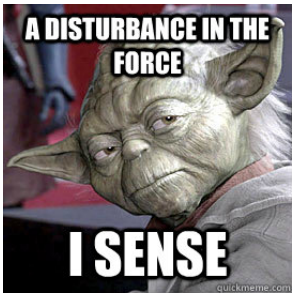
MP24 – Signal et bruit



9 février 2017

Thomas Vernaudon & Guillaume Mugnier

Le titre du montage est nouveau de cette année ; il s'intitulait auparavant "Acquisition, analyse et traitement des signaux". Ce montage a été élaboré en supposant que les attentes sont restées les mêmes, ce qui est tout à fait discutable.

Commentaires du jury

- **2013 à 2016** : Les notions d'erreur de quantification et de rapport signal/bruit ne sont pas bien dégagées. Pour la numérisation d'un signal, il faut mettre en évidence le rôle de l'échantillonnage et ses conséquences.
- **2011 et 2012** : Les caractéristiques de la numérisation d'un signal ont été mieux illustrées cette année. L'analyse des signaux ne se limite pas à une FFT sur un oscilloscope. L'aspect traitement du signal est trop souvent absent notamment le rapport signal/bruit.
- **2010** : L'étude exhaustive d'un circuit RLC série n'a pas sa place dans ce montage, même si ce circuit peut servir à illustrer la réduction du bruit sur un signal de fréquence donnée. :

Bibliographie

✍ *Expériences d'électronique*, **Duffait** ⟶ On ne le présente plus.
✍ *Analyse d'un signal*, **Asch** ⟶ Très complet sur les CAN et le bruit de quantification.
✍ *Electronique expérimentale*, **Krob** ⟶ Pour des compléments, mais je ne le trouve pas très clair.

Table des matières

1 Acquisition de signaux **2**
1.1 Mesure d'une tension continue : CAN simple rampe 2
1.2 Mesure d'une tension variable : échantillonneur-bloqueur 4

2 Traitement informatique de signaux **4**
2.1 Propriétés de la carte d'acquisition 4
2.2 Algorithme FFT 5

3 Exemple de stratégie d'acquisition **6**

Introduction

Un problème qui se pose de manière constante en physique expérimentale est celui de l'acquisition d'une grandeur physique d'intérêt. Pour pouvoir observer l'évolution de cette grandeur, celle-ci doit être acquise à l'aide d'un ensemble d'outils qui constituent la *chaîne d'acquisition*.

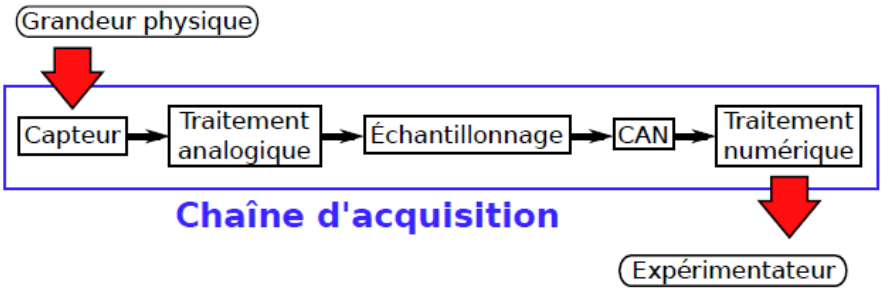


FIGURE 1 – Chaîne d'acquisition

On donne les définitions suivantes :

Signal : Variation temporelle d'une grandeur physique.
Capteur : Dispositif qui va extraire une partie la plus petite possible de l'énergie de la grandeur d'intérêt pour émettre un signal sous une autre forme physique (souvent électrique) transportant une information aussi proche que possible de celle du signal d'origine.
Traitement du signal : Ensemble des méthodes mathématiques permettant d'extraire ou modifier l'information d'un signal.
Bruit : Altération (externe ou intrinsèque) qui s'ajoute au signal sans lui être corrélé.
Rapport signal sur bruit : Rapport des puissances du signal et du bruit de fond, exprimé en dB.

Manip introductive

Parler dans un micro relié à un oscillo pour illustrer les notions ci-dessus. Le signal est la voix, le capteur est le micro, le bruit est l'ensemble des sons extérieurs captés par le micro.

On comprend donc que l'amélioration du rapport signal sur bruit soit un enjeu d'intérêt dans tous les domaines de la physique. On va ici s'intéresser à des méthodes d'acquisition et de traitement informatique des signaux dans une optique de minimisation du bruit qu'elles induisent.

1 Acquisition de signaux

1.1 Mesure d'une tension continue : CAN simple rampe

Un convertisseur analogique-numérique (CAN) est un montage dont le rôle est de transformer une information électrique (analogique) en information chiffrée sur un certain nombre de bits ; la lecture de l'information numérique permet alors une mesure du signal électrique d'origine. Le CAN simple rampe étudié ici est adapté à la mesure de tensions continues. Il se compose des "blocs" suivants :

- Un montage intégrateur, intégrant une tension de référence E_{ref} avec une constante de temps $\tau = \frac{1}{RC}$. La tension en entrée du bloc suivant est alors, en fonction du temps :

$$V(t) = \frac{E_{ref}}{RC} t$$

- Un montage comparateur, comparant la tension précédente à celle que l'on cherche à mesurer U. La tension en sortie de ce bloc passe donc d'une valeur positive à une valeur négative lorsque la tension intégrée atteint celle que l'on cherche à mesurer.

- Une diode suivie d'un relais ; l'interrupteur du relais s'ouvre donc au moment où la tension intégrée atteint celle que l'on cherche à mesurer.
- Un chronomètre dont le départ est commandé par le même interrupteur double que le début de l'intégration, et dont l'arrêt est commandé par l'ouverture du relais.

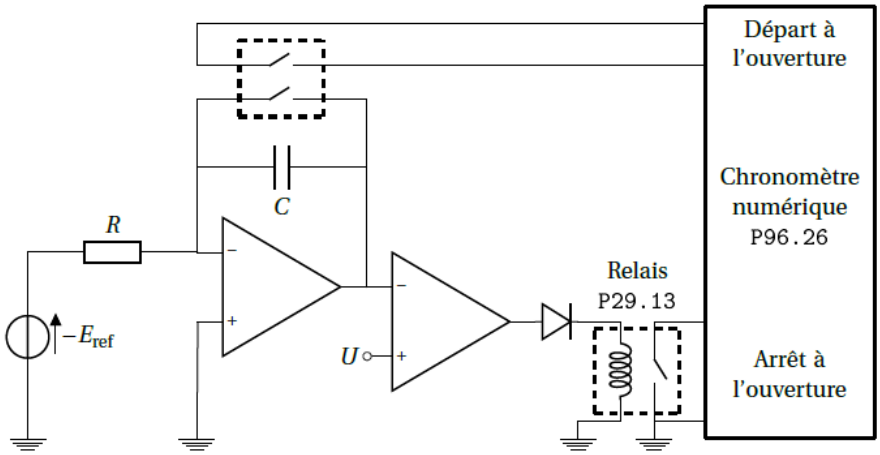


FIGURE 2 – CAN simple rampe : schéma du montage

Ainsi, ce montage permet, à l'aide de la lecture du temps affiché par le chronomètre à son arrêt et de la formule ci-dessus, de connaître la tension à mesurer U. On se propose de confronter la précision de cette mesure à celle d'un multimètre.

Caractéristique du simple rampe

Matos spécifique : Chronomètre numérique, relais, interrupteur double, 4 piles 1.5 V sur supports à bornes.

Mesurer la tension d'une pile à l'aide du simple rampe, puis au multimètre. Noter V (tension au multimètre) et t (mesure du chrono) sur un tableur. Réitérer avec deux piles en séries. On aura préalablement fait la même chose pour 3 et 4 piles. Faire une régression linéaire et commenter la pente par rapport à la valeur théorique $\frac{E_{ref}}{RC}$.

On remarque que la mesure du temps par le chronomètre est nécessairement discrète (ici, avec une précision de 1 ms). Cette discrétisation est la cause d'un *bruit de quantification*. La tension à laquelle on accède est celle voulue à laquelle est superposée une tension de bruit :

$$V_{mes} = V + V_{bq}$$

La valeur moyenne quadratique de ce bruit de quantification est liée au pas de mesure ΔV imposé par la discrétisation en temps, dans notre cas par la formule :

$$\overline{V_{bq}^2} = \frac{\Delta V^2}{3}$$

On peut donc ici donner la valeur numérique de la moyenne quadratique de notre bruit de quantification.

Pour finir, mentionnons les défauts du convertisseur simple rampe, qui font qu'on lui préfère généralement un convertisseur double rampe (intégrant également la tension à mesurer) :

- La mesure du temps d'intégration est dépendante de toute variation de la constante de temps RC, en particulier avec la température.
- La mesure est également sensible à tout bruit sur la tension à mesurer U.

1.2 Mesure d'une tension variable : échantillonneur-bloqueur

Pour mesurer une tension variable, on se ramène en pratique au cas précédent : le montage échantillonneur-bloqueur a pour rôle de prélever et maintenir constante la valeur de la tension variable le temps que le convertisseur analogique-numérique en donne la mesure. On va s'intéresser ici à la fidélité du signal échantillonné par rapport à celui d'origine.

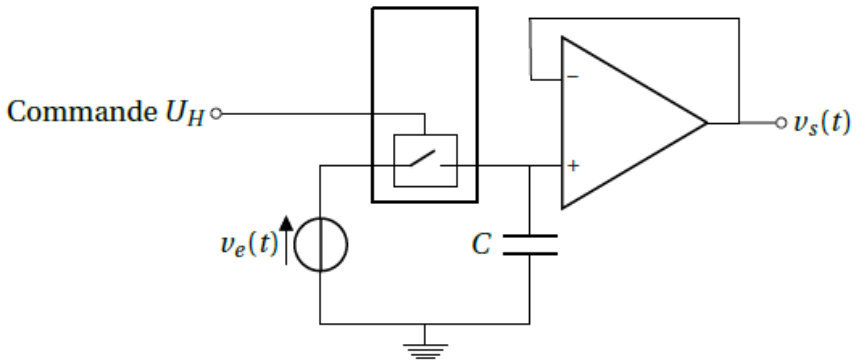


FIGURE 3 – Principe de l'échantillonneur-bloqueur

Échantillonneur-bloqueur

Matos spécifique : Boitier "principe de l'échantillonneur-bloqueur"

Envoyer en entrée un sinus d'amplitude 1V, de fréquence 100 Hz. Relever la tension en sortie du montage à l'oscillo, et faire varier la fréquence d'échantillonnage :

- Pour $f_e = 100$ Hz, soit la fréquence du signal, on observe des palliers constants. On ne retrouve pas le signal.
- Pour $f_e = 200$ Hz, le double de la fréquence du signal, on observe un quasi-créneau de la bonne fréquence.
- Pour $f_e = 1$ KHz, on a un sinus un peu cabossé ressemblant au signal d'origine
- Enfin, pour f_e de l'ordre de 10 KHz, on ne distingue plus de différence entre les deux signaux.

On vient de mettre en évidence le critère de Shannon : on peut retrouver une fréquence du signal d'origine dans le signal échantillonné si la fréquence d'échantillonnage lui est au moins deux fois supérieure. Comme précédemment, un signal échantillonné avec peu de points peut s'interprêter comme la superposition di signal d'origine et d'un bruit ; pour minimiser ce bruit, il convient donc de choisir une fréquence d'échantillonnage bien supérieure à la fréquence maximale du signal à échantillonner.

Une fois le signal acquis, de la manière la plus propre possible, on cherche à en retirer l'information qu'il contient. À l'ère glorieuse de l'informatique, cela se fait généralement par ordinateur à l'aide de logiciels dédiés tels que Latis Pro^{TM}.

2 Traitement informatique de signaux

2.1 Propriétés de la carte d'acquisition

La conversion analogique-numérique sur Latis-Pro est faite par la carte d'acquisition. Celle-ci impose une discrétisation de la tension mesurée en fonction du calibre choisi et du nombre de bits dont elle dispose. On a la relation :

$$\Delta V = \frac{C}{2^n}$$

où ΔV est le pas de tension, C le calibre choisi et n le nombre de bits de la carte.

Discrétisation en tension

Envoyer avec SA1 un triangle d'amplitude 1V à 10 Hz, qu'on acquiert avec EA0 à 10 μs 2000 points. Zoomer pour observer la discrétisation en tension et sa variation avec le calibre. On peut aussi noter la discrétisation en temps, liée au temps d'échantillonage. (De la physique de haut niveau dans ce montage, n'est-ce pas ?)

On peut également remonter au nombre de bits de la carte (qui figure aussi dans sa notice, donc ne pas en faire un grand mystère).

Nombre de bits de la carte d'acquisition

À l'aide de la formule ci-dessus, calculer n pour un calibre particulier, avec inceritudes et tout le tralala, et reporter sur un mini-tableur comprenant les mêmes calculs faits préalablement pour les autres calibres. Il s'agit, car c'est trop rare dans ce montage, de montrer qu'on maîtrise ce genre de choses sur un exemple qui ne le mérite pas vraiment.

On peut montrer qu'en dérivant la courbe, le résultat est extrêmement bruité. Cela est dû précisément à la calibration et aux sauts qu'elle induit. Si on baisse le temps d'échantillonnage à 1 ms, le bruit sur la dérivée est réduit. Pour le réduire encore, il faut effectuer un lissage de la courbe, et même ainsi la dérivée est encore loin d'être une constante. Cela est problématique, car bon nombre de grandeurs physiques, comme la vitesse, sont accessibles principalement comme dérivées temporelles de grandeurs que l'on peut acquérir. Pour réduire le bruit engendré par la dérivation d'une grandeur quantifiée, il convient donc d'échantillonner avec parcimonie et de lisser le signal, éventuellement plusieurs fois, avant de le dériver.

2.2 Algorithme FFT

L'information d'un signal est contenue dans son spectre, c'est à dire l'amplitude des différentes composantes fréquentielles. L'accès à ce spectre se fait, mathématiquement à l'aide de la transformée de Fourier. Informatiquement, on ne dispose comme on l'a vu que d'un ensemble de points pour représenter le signal, et non d'une fonction continue intégrable. L'algorithme réalisant la transformée de Fourier (FFT, pour Fast Fourier Transform) le fait donc de manière approchée, avec des erreurs dûes à l'échantillonage qu'on se propose d'évaluer ici.

On a déjà vu plus haut le critère de Shannon : on ne peut retrouver une fréquence dans un signal que si l'échantillonage se fait au moins au double de cette fréquence. Illustrons le critère de Shannon sur la FFT :

Critère de Shannon et FFT

Pour un sinus à 1 V 1200 Hz, acquérir à $T_e = 100$ μs / $f_e = 10$ KHz (tout se passe bien, on retrouve le pic voulu esseulé), puis à $T_e = 1$ ms / $f_e = 1$ KHz (l'algorithme détecte une fréquence inconnue car on ne respecte pas le critère de Shannon). Revenir à $T_e = 100$ μs et générer un créneau : on constate un repliement du spectre à partir de la 3e harmonique, dont la fréquence ne respecte pas le critère de Shannon.

Par ailleurs, les signaux auxquels on applique la FFT sont donnés sur un intervalle de temps fini. S'il s'agit d'un signal périodique, l'algorithme va alors l'étendre en le périodisant. Cette périodisation peut être une source d'erreurs et de bruit. Le paramétrage par défaut du logiciel, qui est de choisir automatiquement la plage à périodiser, marche généralement très bien, mais on peut choisir manuellement la plage temporelle sur laquelle faire la FFT.

Problèmes de périodisation

Envoyer un sinus à 100 Hz avec un temps d'échantillonnage de 100 μs. Effectuer la FFT sur une partie quelconque du signal : on voit bien la fréquence principale mais il y a beaucoup de bruit. L'effectuer à nouveau sur une plage correspondant à un nombre entier de périodes : le spectre est beaucoup plus propre.

Enfin, si le nombre total de points augmente (donc le temps total d'acquisition), on remarque que la résolution en

fréquence est améliorée. Dans le cas où l'on acquiert un régime transitoire, donc un signal non-périodique, il convient donc de prendre comme plage temporelle une partie la plus grande possible du régime transitoire.

En résumé, pour induire le moins de bruit posssible lors de l'acquisition et du traitement informatiques d'un signal, il faut prendre les précautions suivantes :

- Prendre un calibre adapté pour la carte d'acquisition
- Choisir T_e suffisamment petit pour respecter le critère de Shannon, mais pas trop pour ne pas causer des problèmes lors d'éventuelles dérivations
- Lisser la courbe avant de la dériver
- Réaliser la FFT sur un nombre entier de périodes pour un signal périodique, et sur une plage la plus grande possible pour un régime transitoire.

Du fait des limitations qu'on vient de voir, il est parfois difficile d'acquérir proprement notre signal d'intérêt avec le matériel dont on dispose ; on s'arrange alors pour rendre cette acquisition possible en modifiant préalablement le signal, ce qui constitue une stratégie d'acquisition.

3 Exemple de stratégie d'acquisition

Mise en contexte (dispensable, mais égaye un peu cette ambiance de traitement du signal) : Un élève musicien à ses heures et électronicien à celles des TP a monté un circuit pour acquérir des signaux et les visionner à l'oscilloscope, et veut s'en servir pour vérifier la fréquence de son diapason (vers 440 Hz en théorie). Mais au vu des composants de son montage, celui-ci échantillonne à 500 Hz et ne respecte donc pas le critère de Shannon avec le diapason.

Pour des raisons d'encombrement, le montage en question sera simulé par la carte d'acquisition dont on fixe la fréquence d'échantillonnage à 500 Hz.

La *stratégie d'acquisition* va consister à multiplier le signal du diapason par un autre, dit "de référence", de fréquence proche (400 Hz) pour obtenir deux fréquences, la somme et la différences de celles du diapason et celle de référence. La somme est en dehors de la gamme que l'on peut acquérir, mais la différence est dedans : on filtre donc le signal multiplié pour ne garder que les basses fréquences, et on observe bien un pic unique vers 40 Hz, confirmant la fréquence du diapason.

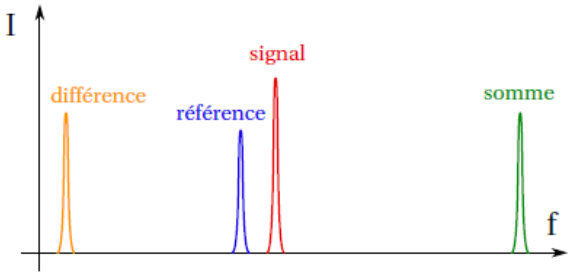


FIGURE 4 – Spectre d'un produit de signaux

Acquisition de la fréquence d'un diapason

Matos spécifique : micro-cravate, multiplieur analogique, filtre MF10 passe-bas, diapason.

→ On commence par présenter les trois blocs du montage : l'ampli inverseur, le multiplieur et le filtre passe-bas.

→ On montre le signal "brut" du son du diapason amplifié par l'inverseur : comme on est en sous-Shannon, les fréquences détectées sont fausses.

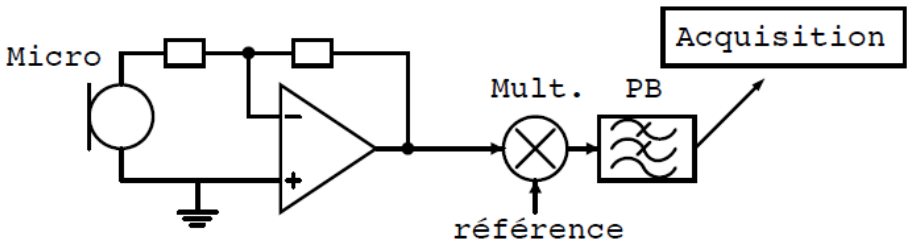


FIGURE 5 – Schéma du montage

→ On branche le multiplieur (signal de référence à 10 V, 400 Hz) et on constate que la FFT du signal échantilloné est toujours moche.

→ On rajoute le passe-bas. Celui-ci rajoute une composante continue, je n'ai pas compris pourquoi, mais on doit observer cette fois le pic esseulé vers 40 Hz. Selon si le frapper de diapason est propre ou non, on peut avoir des petits pics parasites autour.

Il peut être judicieux de déclencher l'acquisition au passage d'un seuil montant (10 mV pour les deux premières, 250 mV pour la dernière à cause de la composante continue) puisqu'on a les mains prises lorsqu'on veut que l'acquisition se fasse.

Ainsi, à l'aide d'une série d'opérations sur le signal, on a pu accéder à une fréquence théoriquement hors de notre portée.

Conclusion

À travers ce montage, on a pu illustrer les contraintes liées à l'acquisition et au traitement informatique d'un signal dans le but de réduire au maximum le bruit, d'où l'intérêt de mettre en place des stratégies d'acquisition. Cette minimisation du bruit, cette recherche d'un signal le plus clair possible, se révélera être un élément clé notamment de tous les processus de télécommunication, qui sont l'objet d'un autre montage.

Notes, questions et tomates pourries