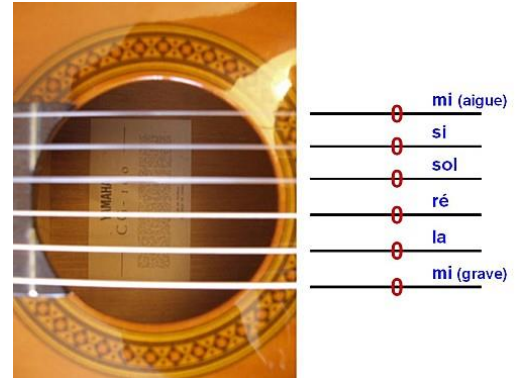


## Acquisition numérique d'un son : Critère de Shannon, résolution spectrale, détection synchrone



Il existe plusieurs façons d'accorder une guitare. On peut s'aider d'un accordeur électronique ou procéder « à l'oreille ». Dans les deux cas, le principe consiste à vérifier que la fréquence du son émis par la corde correspond bien à la fréquence attendue.

L'accordeur électronique possède en mémoire les six fréquences des six cordes, numérotées de 1 (mi aigue) à 6 (mi grave) de haut en bas sur la photo de droite.

En procédant à l'oreille, il faut se munir d'un diapason donnant le La à 440 Hz pour régler la 5<sup>e</sup> corde de la guitare (La 110 Hz). La 5<sup>e</sup> corde étant réglée, elle sert alors de référence pour régler la 4<sup>e</sup> corde : en bloquant la 5<sup>e</sup> corde au niveau de la 5<sup>e</sup> case (en partant de la droite, sur la photo de gauche), on obtient la même note que la 4<sup>e</sup> corde. En grattant les deux cordes en même temps, on compare à l'oreille que les notes sont les mêmes. On procède (presque) de la même façon pour régler les autres cordes.

Il est évident que l'analyse spectrale peut être utilisée pour vérifier le bon accordage d'une guitare. Dans ce TP, nous allons envisager différentes façons de mesurer la fréquence du son émis :

- par mesure directe de la fréquence via une analyse spectrale numérique
- par comparaison avec une fréquence de référence (de 3 façons différentes)

Remarque : Lors des acquisitions de signaux sur ordinateur, pensez bien à enregistrer les courbes qui vous paraissent pertinentes pour votre compte-rendu, à conserver dans votre classeur de TP.

Remarque : Un objectif fort du TP est d'apprendre à régler correctement les valeurs des paramètres d'acquisition : nombre de points échantillonnés  $N$ , période d'échantillonnage  $T_e$  et durée d'acquisition  $T_a$ .

*On retiendra qu'une fois  $N$  réglé (max ~20 000), Latis le garde fixe : toute modification de  $T_e$  par l'utilisateur est automatiquement répercutée sur  $T_a$  par Latis (et inversement).  $N$  n'est généralement pas modifié automatiquement par Latis.*

Remarque : Dans l'énoncé du TP, nous utiliserons comme fréquence de référence 1000 Hz, plutôt que le La à 440 Hz, pour s'affranchir d'une insuffisance de LatisPro : toutes les fréquences d'échantillonnage ne sont pas accessibles autour de 500 Hz.

### Consigne pour tracer un spectre de Fourier sur LatisPro

Évitez absolument le mode graphique par défaut en « bâtonnets ».  
En cliquant droit sur la courbe, modifiez cette option et tracez une courbe usuelle (segments de droite).

## 1. Acquisition numérique d'un signal – Mise en évidence du critère de Shannon

1.1) A l'aide du haut-parleur, générer un son de fréquence  $f = 1000 \text{ Hz}$ . *Conseils :*

- visualiser le signal à l'oscilloscope pour vérifier que la forme du signal est la bonne
- comme tout capteur, le micro sature si le son émis est trop intense
- s'assurer que le micro est en marche : il faut appuyer sur le bouton situé sur le dessus
- régler le micro (et l'ampli éventuel) pour s'assurer que le signal délivré est au moins de l'ordre de 1V

1.2) Le nombre de points échantillonnés  $N$ , la période d'échantillonnage  $T_e$  et la durée d'acquisition  $T_a$  sont les trois paramètres réglables pour acquérir un signal sur LastiPro. Par quelle formule math sont-ils reliés ?

Nous allons par la suite faiblement échantillonner le signal, et l'apparence temporelle du signal va être fortement dégradée. Mais ce n'est pas cela qui nous intéresse. **On se concentre sur l'apparence fréquentielle** du signal échantillonné, en cherchant la condition sur la fréquence d'échantillonnage qui permet d'obtenir un spectre fidèle au spectre réel.

1.3) En gardant une durée d'acquisition de l'ordre de 0,2s (cf. résolution spectrale, partie suivante), modifier la fréquence d'échantillonnage  $f_e$  de LastiPro et observer les spectres de Fourier des signaux acquis. Valeurs de  $f_e$  :

- $f_e = f$  et  $f_e = 2f$
  - puis 3-4 valeurs intermédiaires (imprimer les spectres à chaque fois)
  - 3 valeurs au-delà de  $2f$
- ❖ Tracer  $f_{mes}$  en fonction de  $f_e$ . En déduire qu'il existe une valeur de  $f_e$  en-deçà de laquelle le spectre de Fourier du signal n'est pas celui attendu. Dans ce cas quel est le lien entre la fréquence mesurée  $f_{mes}$ , la fréquence d'échantillonnage  $f_e$  et la fréquence réelle  $f$  du signal sonore ?
- ❖ Conclure en explicitant le critère à remplir lors de l'acquisition pour que la fréquence du signal acquis (puis numérisé) soit conforme à la fréquence du « vrai » signal. C'est le **critère de Nyquist-Shannon**.

### **Appel professeur n°1**

*Synthétiser à l'oral les observations et expliciter le critère de Shannon.*

## 2. Résolution en fréquence d'un spectre de Fourier : importance de la durée d'acquisition

2.1) A l'aide du second haut-parleur, générer un son de 1010 Hz. On s'aidera du micro et de l'oscilloscope pour effectuer le réglage précis de la fréquence.

Faire fonctionner les deux haut-parleurs simultanément (même amplitude), l'un à la fréquence 1000 Hz et l'autre à 1010 Hz, puis procéder à l'acquisition sur LastiPro. On conservera une durée d'acquisition similaire à celle de la partie 1, en ayant réglé  $N = 20\,000$  pour vérifier le critère de Shannon. On notera que l'écart en fréquence entre les deux sons émis est de 1 %, donc relativement faible.

2.2) Tracer le spectre de Fourier du signal acquis. Est-il conforme à ce qui est attendu ? Refaire l'acquisition avec une durée de 2 ou 3s.

2.3) Déterminer l'ordre de grandeur de la valeur minimale de  $T_a$  permettant d'observer les deux pics.

Vérifier que cette valeur est de l'ordre de quelques  $\frac{1}{\Delta f}$

2.4) Synthétiser les conclusions des deux premières parties du TP : comment procéder pour acquérir numériquement un signal de façon correcte et précise ?

### **Appel professeur n°2**

*Expliquer à l'oral comment vous avez déterminé la résolution en fréquence du spectre numérique.*

*Synthétiser à l'oral comment procéder pour acquérir numériquement un signal.*

2.5) De manière générale, lors du traitement informatisé de signaux numériques, quel est l'inconvénient d'une haute résolution spectrale associée au respect du critère de Shannon ?

### **3. Détermination d'un écart en fréquence par détection synchrone**

On vient de voir qu'il est délicat de mesurer directement sur un spectre l'écart entre deux fréquences très proches. Dans la partie précédente, la mesure de cet écart était imprécise. On présente ici une méthode générale et très efficace pour mesurer un écart en fréquence : *la détection synchrone*. Le principe est de ne plus chercher à observer les deux fréquences, mais directement leur écart.

Cette méthode nécessite d'utiliser un composant non-linéaire : le multiplieur. C'est un composant actif, alimenté par une source continue +15/-15 V (dont la borne « 0 » doit être branchée à la masse du circuit, ici la Terre). Il possède trois bornes : deux en entrée et une en sortie. La tension de sortie est égale au produit des deux tensions injectées en entrée, multiplié par une constante  $k \sim 0,1$  qui évite à la tension de sortie de saturer.

On utilise le même dispositif expérimental qu'avant : deux sons sinusoïdaux sont émis à 1000 et 1010 Hz.

**3.1)** Déterminer théoriquement par le calcul l'expression mathématique *linéarisée* (sous la forme d'une somme donc) de la sortie du multiplieur pour les entrées suivantes :

- l'une sinusoïdale de fréquence  $f_1 = 1000 \text{ Hz}$
- l'autre étant la somme de deux sinusoïdes de fréquences  $f_1 = 1000 \text{ Hz}$  et  $f_2 = 1010 \text{ Hz}$

**3.2)** On considère que  $f_1$  est la fréquence connue et  $f_2$  est la fréquence à déterminer. A partir du calcul précédent, élaborer une stratégie permettant de mesurer l'écart en fréquence entre les deux sons émis par les haut-parleurs, en *utilisant le multiplieur et sans utiliser l'ordinateur*.

***Appel professeur n°3***  
*Expliquer la stratégie à l'oral.*

**3.3)** Réaliser le montage. Concernant la connexion du multiplieur au reste du circuit, tirer parti des inscriptions sur la plaquette soutenant le composant. Pour les autres parties du montage, vous prendrez les valeurs des composants qui vous semblent pertinentes.

**3.4) (Facultatif)** En première année, quel phénomène physique avez-vous utilisé pour la mesure de l'écart de fréquence entre deux signaux sinusoïdaux ? Exploiter ce phénomène (à l'oscilloscope ou sur LatisPro) pour mesurer cette différence. La valeur expérimentale est-elle conforme à la valeur attendue ?

### **4. Application : désaccordage d'un diapason par une masselotte**

Une masselotte est fixée sur une des deux branches d'un diapason. La fréquence propre de vibration du diapason est alors modifiée, et le diapason est désaccordé.

On souhaite tracer la modification de la fréquence du son émis par cette branche en fonction de la position de la masselotte le long de la branche.

Proposer et mettre en œuvre la méthode qui vous semble la plus adéquate pour réaliser cette étude.