

MP24 – SIGNAL ET BRUIT

17 avril 2020

Aurélien Goerlinger & Yohann Faure

Commentaires du jury

- 2017 : La mesure du bruit thermique d'une résistance est une très jolie expérience à la condition de comprendre les différents étages d'amplification nécessaires dans ces expériences. L'utilisation de boîtes noires non justifiée a été sanctionnée par le jury.
Jusqu'en 2016, le titre était Acquisition, analyse et traitement des signaux
- 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. 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.
- 2008 : La partie « acquisition » est souvent omise.
- 2004 : Les candidats ont très souvent recours à la « périodisation » du signal préalablement à l'analyse de Fourier par certains logiciels. Cette démarche est pour le moins étrange : périodiser suppose connue la période du signal et on peut dès lors s'interroger sur la pertinence de l'analyse de Fourier subséquente. Les candidats perdent du coup de vue le rôle de la durée totale d'enregistrement sur la résolution spectrale associée à la transformée de Fourier.
Jusqu'en 1997, le titre était : Quelques exemples d'analyse et de traitement de signaux comportant éventuellement du bruit.
- 1997 : La détection synchrone compte parmi les méthodes de traitement du signal et son principe peut être illustré dans ce montage qui doit par ailleurs souligner l'importance des méthodes numériques actuelles.
- 1996 : Le montage sur l'acquisition et le traitement de données expérimentales a souvent été présenté au moyen de maquettes ou de logiciels qui peuvent se révéler décevants si le candidat fait de leur utilisation le but du montage au lieu de les considérer comme un outil destiné à une meilleure présentation des phénomènes. Il faut également mettre en garde les utilisateurs sur le danger présenté par les logiciels dont ils ne dominent pas la complexité.

Bibliographie

- ↗ *Dictionnaire de physique*, **Taillet, Villain, Febvre** → Pour l'intro, Voir "signal", "bruit" et "rapport signal sur bruit"
- ↗ *Acquisition de données, du capteur à l'ordinateur*, **Asch** → Chp 12 le début sur le bruit
- ↗ *Expériences d'électronique*, **Duffait, Lievre** → Additionneur, CAN, chp III Intéressant et concis
- ↗ *Acquisition de données*, **Asch** → CAN,dense
- ↗ *Electronique*, **Pérez** → CAN plus didactique
- ↗ *Physique expérimentale*, **FLTCD** → Détection synchrone

Table des matières

1	Mesure du RSB sur un exemple simple	3
1.1	Calcul du RSB	3
1.2	Mesure du RSB	4
1.3	Amélioration par filtrage	4

2	Influence du bruit sur la mesure (CAN)	5
2.1	Théorie du CAN	5
2.1.1	Principe	5
2.1.2	Le CAN simple-rampe	5
2.2	Calibrage (à faire en préparation)	6
2.3	Sensibilité au bruit	6
3	Modulation et détection synchrone	8
3.1	Principe de la détection synchrone (tampon)	8
3.2	Illustration concrète	8

Introduction

Si on prend un signal physique s , on peut le décomposer en deux parties.

$$\begin{cases} s_{\text{info}} \text{ est la partie utile, qui transporte l'information qui nous intéresse} \\ b \text{ est le bruit, sans intérêt (ça se discute)} \end{cases}$$

Une analogie simple serait celle d'une conversation dans une pièce bruyante, tout ce que l'on cherche à entendre c'est la voix de l'autre. La voix représente l'information et le bruit... le bruit! Mais il peut aussi être intéressant d'entendre le four qui sonne au fond de la pièce, ainsi la définition de *bruit* dépend de la situation et de l'objectif fixé!

Problème : Comment peut-on quantifier cette notion ?

Une réponse est l'approche énergétique. On compare la quantité d'énergie présente dans s_{info} , que l'on nomme E_{info} , et celle de b , E_b . Cela nous donne une définition du **rapport signal sur bruit** :

$$\text{RSB} = 10 \log \frac{E_{\text{info}}}{E_b} \quad \text{en déciBel, dB} \quad (1)$$

Problématique : Comment le mesurer ? Et quelle est l'influence du bruit sur un signal ?

1 Mesure du RSB sur un exemple simple

1.1 Calcul du RSB

Dans ce montage, on va toujours supposer que le bruit est un bruit blanc idéal, sa fonction d'autocorrélation est un $\delta \Rightarrow$ sa valeur entre deux instants successifs est totalement décorélée \Rightarrow sa TF est une constante!

On rappelle que la densité spectrale de puissance est

$$\mathcal{P}(\nu) = |\mathcal{TF}[s](\nu)|^2 \quad (2)$$

On rappelle également que l'énergie totale s'exprime en fonction de la densité spectrale d'énergie via :

$$E_s = \int_0^{+\infty} |\mathcal{TF}[s](\nu)|^2 d\nu \quad (3)$$

On peut alors définir l'énergie du signal contenue entre 0 et f :

$$E_s(f) = \int_0^f |\mathcal{TF}[s](\nu)|^2 d\nu$$

Hypothèse de l'exemple simple : On a un bruit blanc par dessus un signal qui, spectralement, est une porte.

Comme on a supposé que le bruit est spectralement constant, tracer le spectre du signal donnera la superposition d'une constante et d'un carré :

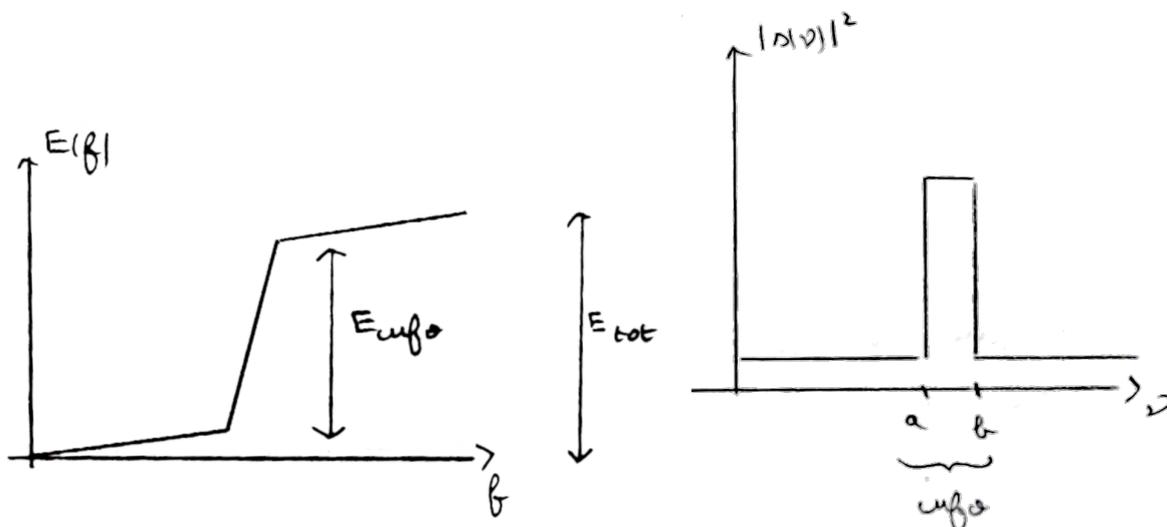


FIGURE 1 – Densité spectrale de puissance du signal test.

On a grâce à ce tracer directement

$$\text{RSB} = 10 \log \frac{E_{\text{info}}}{E_b} = 10 \log \frac{E_{\text{info}}}{E(+\infty) - E_{\text{info}}} \quad (4)$$

Pour toute la section 1 on veillera avec Latis Pro à respecter le critère de Shannon pour le signal informatif. On prendra la TF en cochant la case "puissance" et on intégrera pour avoir $E(f)$.

1.2 Mesure du RSB

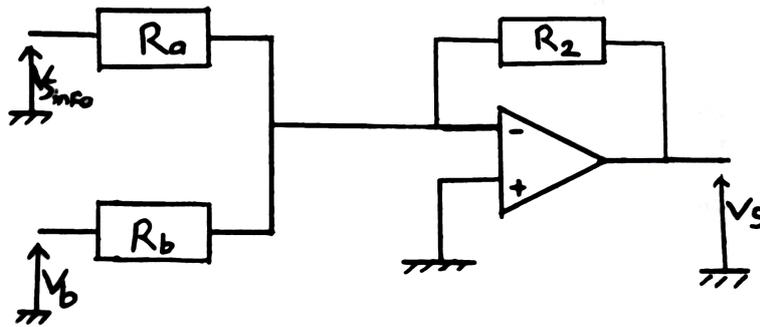


FIGURE 2 – Montage additionneur.

On prend $R_A = R_B = R_2 = 1000\Omega$

remarque : on prend les trois résistances égales pour ne pas favoriser un des côtés et pour ne pas amplifier. On réalise cependant une inversion du signal en faisant cela.

Visionner le spectre en puissance

On utilise un additionneur afin de sommer un signal de bruit de grande amplitude généré au GBF et un signal informatif de 1V 1000Hz.

On trace alors le signal temporel en prenant 100ms pour le temps d'acquisition et $25\mu\text{s}$ pour le temps d'échantillonnage.

Tout d'abord on remarque que le signal temporel est bruité, on ne voit rien. En traçant la TF **sans lissage** on voit un pic qui se distingue et sort du reste. (traitement, calcul spécifiques, Fourier, cocher "en puissance").

Mesure du RSB

On intègre le spectre en puissance, et on obtient $E(f)$, avec un saut autour de 1kHz. En faisant le rapport entre la hauteur du saut et la hauteur totale du spectre, on obtient le RSB!

Il faut se donner une fréquence d'arrêt, parce qu'en pratique on ne fait pas une intégrale à l'infini.

On peut alors calculer le RSB, on peut éventuellement faire des incertitudes mais ne pas pousser l'explication, car cela n'a pas vraiment de sens : pas de valeur tabulée, signal totalement fictif. Maintenant que l'on sait comment le calculer, on va essayer de l'améliorer.

1.3 Amélioration par filtrage

On a vu lorsque l'on a fait la transformée de Fourier que le bruit était réparti sur toutes les plages de fréquences, et visuellement, on a l'impression que le bruit est de fréquence élevée. On peut donc penser à filtrer le signal pour éliminer les hautes fréquences.

RSB d'un signal filtré

⚡ ⊖

On ajoute un filtre passe-bas (si on a eu le temps, on a fait la méthode de la réponse indicielle pour avoir son diagramme de Bode en amplitude), faire un filtre RC d'ordre 1 de fréquence de coupure à environ 10 kHz (en fait j'avais pris $R = 3.9\text{k}\Omega$ et $C = 470\text{nF}$) pour être bien certain.e de ne pas enlever de signal informatif. On récupère le signal filtré, on TF, on intègre, on calcule le RSB.

Si tout c'est bien passé, on a un RSB plus grand, ce qui est signe que l'on améliorer notre signal, et on peut le constater à l'acquisition.

Il reste encore du bruit, on aurait pu faire un filtre passe-bande plus piqué autour de notre signal informatif pour encore réduire le bruit mais cela nécessite de connaître a priori ou après une première acquisition la fréquence du signal informatif.
 Pour pouvoir faire l'acquisition, faire la transformée de Fourier, éventuellement filtrer numériquement, il a fallu acquérir la tension bruitée. Pour cela on utilise un convertisseur analogique numérique. On va maintenant voir l'influence du bruit sur son fonctionnement.

2 Influence du bruit sur la mesure (CAN)

Lorsqu'on passe d'un signal analogique à un signal numérique, on doit l'échantillonner. Cela revient à le quantifier, et cette quantification peut déformer le signal numérique par rapport au signal analogique. Par exemple, le signal envoyé par un micro sera déformé à la fois par le bruit et par son échantillonnage.

2.1 Théorie du CAN

⚡ Duffait p268-273, Asch p261, Pérez p604

<http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/electro/canrampe.html>

2.1.1 Principe

Le CAN a pour principe de transformer une tension analogique et continue en un nombre binaire de n bits de valeur comprise entre 0 et $2^n - 1$. Lorsque le signal est quantifié, on subdivise l'amplitude maximale U du signal en $N = 2^n$ intervalles réguliers, ce qui permet de définir le **pas de conversion** $p = \frac{U}{N}$. Le signal numérique ne prend donc que des valeurs multiples de ce pas.

Cette quantification induit une erreur puisque la tension analogique n'est pas forcément un multiple du pas de conversion. Tout se passe comme si une tension de bruit s'était rajoutée à la tension analogique pour obtenir un multiple du pas de conversion.

Le CAN est composé de 2 parties :

- l'échantillonneur-bloqueur : en aval, il convertit la tension analogique en temps
- le compteur-bloqueur : en amont, il convertit le temps en un nombre de paliers

2.1.2 Le CAN simple-rampe

Il consiste à intégrer une tension de référence E_{ref} **continue** qu'il va ensuite comparer à une valeur de tension à mesurer. Un chronomètre est lancé au début de l'intégration puis arrêté à la bascule du comparateur. À l'instant initial, la tension de sortie est nulle. La tension en sortie de l'intégrateur vaut donc

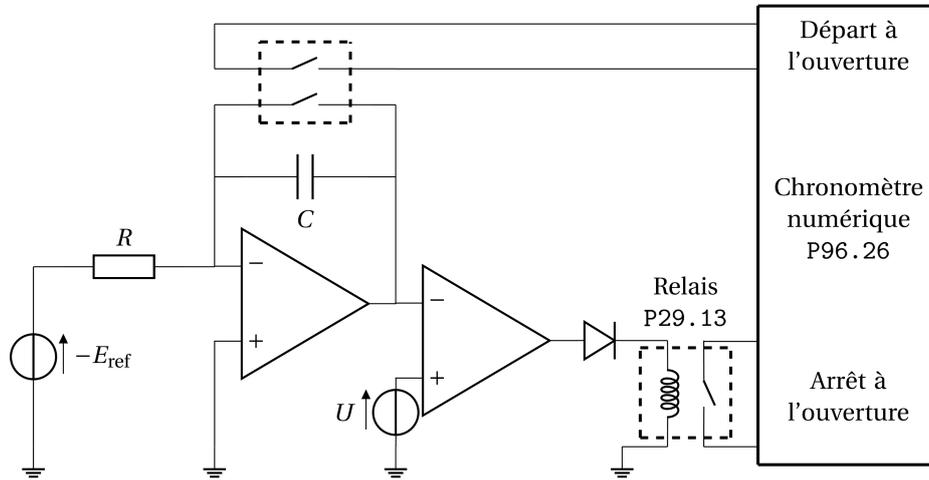
$$V(t) = \frac{E_{\text{ref}}}{RC}t$$

Le comparateur repère le moment où $V(T) = U$ avec U la tension à mesurer. Le temps d'intégration vaut alors

$$T = RC \frac{U}{E_{\text{ref}}} \quad (5)$$

Remarques

Le CAN simple-rampe est unipolaire, *i.e.* il ne convertit que des signaux d'entrée positifs. De plus, les temps d'acquisition sont d'une dizaine de seconde donc les fréquences d'échantillonnage des signaux doivent être faibles.



Dans ce montage, l'intégrateur est le premier AO avec la résistance et la capacité tandis que le comparateur est le second AO.

2.2 Calibrage (à faire en préparation)



Calibrage

Réaliser le montage si-dessus. On utilise en parallèle un double-interrupteur mécanique P30.24 : le premier débute la rampe de tension et le second déclenche le chronomètre. Le chronomètre s'arrête via l'ouverture d'un relais.

Choisir une constante RC de l'ordre de la seconde, par exemple avec $R = 4.7 \text{ M}\Omega$ et $C = 1 \mu\text{F}$.

Prendre une tension de référence E_{ref} autour de 1 V. **Attention au câblage** : la tension en amont de R doit être $-E_{\text{ref}}$. Pour cela, on utilise un module Hameg ou un GBF (car ce sont des générateurs isolés).

Envoyer avec un autre GBF une tension à mesurer $U = 1 \text{ V}$.

Observer à l'oscilloscope :

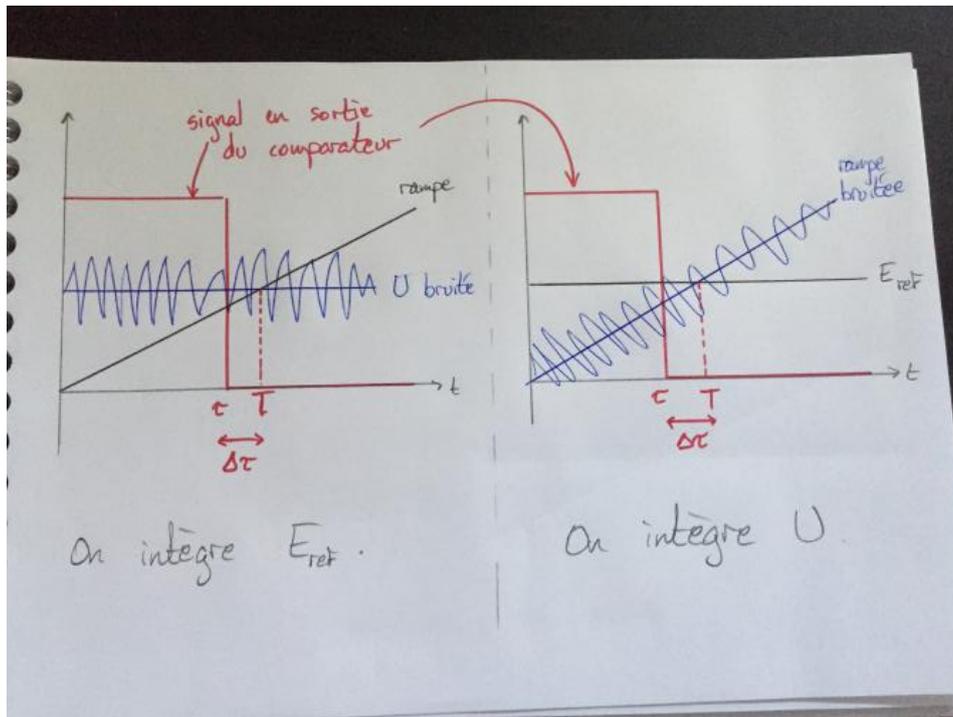
- la rampe de tension en sortie de l'intégrateur
- la tension à mesurer U
- le signal en sortie du comparateur

On vérifie à l'oscilloscope que le chronomètre part en même temps que la rampe et qu'il s'arrête quand la rampe atteint U . Comparer le temps T qu'il affiche au temps T mesuré par l'oscilloscope avec les curseurs.

Répéter l'opération pour plusieurs tensions U . Tracer $T = f(U)$ est vérifier qu'on a une droite.

2.3 Sensibilité au bruit

On veut maintenant mesurer une tension inconnue mais constante et bruitée. On veut comparer deux cas : soit on intègre E_{ref} et on compare la rampe au signal bruité U (graphe de gauche), soit on intègre U et on compare la rampe bruitée à E_{ref} (graphe de droite). Dans les deux cas, le bruit fait que la comparateur stoppe le chronomètre prématurément à un temps $\tau < T$.



Cas 1 : on intègre la référence, la rampe n'est donc pas bruitée

On intègre E_{ref}

⚡

⊖

On utilise $E_{ref} = 1 \text{ V}$ et $U = 1 \text{ V} + b$ avec du bruit b (cf section sur l'additionneur).
 Mesurer T à l'oscilloscope pour différentes valeurs de b entre 0 et 8 V (5 mesures en préparation, 2 en live).
 On obtient la moyenne U_T ainsi qu'un écart-type en guise de barre d'erreur.

Plus b augmente, plus la valeur moyenne U_T s'éloigne de la valeur attendue (1 V) qui ne rentre même plus dans les barres d'erreur pour $b = 8 \text{ V}$. Une erreur systématique (de type A) s'installe sur notre mesure.

Cas 2 : on intègre U , la rampe est bruitée

On intègre E_{ref}

⚡

⊖

Idem que pour le premier cas mais en inversant les branchements de U et de E_{ref} .

Même avec un gros bruit, on a des valeurs proches de la valeur attendue. **L'intégration du signal permet de réduire l'influence du bruit.** EN effet, le bruit est à haute fréquence alors que nous travaillons à basse fréquence.

Quantification des écarts

Pour quantifier le bruit ici, on ne peut pas utiliser le rapport signal sur bruit, parce qu'on a pas vraiment de signal en sortie. Cependant on peut calculer $\frac{\sigma(U)}{U}$ l'écart type normalisé de la valeur mesurée, soit la largeur de la distribution, et $\frac{U - U_{ref}}{U_{ref}}$ l'écart à la valeur vraie normalisé. Cela donne une idée plus précise.

Remarque

En pratique, on n'utilise pas le CAN simple-rampe car il est trop sensible au bruit (RC est sensible à la température). On utilise plutôt le double-rampe, qui intègre la tension à mesurer, la lisse, puis intègre la tension de référence. Il se ramène ensuite à une simple mesure de temps comme le CAN simple-rampe.

3 Modulation et détection synchrone

⚡ FLTCLD p539

On n'a pas toujours des sources de bruit blanches. Par exemple, quand on veut étudier la lumière d'une ampoule avec une photodiode, la lumière du jour, une lampe, et les néons de la salle (bruit à 100 Hz) sont des sources de bruit non blanches. Cependant, puisque la répartition de ces bruits n'est pas homogène en fréquence, on peut étudier la répartition spectrale du bruit afin de trouver une plage de fréquence avec un bruit faible. Il suffit ensuite de déplacer le signal d'intérêt dans cette plage de fréquence, de le propager, puis de le récupérer à l'arrivée.

3.1 Principe de la détection synchrone (tampon)

⚡ Duffait p219-222

Principe de la détection synchrone

⚡

⊖ 5 min

Avec un GBF, on prend un sinus de fréquence f_s . Ce sera le signal d'intérêt. On translate le signal dans une zone de faible bruit en le multipliant par une porteuse de fréquence f_p (choisie pour avoir un minimum de bruit). On a alors un spectre avec 2 signaux à $f_p + f_s$ et à $f_p - f_s$. Ce sera le signal 'émis' avant propagation.

On additionne ces signaux à un bruit blanc avec une zone de fréquences moins bruitée (filtrée). On a alors un spectre avec 2 signaux à $f_p + f_s$ et à $f_p - f_s$ plus le bruit. Ce sera le signal 'reçu' après propagation.

C'est ensuite là qu'intervient vraiment la détection synchrone. À l'arrivée on démodule en remultipliant par la porteuse pour avoir dans le spectre un signal à f_s , un signal à $f_s + 2f_p$ et le bruit décalé. On applique alors un passe-bas *RC* pour n'obtenir que f_s .

3.2 Illustration concrète

On va maintenant appliquer ce principe à notre lampe.

Application de la détection synchrone à la détection du signal bruité d'une lampe

⚡ FLTCLD

⊖ 10 min

On veut récupérer avec un photo-capteur le signal émis par une lampe à quelques mètres au milieu de la pièce éclairée.

On alimente une petite ampoule avec GBF+Ampli à une fréquence $f_s = 0.5$ Hz par exemple.

On crée un bruit avec une lampe (ne pas l'orienter dans l'axe de la petite ampoule) ou la lumière du jour, il y a aussi les néons (100 Hz et le bruit électronique (50 Hz et 60 Hz).

Étape 1 : On fait l'acquisition du signal avec une photodiode + montage à AO (résistance de 100 kOhm par ex). On obtient un signal très bruité.

Calculer le RSB du signal, et voir qu'il est immonde. (On peut faire varier la distance si on veut.)

Étape 2 : Modulation

On utilise un hacheur optique alimenté par un GBF avec une fréquence f_p vers 140 Hz si possible (pour éviter tous les bruits)

Étape 3 : Démodulation synchrone On utilise le boîtier de détection synchrone commercial P47.8 (faire la détection à la main est trop difficile à cause de différences de phase). hoisir REF IN = REF OUTPUT du hacheur (et pas avec un autre GBF).

Faire l'acquisition du signal filtré, on voit déjà que le signal est retrouvé, et on calcule le RSB, qui doit être vachement meilleur !

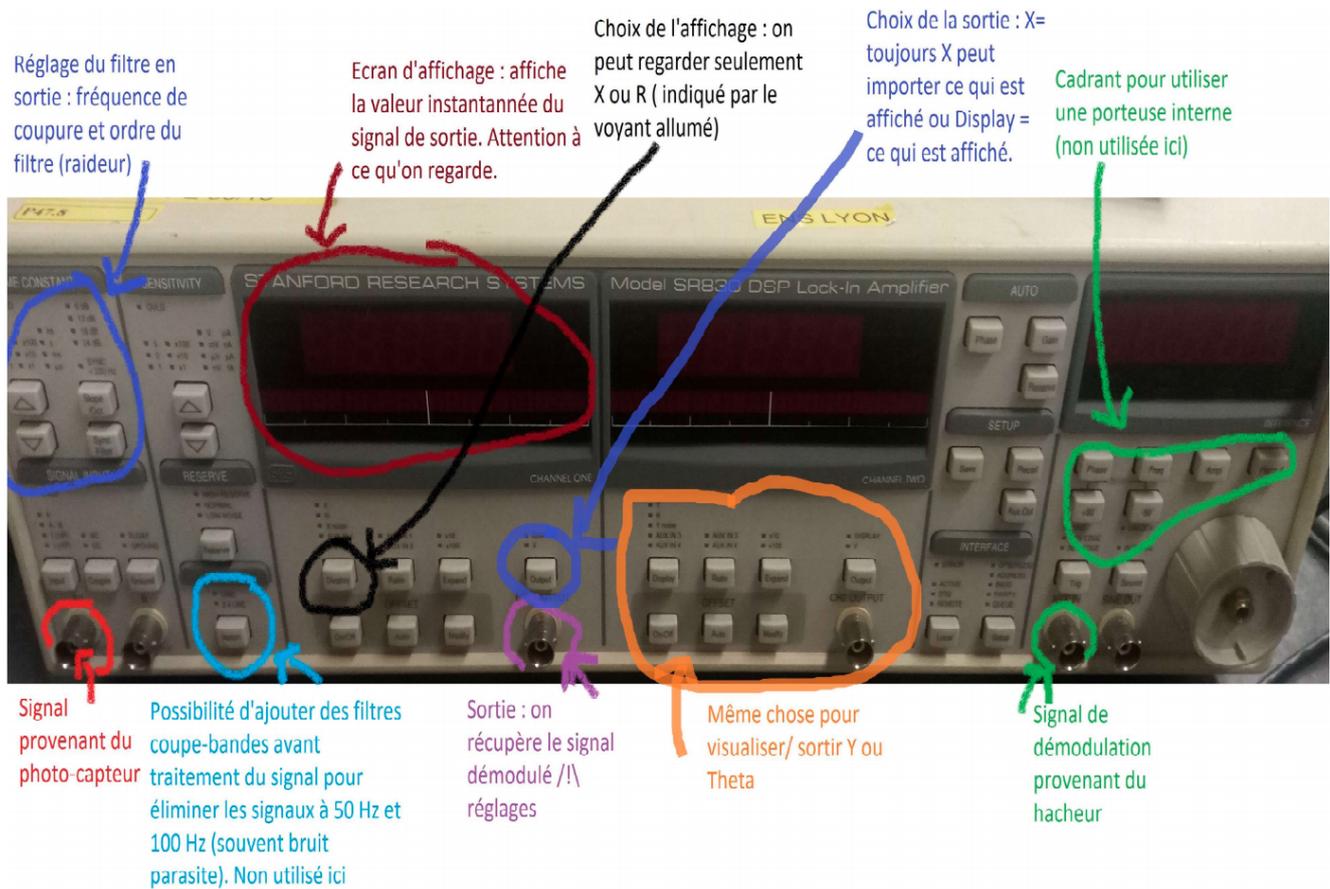


FIGURE 3 – Utilisation du boîtier de détection synchrone commercial : on peut visualiser la partie du signal en phase avec la porteuse (signal X) et celle en quadrature (signal Y). On peut également regarder $R = \sqrt{X^2 + Y^2}$ ou θ .

Conclusion

Dans ce montage, on a pu mettre en oeuvre des méthodes pour améliorer le Rapport Signal sur Bruit. Ce rapport permet de quantifier la caractère informatif du signal.

Cela a surtout été l'occasion de montrer comment on peut jouer avec le domaine spectral et la transformée de Fourier ainsi que d'aborder les problèmes liés à l'acquisition de signaux, problématiques chères au traitement du signal.

Types de bruits

<http://www.aclaf.fr/lexique-acoustique-et-definitions/lexique-des-bruits-types/>