparer** au pas de quantification attendu q .

2 Acquisition temporelle d'un signal sinusoïdal

On souhaite maintenant utiliser l'ESP32 comme un oscilloscope numérique rudimentaire. Le GBF délivre un signal sinusoïdal de fréquence $f = 40 \text{ Hz}$ compatible avec la plage d'entrée du CAN.

Procédure

5. **Déterminer** les valeurs d'amplitude crête-à-crête et de composante continue à imposer au GBF afin que $u(t)$ reste dans la plage $[0 \text{ V}; 3,3 \text{ V}]$. **Appeler** le professeur avant d'activer la sortie du GBF.
6. Le principe d'une acquisition de N_a points est décrit dans le bloc suivant. **Compléter** les lignes manquantes de ce bloc afin de stocker les valeurs du CAN et les instants auxquels elles ont réellement été acquises. La fonction `liste_1.append(a)` permet d'ajouter l'élément `a` à la liste `liste_1`. La fonction `sleep_us(b)` interrompt l'exécution du code pendant une durée `b` en microseconde.
7. Dans le bloc suivant, **calculer** les périodes d'échantillonnage réelles $T_{e,k} = t_{k+1} - t_k$, leur valeur moyenne $\overline{T_e}$ puis la fréquence d'échantillonnage mesurée $f_{e,\text{mes}} = 1/\overline{T_e}$ à partir de la liste des instants `t`. **Comparer** à la valeur fixée dans le programme.
8. **Exécuter** le bloc suivant, puis **compléter** le deuxième bloc suivant avec la valeur de fréquence imposée par le GBF. **Exécuter** ce dernier bloc pour **tracer** les points expérimentaux (t_k, u_k) . **Expliquer** en quoi l'ensemble ESP32 + programme constitue un oscilloscope numérique rudimentaire. **Identifier** sa plage de tension, sa résolution verticale, sa fréquence d'échantillonnage, son nombre d'échantillons N_a et sa durée d'acquisition T_a .
9. **Calculer** la résolution fréquentielle attendue $\Delta f = 1/T_a$ et la fréquence maximale affichée $f_e/2$. **Afficher** le spectre du signal à l'aide du bloc suivant et **comparer** les valeurs précédentes aux caractéristiques du spectre obtenu.

3 Influence de la fréquence d'échantillonnage

Pour un signal dont la fréquence maximale est $f_{\max}$, l'absence de repliement spectral impose le critère de Nyquist–Shannon.

Procédure

10. **Rappeler** ce critère. Pour le signal sinusoïdal de fréquence $f = 40$ Hz, **choisir** une fréquence d'échantillonnage telle que $f < f_e < 2f$. **Prévoir**, avant toute acquisition, la fréquence apparente attendue dans le cas étudié.
11. **Réaliser** l'acquisition avec cette nouvelle fréquence d'échantillonnage. **Comparer** l'allure temporelle et le spectre avec ceux obtenus précédemment. Mesurer la fréquence apparente et la comparer à la prévision.
12. Le GBF produit toujours un signal de 40 Hz. **Expliquer** pourquoi l'ESP32 peut néanmoins conduire à identifier une fréquence différente. **Nommer** le phénomène observé.

4 Filtrage numérique passe-bas

Afin de conserver principalement la composante continue du signal, on utilise un filtre numérique passe-bas du premier ordre. La fonction de transfert et l'équation différentielle associée sont

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

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

Avec le schéma d'Euler implicite et un pas de temps T_e , on obtient

$$\frac{s_{k+1} - s_k}{T_e} \simeq \omega_0 H_0 e_k - \omega_0 s_k \quad \text{soit} \quad s_{k+1} \simeq T_e \omega_0 H_0 e_k + s_k (1 - T_e \omega_0).$$

Procédure

13. **Compléter** le bloc suivant afin de **choisir** une fréquence de coupure f_c et une pulsation de coupure ω_0 permettant d'atténuer fortement la composante sinusoïdale tout en conservant la composante continue.
14. **Compléter** le même bloc avec le bon schéma d'Euler afin de calculer les échantillons filtrés s_k à partir des échantillons acquis e_k .
15. **Exécuter** le bloc pour tracer le signal filtré et non filtré. **Exécuter** le bloc suivant pour tracer le spectre des signaux filtré et non filtré. **Interpréter** l'effet du filtre dans les domaines temporel et fréquentiel.

5 Mini-défi : acquisition autonome

On souhaite maintenant se placer dans une situation proche de celle d'un TIPE. Le professeur passe vous voir avec un autre microcontrôleur délivrant un signal inconnu dont les composantes fréquentielles sont inférieures à 800 Hz, compatible avec l'entrée de l'ESP32, est fourni. Vous devez choisir vous-mêmes les paramètres de l'acquisition et adapter le programme précédent.

Procédure

16. **Présenter** le signal temporel et son spectre, puis **vérifier** la cohérence entre les grandeurs mesurées dans les deux domaines. **Déterminer** la valeur moyenne, l'amplitude et la fréquence fondamentale du signal inconnu. **Choisir et justifier** la fréquence d'échantillonnage f_e , le nombre d'échantillons N_a et la durée d'acquisition T_a .

Grille d'évaluation

Critères	Points
Présentation (propreté, orthographe, schéma)	4
Rigueur (résultats, utilisation des lois et théorèmes, code)	6
Interprétation et validation	4
Autonomie et implication (organisation, manipulations, initiative)	6