



BLAISE PASCAL
PT 2021-2022

TP 2 – Électronique

Électronique numérique

Objectifs

- ▷ *S'approprier* : Produire un signal par multiplication de signaux ;
- ▷ *Analyser* un spectre calculé numériquement et repérer l'influence du repliement spectral et des fuites spectrales ;
- ▷ *Réaliser* une mesure de résolution (nombre de bits) d'un CAN ;
- ▷ *Réaliser* un filtrage numérique passe-bas.

Matériel sur votre paillasse :

- ▷ Oscilloscope et notice ;
- ▷ Ordinateur avec le logiciel LatisPro ;
- ▷ Centrale d'acquisition Sysam ;
- ▷ Deux GBF ;
- ▷ Un multiplieur ;
- ▷ Alimentation continue $\pm 15\text{ V}$;
- ▷ Une résistance $1,5\text{ k}\Omega$;
- ▷ Un condensateur 100 nF ;
- ▷ Une plaquette de branchement.

Ce TP a pour objectifs d'observer les phénomènes associés à la numérisation d'un signal, puis d'aller plus loin en réalisant un filtrage numérique. Il sera en outre l'occasion d'apprendre à observer un spectre à l'oscilloscope.

I - Spectres numériques

I.A - Génération d'un signal à trois composantes



Pour réaliser les expériences suivantes, nous allons générer « à la main » un signal à trois composantes par multiplication de deux signaux sinusoïdaux grâce à un multiplieur. Un multiplieur est un quadripôle prenant deux tensions d'entrée e_1 et e_2 et délivrant en sortie la tension

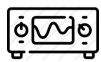
$$s = k e_1 e_2 .$$

Le gain des multiplieurs du lycée vaut $k = 0,1\text{ V}^{-1}$. Pour ce TP, on choisit deux signaux sinusoïdaux de fréquences respectives f_1 et $f_2 > f_1$, le signal de haute fréquence contenant également une composante continue,

$$e_1(t) = E_1 \cos(2\pi f_1 t) \quad \text{et} \quad e_2(t) = E_0 + E_2 \cos(2\pi f_2 t) .$$

✎ Écrire le signal s sous forme d'une somme de signaux sinusoïdaux.

✎ Représenter son spectre pour $E_0 = 2\text{ V}$, $E_1 = E_2 = 4\text{ V}$, $f_1 = 1\text{ kHz}$ et $f_2 = 5\text{ kHz}$.



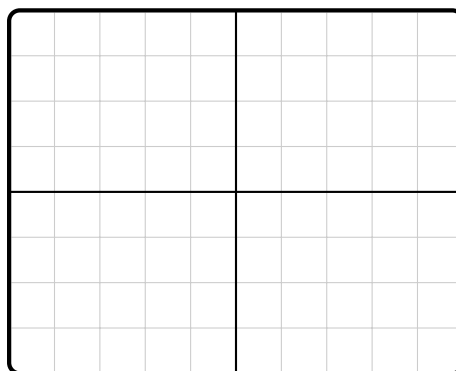
En utilisant le GBF gris pour le signal de plus basse fréquence et le GBF bleu pour celui de plus haute fréquence, générer le signal $s(t)$.

Utilisation du multiplieur :

- ▷ il doit être alimenté par une source continue $\pm 15\text{ V}$;
- ▷ il dispose de cinq entrées, et renvoie en sortie la tension $s = k(X_1 - X_2)(Y_1 - Y_2) + Z$: il est donc nécessaire de relier à la masse les trois entrées X_2, Y_2 et Z .

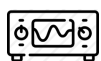
Comme les signaux sinusoïdaux sont produits par deux GBF différents dont les fréquences ne peuvent pas être parfaitement réglées et synchronisées, le signal s ne peut pas être rigoureusement périodique, ce qui complique son observation à l'oscilloscope : utiliser la touche **Run/Stop** pour l'observer (ce qui n'est en général pas la méthode à utiliser !).

✎ Allure du signal s observé à l'oscilloscope :



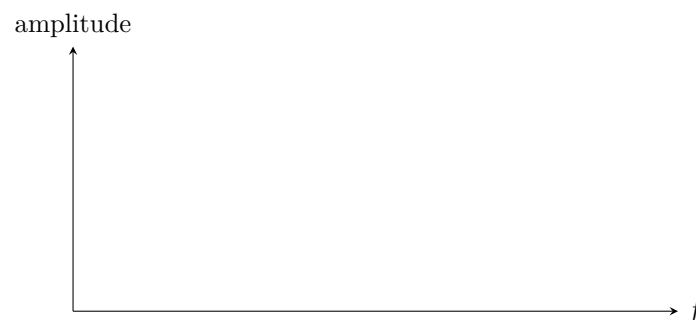
I.B - Étude du spectre après numérisation par la carte Sysam

La carte Sysam est constitué de quatre CAN de calibre 5V et de fréquence d'échantillonnage réglable (mais toujours inférieure à 10 MHz. Elle comporte aussi un CNA échantillonnant à 5 MHz. Les signaux numérisés seront visualisés sur l'ordinateur grâce au logiciel LatisPro, qui permet également de piloter la carte d'acquisition. Il est possible de régler séparément le nombre d'échantillons, la période d'échantillonnage et la durée d'acquisition.



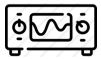
Commencer par choisir des paramètres d'acquisition permettant d'obtenir une image du signal voisine de celle observée à l'oscilloscope précédemment. L'acquisition se lance en appuyant sur la touche F10.

Une fois l'acquisition réalisée, le spectre du signal numérisé s'obtient par le menu Traitements → Calculs spécifiques → Analyse de Fourier. La fenêtre qui s'ouvre propose d'ouvrir un menu d'options avancées, dans lesquelles on choisira d'afficher le résultat sur l'intervalle $[0, f_e]$.



✎ Le spectre est-il conforme au spectre théorique? Expliquer les différences en lien avec les phénomènes présentés en cours.

Espace 2



Proposer et mettre en œuvre un protocole permettant d'observer le phénomène de repliement spectral.

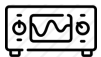
✎ Allure du spectre observé :



✎ Interprétation :

Espace 3

I.C - Étude du spectre après numérisation par l'oscilloscope



La fréquence d'échantillonnage de l'oscilloscope est directement contrôlée par le bouton tournant d'échelle horizontale : contrairement aux apparences, ce bouton n'est **PAS** un zoom, mais modifie directement les paramètres de l'acquisition. Elle est indiquée en bas de l'écran en nombre d'échantillons par seconde, de symbole MS/s (parfois kS/s) pour « megasamples per second », ce qui équivaut à des MHz.

✎ Comment faut-il régler l'échelle temporelle de l'oscilloscope pour observer convenablement le spectre ?

Espace 4

✎ Reproduire l'expérience conduisant à du repliement spectral. Qu'observe-t-on ?

Espace 5

II - Quantification par la carte Sysam

Rappel de vocabulaire :

- ▷ Le **pas** ou **quantum de quantification** q est l'écart (en volt) entre deux valeurs binaires successives.
- ▷ Le **calibre** C donne la gamme de valeurs $\pm C$ que le signal numérisé est susceptible de prendre. La valeur $2C$, c'est-à-dire la largeur de l'intervalle de valeurs permises, est la **tension de pleine échelle** du CAN.
- ▷ La **résolution** N indique le nombre de bits sur lequel le signal numérisé est codé : 2^N valeurs sont possibles dans l'intervalle $[-C, +C]$, ou autrement dit cet intervalle est divisé en $2^N - 1$ intervalles de largeur identique.

Illustration : L'influence du pas de quantification sur le signal numérisé est représenté figure 1.

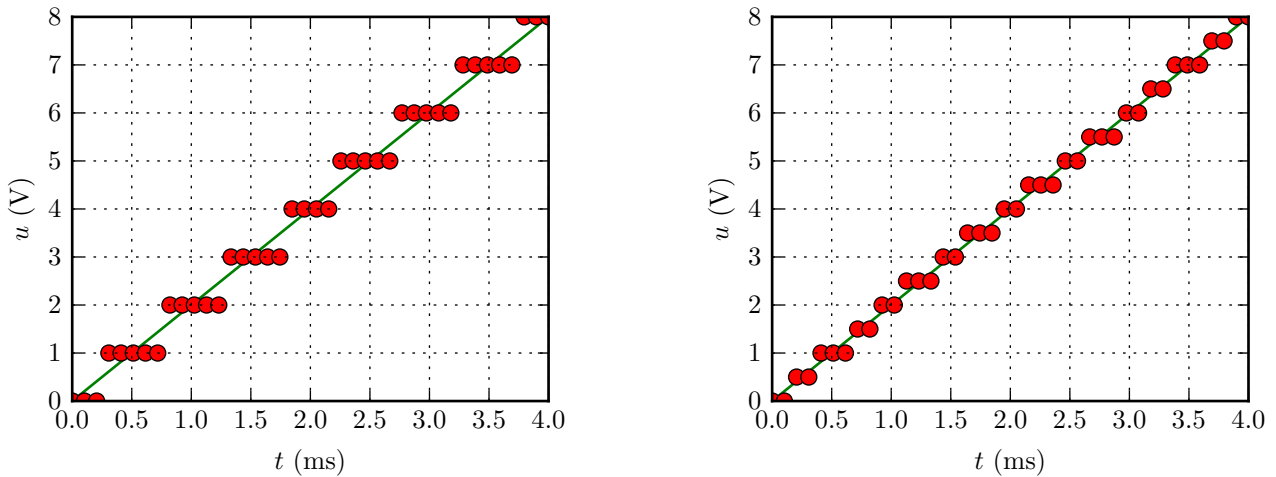


Figure 1 – Deux exemples de numérisation d’une même tension. Le signal analogique est représenté en trait plein bleu, le signal numérisé par les points verts. Dans les deux cas la période d’échantillonnage est de 0,1 ms. Sur la figure de gauche le pas de quantification vaut 1 V alors qu’il vaut 0,5 V sur la figure de droite.

✍ Exprimer le pas de quantification q en fonction du calibre et de la résolution exprimée en bits.

Espace 6



Proposer et mettre en œuvre un protocole permettant de déterminer la résolution de la carte Sysam.

Espace 7

III - Filtrage numérique : exemple du passe-bas du premier ordre

L'un des principaux intérêts de la numérisation d'un signal est la simplicité d'un traitement numérique comparé à un traitement analogique : les tâches peuvent être plus complexes et plus facilement modifiables (changer la valeur d'une variable dans un programme est bien plus simple que de changer de composant électronique!). Une fois traité, le signal numérique peut être de nouveau converti en signal analogique par un convertisseur numérique-analogique (CNA). À titre d'illustration, nous allons numériser un signal, le filtrer numériquement puis le reconvertir sous forme analogique.

III.A - Algorithme de filtrage



La fonction de transfert d'un filtre passe-bas s'écrit sous forme canonique

$$\underline{H} = \frac{\underline{S}}{\underline{E}} = \frac{H_0}{1 + j\omega/\omega_c}$$

avec \underline{H}_0 le gain statique et ω_c la pulsation de coupure. Dans la suite on prendra

$$\underline{H}_0 = 1 \quad \text{et} \quad f_c = 1,0 \text{ kHz}.$$

Pour calculer numériquement le signal de sortie, on pourrait calculer le spectre du signal numérisé et le multiplier par la fonction de transfert. Il est cependant plus simple de travailler directement dans le domaine temporel.

↪ relation différentielle entre s et e :

Espace 8

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 explicite, le pas de temps étant égal à la période d'échantillonnage :

$$\frac{ds}{dt} = \frac{s_{n+1} - s_n}{T_e}$$

On peut alors en déduire une relation de récurrence permettant de calculer $s_{n+1} = s((n+1)T_e)$ à partir de $e_n = e(nT_e)$ et $s_n = s(nT_e)$, et ainsi de reconstruire point par point le signal (numérisé) s à partir de e .

Espace 9



Il nous faut maintenant implémenter cet algorithme, ce que nous allons faire sous Latis Pro. Recopier le code ci-dessous (sans les commentaires ☺, et éventuellement en l'adaptant à l'entrée utilisée) dans une feuille de calcul : onglet Traitement → Feuille de calcul. Pour exécuter cette feuille de calcul, il suffit d'appuyer sur la touche F2 (ou Calcul → Exécuter), et on peut ensuite afficher la courbe associée.

```
Te = 10e-6           // Déclare la variable Te (période d'échantillonnage) avec la valeur
                    // de 10 microsecondes. A MODIFIER par la suite.

omegac = 2 * pi * 1e3 // Déclare la variable omegac (pulsation de coupure du filtre)
                    // à partir de la fréquence de coupure

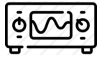
s = Table(0)        // Sert à créer un tableau s, qui sera le signal de sortie
                    // En Python on aurait écrit s = np.zeros(len(EA1))
```

```

s[n] = omegac * Te * EA1[n-1] + (1 - omegac * Te) * s[n-1]
// Relation de récurrence
// A MODIFIER éventuellement selon la voie d'entrée utilisée
// En Python, l'équivalent serait :
// for n in range(1,len(s)):
//     s[n] = A*EA1[n-1] + B*s[n-1]

```

III.B - Mise en œuvre



Produire un signal créneau $e(t)$ de fréquence $f_0 = 300$ Hz. Réaliser un filtrage passe-bas analogique à l'aide d'un filtre RC ($R = 1,5$ k Ω et $C = 100$ nF donne 1 kHz comme fréquence de coupure).

Acquérir le signal créneau sur 1024 points avec une période d'échantillonnage $T_e = 10$ μ s. Réaliser le filtrage numérique et afficher sur LatisPro la courbe représentant s . Vérifier qualitativement et rapidement en changeant la fréquence du signal d'entrée que le système agit bien en filtre passe-bas.

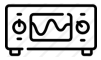
Pour restituer le signal filtré sous forme analogique, on utilise le CNA de la carte SYSAM. Il se paramètre dans l'onglet « sortie » de LatisPro (flèche vert foncée située à côté du paramétrage de l'acquisition et de l'affichage des courbes). Le signal indiqué est envoyé sur la borne « sortie analogiques » de la carte d'acquisition, ou bien périodiquement si le « mode GBF » est activé, ou bien une unique fois si l'on clique sur le bouton « Émettre ».

 **Attention !** La carte d'acquisition ne peut pas délivrer une tension supérieure à 5 V : modifier l'amplitude de l'entrée e si nécessaire.

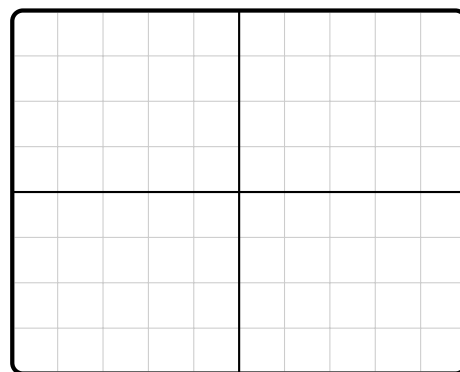
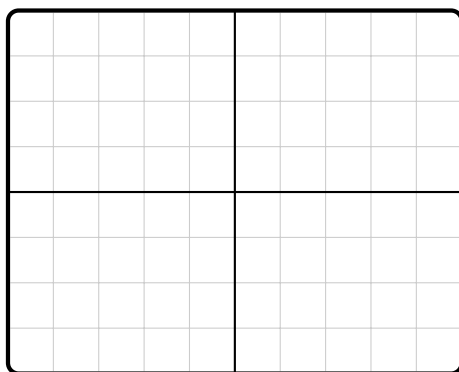
Observer ce signal à l'oscilloscope. Attention, comme l'acquisition est faite sur une durée finie alors le signal de sortie est également émis sur la même durée finie, mais celle-ci n'étant pas synchronisée avec la période du signal, un déphasage fluctuant rapidement apparaît entre les signaux filtrés de manière analogique et numérique : il faut donc utiliser le bouton **Run/Stop** pour bloquer l'acquisition.


III.C - Importance de la fréquence d'échantillonnage

En plus de la fréquence du signal f_0 et de la fréquence d'échantillonnage f_e , une troisième fréquence intervient ici : la fréquence de coupure du filtre f_c . L'objectif de cette dernière partie est de mettre en évidence une contrainte sur la fréquence d'échantillonnage pour que le filtrage numérique soit efficace.



On travaille en conservant la fréquence du signal et la fréquence de coupure du filtre fixées : seule la fréquence d'échantillonnage est modifiée : **n'oubliez pas** de modifier la feuille de calcul en conséquence. Filtrer le même signal que précédemment pour $T_e = 10$ μ s, puis 100 μ s. Reproduire l'allure du signal observé à l'écran.



 Interprétation :

✎ Comment choisir la fréquence d'échantillonnage pour limiter cet effet ?

Espace 11

Remarque : On comprend ainsi que le critère ne se généralise pas directement à un filtre passe-haut, dont le dimensionnement implique une connaissance a priori des signaux qui seront filtrés.