

## TD d'électronique n° 4

## Électronique numérique

### 1 — Quantification des mesures

La carte d'acquisition d'un oscilloscope utilisé en TP a une résolution de 8 bits. Le calibre est réglé à l'aide des boutons CH1 et CH2 dont l'effet se traduit par un zoom sur l'écran.

1. Combien de valeurs différentes peuvent être affichées sur l'écran?
2. Déterminer le pas de quantification pour un calibre correspondant à 5 V par carreau, sachant que huit carreaux sont affichés à l'écran. Même question pour un calibre de 200 mV par carreau.
3. En déduire l'intérêt de toujours adapter la fenêtre de visualisation de l'oscilloscope au signal étudié avant d'utiliser une fonctionnalité de mesure ou de traitement mathématique.

### 2 — Enregistrement d'un concert

On souhaite procéder à l'enregistrement d'un concert d'une durée de une heure, dans un format numérique sans compression (WAV par exemple). La fréquence d'échantillonnage choisie est  $f_e = 44\,100$  Hz, et les valeurs sont enregistrées en stéréo sur un format de 16 bits.

1. Quelles sont les fréquences minimales et maximales théoriques enregistrées dans ces conditions? Pourquoi un tel choix de fréquence d'échantillonnage?
2. Quelle taille mémoire doit-on prévoir pour ce stockage?

### 3 — Repliement du spectre

À l'aide d'un oscilloscope numérique, on visualise le spectre d'un signal rectangulaire de fréquence 1 kHz, d'amplitude 5 V, dont la décomposition en série de Fourier est donnée par

$$s(t) = \frac{20}{\pi} \sum_{k=0}^{20} \frac{1}{2k+1} \sin[2\pi \times 1000(2k+1)t].$$

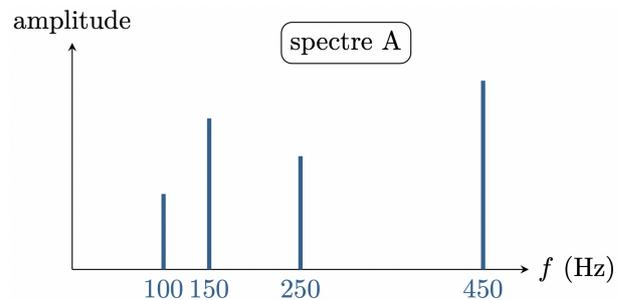
La fréquence d'échantillonnage est fixée à 7,5 kHz.

1. Le critère de Shannon est-il vérifié pour ce signal? Donner les harmoniques pour lesquels ce critère est vérifié.
2. Pour chaque fréquence  $f_k$  ne vérifiant pas le critère, déterminer la fréquence parasite  $f'_k$  qui lui sera substituée (pour  $k \leq 11$ ).
3. Représenter ce spectre.

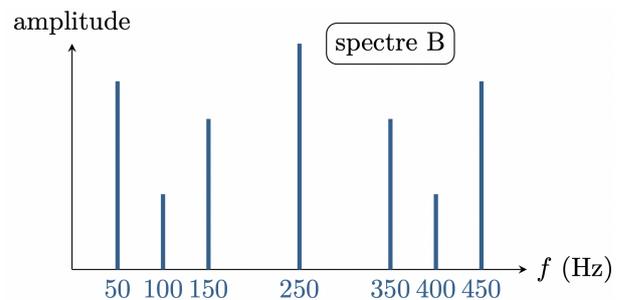
### 4 — Spectres d'un signal échantillonné

On représente deux spectres d'un même signal échantillonné à deux fréquences différentes.

Le spectre A correspond à  $f_e = 1$  kHz :



Le spectre B correspond à  $f_e = 500$  Hz :



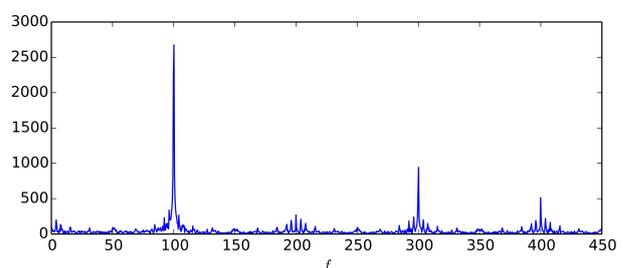
1. Expliquer l'allure du spectre B.
2. On souhaite améliorer le spectre B par l'utilisation d'un filtre. Quel type de filtre faut-il utiliser? Comment le placer? Quelle est sa fréquence de coupure? Discuter de l'efficacité de cette méthode.

### 5 — Critère de Shannon

On rappelle que la décomposition en série de Fourier d'un signal créneau ne contient que les harmoniques impairs du fondamental.

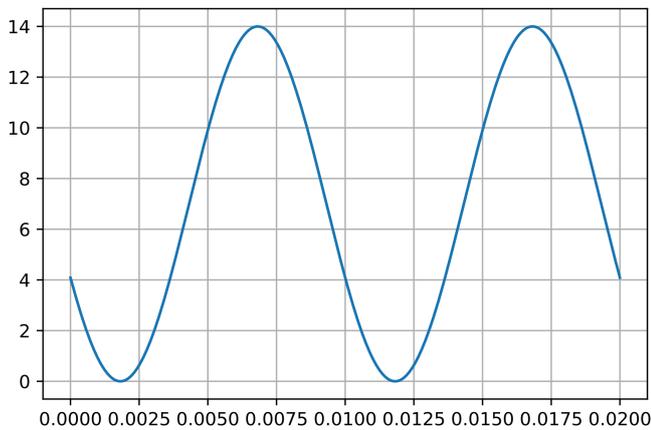
On observe à l'aide d'un oscilloscope numérique le spectre de Fourier d'un signal créneau avec une fréquence d'échantillonnage  $f_e = 900$  Hz.

Interpréter.



## 6 — Numérisation

Convertir le signal suivant en une suite de 0 et de 1 en réalisant un échantillonnage à la fréquence  $f_{\text{éch}} = 500$  Hz, quantifié sur 3 bits.



## 7 — Numérisation d'un son

On cherche à enregistrer un concert sur un CD audio, en format non compressé (format WAV) afin de ne pas perdre en qualité. Le son est capté par un microphone sous forme d'un signal analogique, filtré par un filtre passe-bas, puis échantillonné à une fréquence  $f_e = 44,1$  kHz. La transcription numérique est faite sur 16 bits.

Les fréquences audibles par l'être humain sont comprises entre 20 Hz et 20 kHz.

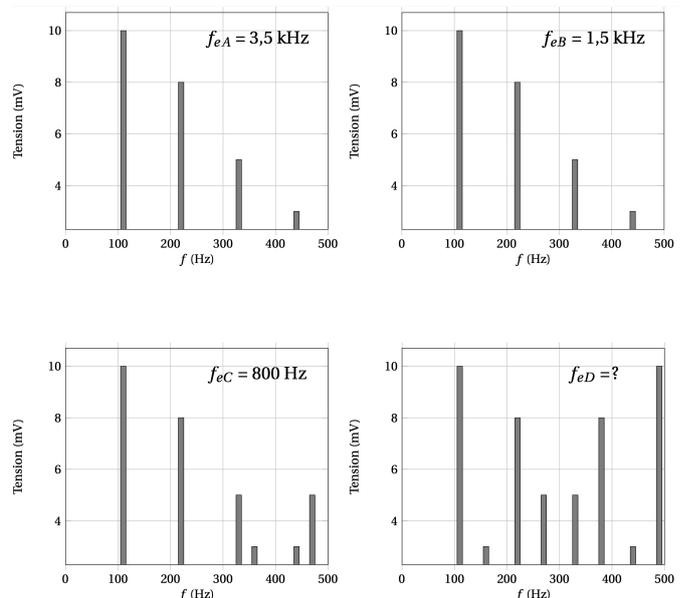
1. Quelle est la fréquence d'échantillonnage minimale à adopter pour enregistrer correctement le spectre audible? Commenter le choix de  $f_f$  adopté pour ce CD.
2. Un ultrason de fréquence 43 kHz est présent dans l'environnement du concert. Est-il perçu par les spectateurs? Que se passe-t-il si on omet de placer un filtre passe-bas avant le CAN : est-il audible sur l'enregistrement?
3. Quelle fréquence de coupure doit-on adopter pour le filtre passe-bas si on veut correctement restituer le son perçu par l'oreille humaine lors du concert? Quel problème apporte ce filtre? Pour le contrer, on utilise un filtre passe-bas d'ordre élevé et un suréchantillonnage ( $f_e$  plus élevée que ce que prévoit le critère de Nyquist-Shannon) : expliquer pourquoi on fait ainsi.
4. On cherche à déterminer la durée maximale d'enregistrement que l'on peut mettre sur un CD du commerce, d'une capacité de 700 Mo, un octet valant 8 bits. Sachant que l'enregistrement est stéréo (2 sons à restituer en même temps) combien de bits sont nécessaires pour un enregistrement d'une seconde? En déduire la durée maximale du concert pour qu'il tienne sur un CD.

5. En utilisant un format de compression MP3, le signal numérisé est traité pour enlever les redondances et supprimer les signaux peu audibles (on perd alors en qualité). Cela permet de diviser les données numériques d'un facteur 4 à 20. Quelle durée d'enregistrement MP3 peut-on alors stocker sur un CD commercial?

## 8 — Échantillonnage d'un son

Un instrument de musique joue un  $la_1$  de fréquence  $f_1 = 110$  Hz. On réalise quatre numérisations (A, B, C et D) en changeant uniquement la fréquence d'échantillonnage  $f_e$ . Les spectres en fréquence obtenus sont représentés ci-après.

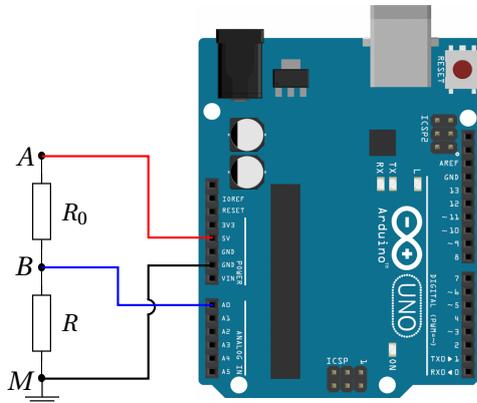
Le dernier graphe montre le résultat de l'échantillonnage lors de la numérisation D. On considère que la numérisation A est très fidèle au son émis par l'instrument.



1. Quelle est la fréquence d'échantillonnage utilisée lors de la numérisation D?
2. Quelle est la fréquence  $f$  de l'harmonique de rang le plus élevé contenu dans le  $la_1$  joué par cet instrument?
3. Comparer la fréquence d'échantillonnage à  $f$  pour chaque numérisation?. Le critère de Shannon est-il vérifié?
4. Est-il nécessaire d'augmenter indéfiniment la fréquence d'échantillonnage pour améliorer la numérisation d'un son?

## 9 — Utiliser un module Arduino en ohmmètre? Yes, we CAN!

Disposant d'une résistance de référence  $R_0$  connue, on désire mesurer une résistance  $R$  inconnue à l'aide d'un module Arduino. On réalise le montage suivant :



Le point  $A$  est relié au potentiel de référence  $V_{\text{réf}} = 5 \text{ V}$ .  
 Le point  $M$  est relié à la masse.  
 Le point  $B$  est relié à l'entrée  $A0$  du module Arduino. Cette entrée est reliée à un convertisseur analogique-numérique (CAN) travaillant avec une précision de 10 bits. On considère l'impédance d'entrée du module comme infinie.

1. Quel est le nombre  $N$  de valeurs que peut retourner le CAN?

Le CAN retourne la tension  $V_{A0} = \frac{x}{N} V_{\text{réf}}$ , où  $x$  est un entier compris entre 0 et  $N - 1$  ( $0 \leq x \leq N - 1$ ).

2. En reliant  $V_{A0}$  à  $V_{\text{réf}}$ ,  $R$  et  $R_0$ , exprimer la résistance  $R$  en fonction de  $R_0$ ,  $N$  et  $x$ .

Du fait de la numérisation et des défauts du CAN, l'incertitude sur l'entier  $x$  est  $\Delta x = 2$ .

On rappelle que l'incertitude correspondante sur la valeur de  $R$  est donnée par  $\Delta R = \left| \frac{\partial R}{\partial x} \right| \Delta x$ .

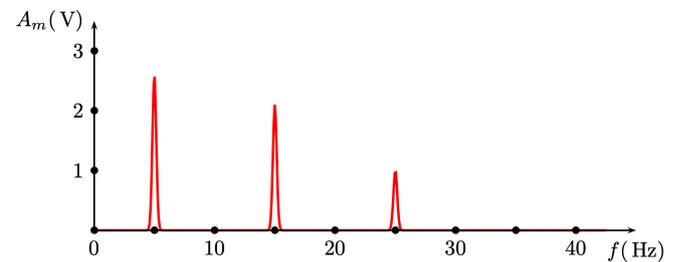
3. Que vaut l'incertitude relative  $\frac{\Delta R}{R}$ ?

4. Pour quelle valeur de  $x$  l'incertitude relative sur  $R$  est-elle minimale? On calculera la valeur minimum de l'incertitude relative. (*variante moins guidée : comment choisir la résistance de référence  $R_0$  pour rendre minimum l'incertitude relative sur  $R$* ).

Quel est l'influence d'une incertitude sur la tension de référence  $V_{\text{réf}}$ ? Et d'une incertitude sur la résistance de référence  $R_0$ ?

## 10 — Effet d'un parasitage

Un capteur de vibration transforme les vibrations mécaniques d'une charpente métallique en signal électrique. Ce signal est analysé par la fonction FFT d'un oscilloscope numérique qui donne le spectre suivant.



1. Pour numériser ce signal, on choisit une fréquence d'échantillonnage  $f_e = 80 \text{ Hz}$ . Justifier ce choix.

2. Dresser le spectre du signal numérisé dans l'intervalle  $[0, 240 \text{ Hz}]$ .

3. Le signal subit un parasitage par le signal du réseau électrique à la fréquence de 50 Hz. Quelle modification du spectre cela provoque-t-il? Pourquoi est-ce problématique?

4. Quel type de filtrage doit-on faire subir au signal électrique pour éviter cet inconvénient? Proposer un montage simple réalisant ce filtrage en précisant les caractéristiques numériques des composants.