

# TP n°3 Electronique: Analyse spectrale numérique

## CAPACITÉS EXPÉRIMENTALES EXIGIBLES:

Réaliser l'échantillonnage d'un signal. Choisir la fréquence d'échantillonnage afin de respecter la condition de Nyquist-Shannon. Commenter la structure du spectre du signal obtenu après échantillonnage. Mettre en évidence le phénomène de repliement de spectre au moyen d'un oscilloscope numérique ou d'un logiciel de calcul numérique.

On se propose dans ce T.P d'effectuer l'analyse spectrale numérique de signaux. On utilisera à cet effet un oscilloscope numérique (TEKTRONIX TDS 1002 ou 210) et le logiciel Latispro qui pilote le boîtier d'acquisition SYSAM SP5. On se limitera ici à faire apparaître les spectres de signaux simples (sinusoïdaux, créneaux, triangles), en respectant le critère de Nyquist-Shannon tout en conservant une bonne résolution fréquentielle et en évitant l'apparition de pics parasites par application d'un fenêtrage.

**Important:** vous trouverez en annexe une fiche méthode présentant l'utilisation des dispositifs d'acquisition et d'analyse nécessaires à la réalisation de ce TP.

## 1 Analyse de Fourier de signaux simples

### 1.1 Spectre d'un signal sinusoïdal

- Régler le générateur de fonctions Agilent Keysight pour obtenir un signal sinusoïdal de fréquence 800 Hz et d'amplitude 5 V (10 V crête-à-crête).

Rappelons que l'indication de l'amplitude délivrée par le GBF Keysight correspond à la valeur obtenue aux bornes d'une charge de même impédance que l'impédance interne que celle du générateur:  $R = 50 \Omega$ . Lorsque le générateur débite sur une charge très grande (impédance d'entrée de l'oscilloscope de  $1 M\Omega$ ), l'amplitude délivrée est donc deux fois plus grande que celle affichée.

#### 1.1.1 Utilisation de l'oscilloscope TEKTRONIX

Vérifier que l'on observe bien sur l'écran de l'oscilloscope TEKTRONIX une composante d'amplitude 5 V et de fréquence 800 Hz.

#### 1.1.2 Critère de Nyquist-Shannon et repliement du spectre

- Diminuer alors la fréquence d'échantillonnage jusqu'à ce qu'elle devienne inférieure à 1,6 kHz. Aucune composante spectrale ne devrait apparaître et pourtant constater que l'analyseur fait apparaître une composante de fréquence inférieure à 800 Hz: il s'agit du phénomène de repliement de spectre. Mesurer la fréquence de la composante sinusoïdale observée et vérifier qu'elle correspond bien à un repliement de spectre.
- En augmentant la fréquence d'échantillonnage, donc en tournant le commutateur SEC/DIV vers la droite, constater que le spectre ne contient bien qu'une seule fréquence de 800 Hz.

Sachant que la fréquence d'échantillonnage dépend de la fréquence de balayage, il faut placer le commutateur SEC/DIV sur la graduation telle que la fréquence de Nyquist soit supérieure à la plus grande fréquence contenue dans le spectre du signal.

On pourrait penser que l'on a intérêt à échantillonner à une fréquence très élevée pour s'affranchir des problèmes de repliement. Il n'en est rien : le nombre de points d'acquisition étant fixe, si  $T_e$  diminue,  $T_a$  également et donc la résolution en fréquence est alors réduite (l'écart entre deux raies du spectre calculées par l'algorithme augmente).

#### 1.1.3 Utilisation de Latis Pro

Avec LatisPro, faire l'acquisition du signal sinusoïdal de fréquence 1 kHz et d'amplitude 5 V en choisissant les paramètres suivants:

- $N = 16000, t_e = 500 \text{ ns} (T_a = 8 \text{ ms})$ . Afficher le spectre du signal. Commenter le spectre obtenu.
- $N = 1600, t_e = 200 \text{ ns} (T_a = 320 \text{ }\mu\text{s})$ . La condition de Nyquist-Shannon est-elle toujours vérifiée ? Afficher le spectre du signal et commenter le résultat obtenu.
- $N = 1024$  (puissance de 2) en gardant  $t_e = 250 \text{ }\mu\text{s}$ . Commenter le spectre obtenu.
- $N = 1024, t_e = 625 \text{ }\mu\text{s}, (T_a = 640 \text{ ms})$ . Là-encore, la condition de Nyquist-Shannon est-elle toujours vérifiée? Afficher le spectre du signal et commenter à nouveau le résultat obtenu.

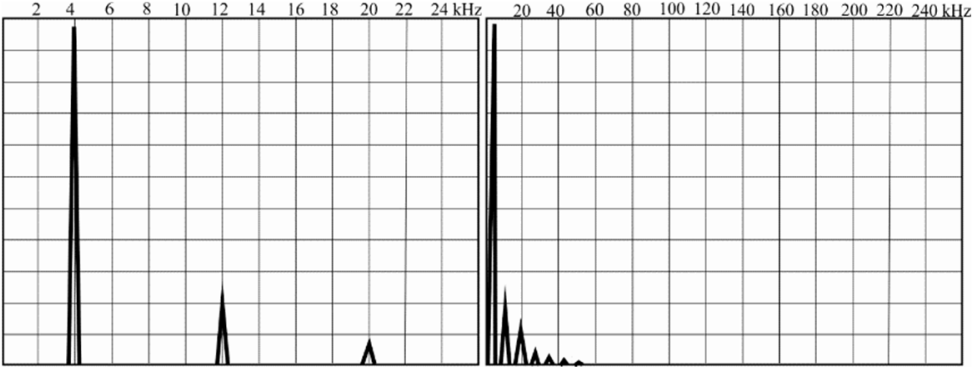
1.2 Spectre d’un signal triangulaire

- Appliquer un signal triangulaire de fréquence fondamentale 4 kHz et d’amplitude 5 V (10 V crête-à-crête). Effectuer l’analyse spectrale du signal. Prendre une fréquence d’échantillonnage suffisante pour que les composantes issues du repliement du spectre, soient d’amplitudes très faibles.
- Vérifier que les fréquences affichées sont conformes à la théorie.
- Mesurer l’amplitude des trois premiers harmoniques non nuls et comparer leurs valeurs théoriques données par le développement de cette fonction en série de Fourier:

$$c_{2k+1} = \frac{8E}{(2k + 1)^2\pi^2} \text{pour } k \in \mathbb{N}.$$

Recopier et remplir le tableau suivant:

	$c_1$	$c_3$	$c_5$
Latis pro			
Tektronix			
Théorie	4,05 V	0,450 V	0,162 V



spectre d'un signal triangulaire, oscilloscope numérique (dB)

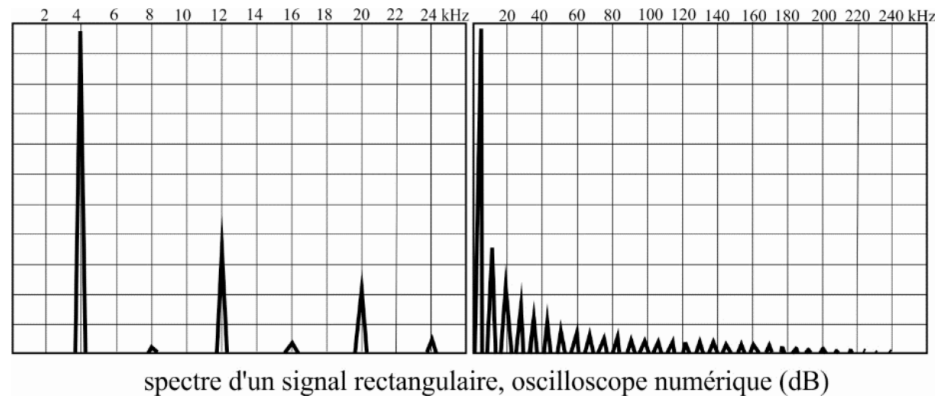
1.3 Spectre d’un signal rectangulaire

- Appliquer un signal rectangulaire de fréquence fondamentale 4 kHz et d’amplitude 5 V (10 V crête-à-crête). Effectuer l’analyse spectrale du signal. Prendre une fréquence d’échantillonnage suffisante pour que les composantes issues du repliement du spectre, soient d’amplitudes très faibles.
- Vérifier que les fréquences affichées sont conformes à la théorie.
- Mesurer l’amplitude des trois premiers harmoniques non nuls et comparer leurs valeurs théoriques données par le développement de cette fonction en série de Fourier : pour  $n$  impair. Recopier et remplir le tableau suivant:

$$c_{2k+1} = \frac{4E}{(2k + 1)\pi} \text{ avec } k \in \mathbb{N}$$

Recopier et remplir le tableau suivant:

	$c_1$	$c_3$	$c_5$
Latis pro			
Tektronix			
Théorie	6,36 V	2,12 V	1,27 V



## ANNEXE: NOTICE SUCCINCTE D'UTILISATION DES INSTRUMENTS D'ACQUISITION ET D'ANALYSE SPECTRALE

### 2 Rappels théoriques

Les outils d'acquisition numérique procèdent à un échantillonnage du signal  $f(t)$  pour obtenir le signal  $f_{\text{ech}}(t)$ . On note :

- $F_e$  la fréquence d'échantillonnage,  $T_e = 1/F_e$  la période associée (c'est-à-dire l'intervalle de temps écoulé entre deux acquisitions successives)
- $N$  le nombre de points d'acquisitions.

Par conséquent, la durée totale d'acquisition est  $T_a = NT_e = NF_e$ .

Le spectre numérique indique les composantes spectrales du signal échantillonné pour les fréquences:

$$f_k = \frac{k}{N}F_e \text{ avec } 0 \leq k < \lfloor \frac{N}{2} \rfloor$$

Le spectre obtenu est conforme à celui du signal analogique  $f(t)$  si le critère de Nyquist-Shannon est vérifié à savoir:

$$F_e > 2F_{\text{max}}$$

### 3 Utilisation de l'oscilloscope numérique TEKTRONIX

Cet oscilloscope numérique en temps réel possède un affichage à cristaux liquides et permet d'effectuer une Transformée de Fourier Rapide (ou FFT en anglais pour Fast Fourier) Transform, et de mesurer précisément à l'aide de curseurs les fréquences et amplitudes des composantes spectrales.

#### 3.1 Régalges

- Pour la FFT, commencer par afficher un signal temporel. Régler le facteur  $VOLTS/DIV$  du signal afin que le signal ne sorte pas de l'écran car **l'analyseur effectue la FFT du signal affiché à l'écran.**

**CONSEQUENCE:** Pour un signal de valeur moyenne nulle qui n'est pas centré à l'écran (trace du « zéro » non réglée), une composante continue ( $F = 0 \text{ Hz}$ ) apparaîtra dans le spectre. Tourner la molette *VERTICAL POSITION* pour centrer verticalement le signal; une indication du décalage par rapport à un centrage parfait apparaît en base à gauche de l'écran tant que la molette est actionnée, et disparaît ensuite.

- Appuyer sur la touche **MATH** pour afficher le menu mathématique. Utiliser les touches de menu pour sélectionner la voie **source FFT**.
- Régler le facteur *SEC/DIV* de manière à obtenir la résolution souhaitée pour le signal *FFT* (il est important que plusieurs cycles soient affichés). Le choix d'un facteur *SEC/DIV* plus rapide permet d'éviter le repliement de spectre, mais la résolution en fréquence est moindre. La fréquence d'échantillonnage est indiquée en bas de l'écran, entre parenthèses, en nombre d'échantillons par seconde (ex: 1,00 MS/s (Méga « spot »/s) correspond par exemple à une fréquence d'échantillonnage de 1 MHz).
- Ajuster le type de fenêtre et le facteur d'agrandissement horizontal de l'affichage **FFT** sans modifier la fréquence d'échantillonnage (FFT ZOOM  $\times 1$ ,  $\times 2$ ,  $\times 5$ ,  $\times 10$ ).

**NB:** le nombre de points d'échantillonnage  $N$  est fixé par le constructeur de l'appareil à 2048 points, ce n'est donc pas un paramètre ajustable ici.

## 3.2 Principe des mesures

Pour réaliser des mesures sur les spectres de signaux obtenus par FFT, appuyer sur **CURSEURS**, **Source** et sélectionner **Math**.

### 3.2.1 Mesure de fréquences

Appuyer sur la touche **Type** pour choisir Fréquence (*en Hz*) à l'aide d'un curseur vertical. Pour une meilleure précision en fréquence, utiliser le zoom en déplaçant horizontalement au préalable la partie du spectre à détailler de manière à ce qu'elle soit centrée sur le réticule vertical central).

### 3.2.2 Mesure d'amplitudes

Appuyer sur la touche **Type** pour choisir Amplitude à l'aide d'un curseur horizontal. Pour une meilleure précision en amplitude, augmenter la sensibilité **VOLTS/DIV** et déplacer le spectre verticalement de manière à pouvoir bien placer un curseur horizontal sur le haut de la raie spectrale dont on veut mesurer l'amplitude.

**ATTENTION:** Pour une raie spectrale d'amplitude  $V_m$  et de fréquence  $f$  s'écrivant:

$$V(t) = V_m \cdot \cos(2\pi f t + \varphi)$$

l'oscilloscope affichera, en mode FFT, une valeur d'amplitude  $V_{dB}$  en dB, définie par:

$$V_{dB} = 20 \log \left( \frac{V_{eff}}{V_{ref}} \right) \quad \text{avec } V_{eff} = V_m / \sqrt{2} \text{ et } V_{ref} = 1 \text{ V}$$


La valeur maximale (ou amplitude) d'un signal sinusoïdal (c'est-à-dire de n'importe quelle raie spectrale) se déduit donc de la valeur lue en dB par la relation:


$$V_m = \sqrt{2} \cdot 10^{\frac{V_{dB}}{20}}$$

## 4 Utilisation de LatisPro


### 4.1 Acquisition

Lancer le logiciel. Faire l'acquisition avec l'interface Sysam *SP5* du signal délivré par le *G.B.F* (voie **EA0** de l'interface)

- Dans paramètres, cliquer sur l'icône  afin de régler les paramètres d'acquisition.
- Activer l'entrée analogique *EA0* en cliquant dessus.
- Choisir la période d'échantillonnage (notée  $t_e$ ) en cohérence avec le critère de Nyquist-Shannon.

- Choisir le nombre  $N$  de points d'échantillonnage. Lors d'un premier essai, il convient de prendre  $N = 16000$ , valeur maximale, et  $t_e = 500 \text{ ns}$  (valeur minimale), ce qui permet a priori d'échantillonner des signaux de fréquence  $F \leq 1 \text{ MHz}$ . N'augmenter  $t_e$  que si des problèmes de résolution fréquentielle se posent. Le choix d'un nombre initial de points d'acquisition comme puissance de 2 (2, 4, 8, 16, 32, 64, etc...), permet d'éviter des erreurs de calcul du spectre lorsque la fréquence d'échantillonnage devient faible et se rapproche de  $2F_{max}$ .
- Lancer l'acquisition en cliquant sur l'icône . Le signal temporel apparaît dans une fenêtre.

## 4.2 Traitement

- Cliquer sur l'icône  pour faire apparaître la liste des courbes. La courbe  $EA0 \text{ fct}(Temps)$  y apparaît.
- Dans le menu TRAITEMENTS, choisir CALCULS SPÉCIFIQUES puis ANALYSE DE FOURIER: une fenêtre de dialogue apparaît.
- Faire glisser la courbe  $EA0$  dans la case COURBE et lancer le calcul du spectre. Ce dernier apparaît dans une nouvelle fenêtre lors d'un premier appel, et également dans la liste des courbes, ce qui permet de l'afficher dans une autre fenêtre si on le souhaite.
- Entrer dans le menu AVANCÉ de la fenêtre de dialogue ANALYSE DE FOURIER. On peut y choisir entre autres l'application d'une fenêtre de pondération et le choix automatique ou manuel de la portion de courbe que l'on veut analyser. Pour des signaux simples, LatisPro choisit par défaut un nombre entier de périodes, et le plus grand possible, ce qui rend inutile l'utilisation d'un fenêtrage. Pour des signaux plus complexes, il peut en revanche être utile de choisir judicieusement le début et la fin de la portion de courbe à analyser.

Les mesures de fréquence et d'amplitude s'effectuent alors aisément avec l'outil POINTEUR disponible en faisant un clic droit sur le spectre.