

Analyseur de spectre

L'objectif de ce TP est de réaliser un analyseur de spectre, autrement dit un montage relié à un oscilloscope qui affiche sur l'écran de ce dernier le spectre de la tension d'entrée. Étant donné que le montage sera relativement chargé à la fin du TP, il est conseillé de réaliser dès le début des montages clairs utilisant un minimum de fils.

Ce TP s'appuie sur le travail effectué lors des chapitres §ELCT6 Filtres et §ELCT7 Circuits non linéaires. Les relations notées (*) sont celles qu'il faut savoir retrouver et les heures mentionnées sont données à titre purement indicatif de façon à permettre l'évaluation de l'importance relative des différentes parties.

I) Objectif : spectre

1°) Cahier des charges

Nous souhaitons réaliser un montage qui permet d'afficher les composantes du spectre d'un signal d'entrée jusqu'à environ 100 kHz en nous contentant de l'aspect qualitatif du spectre. Ainsi, nous n'imposons ni correspondance précise *a priori* entre hauteur d'un pic affiché sur l'écran et amplitude de la composante correspondante dans le signal d'entrée ni échelle horizontale. Pour des mesures quantitatives, il sera donc nécessaire d'étalonner l'analyseur.

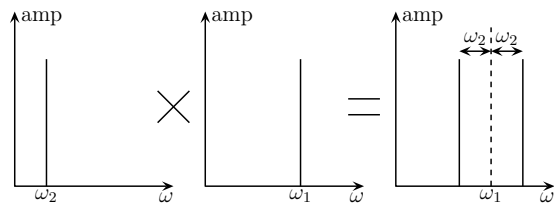
2°) Première analyse ... naïve

Pour obtenir les différentes composantes de pulsation ω d'un signal, nous pouvons *a priori* utiliser un filtre passe-bande très sélectif de pulsation centrale ω_0 variable. Malheureusement cette approche n'est pas techniquement réalisable à cause du filtre à pulsation centrale variable. Le problème majeur étant de conserver autant en basses fréquences qu'en hautes fréquences un facteur de qualité élevé.

3°) Deuxième regard plus crédible

Comme la pulsation centrale ω_0 du filtre permettant de sélectionner les composantes ne peut être modifiée, il va donc falloir modifier le spectre de la tension d'entrée pour amener la composante que nous cherchons à analyser à la pulsation ω_0 . Une telle translation de pulsation peut être réalisée avec un multiplieur.

Rappelons, en effet, que lorsque deux sinusoides de pulsations respectives ω_1 et ω_2 sont multipliées, alors le signal de sortie est la somme de deux signaux de pulsations $\omega_1 + \omega_2$ pour la partie dite *translatée* et $\omega_1 - \omega_2$ pour la partie dite *miroir* (cf. TP-Cours ELCT10 *Modulation*).



4°) Schéma de principe

i. notations

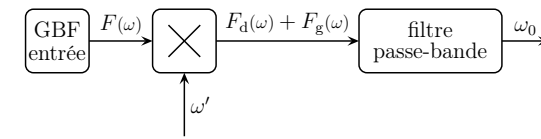
Dans tout le TP nous noterons ω une pulsation relative au signal d'entrée, ω' la pulsation par laquelle le signal d'entrée est multiplié (ω' sera donc la pulsation de translation du spectre) et ω_0 la pulsation centrale du filtre sélectif.

Dans les schémas de principe ci-dessous, sont notés sur certaines flèches quels signaux sont transmis :

- ω' , ω_0 correspondent à des signaux sinusoïdaux purs ;
- $F(\omega)$ est le signal d'entrée de spectre $F(\omega)$;
- $F_d(\omega)$ et $F_g(\omega)$ sont les spectres « droite » (translaté) et « gauche » (miroir) respectivement dus aux pics du type $\omega' + \omega$ (translation) et $\omega' - \omega$ (miroir) créés lors de la multiplication par ω' .

ii. version simple

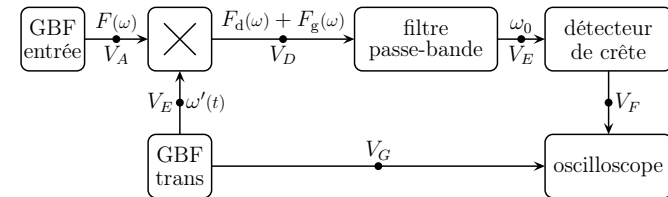
Le schéma de principe ci-dessous correspond à un montage permettant d'afficher sur l'écran de l'oscilloscope une tension sinusoïdale de pulsation ω_0 , pulsation centrale du filtre passe bande, et d'amplitude proportionnelle à la composante de la pulsation $\omega = \omega' - \omega_0$ où ω' est la pulsation de translation du spectre.



iii. version automatique

Le schéma ci-dessous répond au cahier des charges précédemment fixé : il automatise le montage « version simple » à l'aide de la wobulation intégrée du GBF de pulsation ω' . Nous pouvons alors afficher le spectre recherché à l'aide du mode XY de l'oscilloscope.

Les tensions V_A , V_B , V_D , V_E , V_F et V_G correspondent aux points A, B, C, E, F et G qui seront utilisés dans toute la suite du TP.

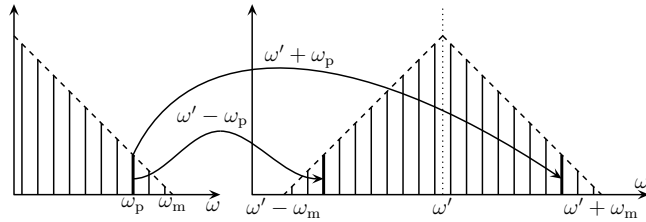


II) Translatons le spectre

1°) Réfléchissons avant

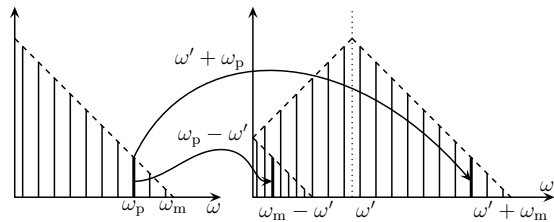
i. un spectre qui se replie ...

Lorsque la pulsation de translation ω' est suffisamment élevée, le spectre se modifie de la manière suivante. Nous notons ω_m la pulsation maximale présente dans le spectre de la tension d'entrée et ω_p une pulsation particulière dont nous regardons le devenir.



Nous pouvons remarquer que si $\omega' > \omega_m$ toutes les pulsations sont analysables, c'est-à-dire que quelle que soit la valeur de ω_0 , nous détectons bien une et une seule composante du spectre initial à travers le filtre très sélectif, où qu'il soit.

Lorsque la pulsation de translation n'est plus assez élevée, au lieu d'obtenir un pic en $\omega' - \omega$, nous obtenons un pic en $\omega - \omega'$ qui n'est pas « à sa place » : c'est le phénomène de repliement de spectre.



Dans de telles conditions, un filtre accordée à une pulsation trop faible, *ie.* dans une zone de repliement, ne pourrait distinguer le spectre replié du spectre non replié : il y aurait alors recouvrement de composantes et l'analyse ne serait pas correcte.

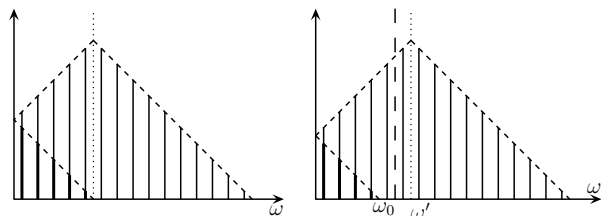
ii. ... et les contraintes ...

Rappelons que nous cherchons à avoir une pulsation d'analyse ω_0 la plus basse possible pour éviter d'utiliser des composants ayant des valeurs caractéristiques trop extrêmes.

Dans ces conditions, nous pouvons d'ores et déjà limiter la zone de recherche d'une pulsation ω_0 correcte à la partie « miroir » du spectre dupliqué : dans cette partie il y a tout ce que nous recherchons (à savoir le spectre de la tension d'entrée) et les pulsations à analyser sont systématiquement inférieures au spectre de la partie « translattée ». Malheureusement, c'est dans ce spectre miroir qu'apparaît d'abord le phénomène néfaste de repliement de spectre.

iii. ... n'empêchent pas d'avoir une solution ...

Nous recherche à partir de quelle valeur de ω' une partie du spectre « miroir » est analysable, *ie.* n'est pas entièrement replié sur lui-même de manière à pouvoir placer ω_0 dans cette zone.



Nous constatons que le spectre ne se replie plus entièrement sur sa partie « miroir » lorsque $\omega' > \omega'_r = \frac{\omega_m}{2}$. Ainsi avec une pulsation d'analyse ω_0 supérieure, elle aussi, à $\frac{\omega_m}{2}$, il est possible d'accéder parfaitement à toute la partie « miroir » du spectre.

Lorsque cette condition $\omega_0 > \frac{\omega_m}{2}$ est respectée, la pulsation de translation ω' varie entre ω_0 (où nous accédons à la composante continue du spectre) et $\omega_0 + \omega_m$ (où nous accédons à la composante ω_m du spectre).

iv. ... à coup sûr !

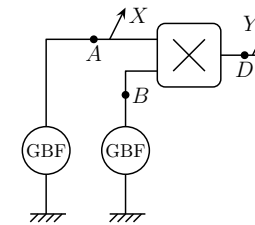
Pour être sûr de ne pas avoir de repliement de spectre, nous avons vu qu'il fallait $\omega_0 > \frac{\omega_m}{2}$. La question est maintenant « à ω_0 fixé (*ie.* une fois que l'analyseur sera construit), comment être sûr d'avoir $\omega_m < 2\omega_0$ quel que soit le signal d'entrée ? ».

Réponse : ne pas faire confiance à l'utilisateur mais s'en assurer soi-même en interposant entre le signal d'entrée (celui que l'on veut analyser) et l'entrée de l'analyseur un filtre passe-bas qui coupera toutes les pulsations indésirables. Un tel filtre passe-bas placé dans ces conditions est appelé « filtre anti-repliement » ou (en anglais) « anti-aliasing ». Dans ce TP nous n'installerons pas un tel dispositif afin de pouvoir observer les conséquences d'un repliement de spectre.

2°) Agissons maintenant ! 🕒

i. veni

→ Réalisez le montage ci-dessous en utilisant le multiplieur intégré (n'oubliez pas de l'alimenter).



Le GBF relié au point A délivre la tension u_1 (rect ; $f_1 = 2,0$ kHz ; 2,0 V), c'est le signal à analyser, et le GBF relié au point B délivre la tension u_2 (sin ; $f' = 40$ kHz ; 2,0 V), c'est le GBF translateur.

ii. vidi

- Observez le spectre de la voie X puis de la voie Y.
- Réglez $f_1 = 5,0$ kHz et $f' = 10$ kHz afin d'observer le repliement de spectre sur la voie Y. Assurez-vous, ici, que vous observez bien du repliement de spectre lorsque, en augmentant progressivement la fréquence f' , tous les pics ne se dirigent pas dans la même direction.

iii. vici

Comme nous cherchons à réaliser un analyseur de spectre jusqu'à la fréquence $f_m = 100$ kHz, il faudra que la fréquence d'analyse soit supérieure ou égale à $\frac{f_m}{2} = 50$ kHz. Dans ces conditions, la fréquence de translation doit varier entre $f_0 = 50$ kHz et $f_0 + f_m = 150$ kHz.

- Réglez la wobulation *interne* du GBF2 pour qu'il réalise un tel balayage en fréquence. Pour les GBF GX240, la fréquence minimale du balayage se règle balayage **éteint** comme une fréquence « normale ».

La fréquence maximale se règle après avoir appuyé sur le bouton FMAX en tournant le bouton de réglage FMAX le mode balayage étant cette fois **en service**. Si vous n'avez pas de GX240, appelez le professeur si vous ne trouvez pas comment faire avec votre GBF au bout de 5 minutes.

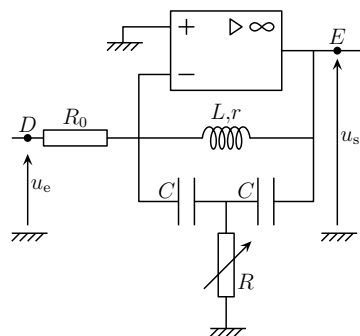
La partie « translation du spectre » est terminée : il ne faudra plus modifier les réglage du GBF translateur.

III) Le filtre sélectif

1°) Un filtre capricieux

i. schéma

Le montage ci-contre correspond à un filtre actif passe-bande.



Les paramètres du filtre étant assez délicats à régler, dans toute cette partie nous ne relierons pas ce filtre au multiplieur de la partie précédente.

Ainsi la tension d'entrée u_e sera une tension sinusoïdale de pulsation ω constante (*ie.* pas de wobulation), connue et réglable. L'amplitude sera choisie d'environ 1,0 V.

ii. résultats

Nous avons montré, dans l'exercice ELCT6-11 que la pulsation centrale, *ie.* celle à laquelle l'amplification en amplitude est maximale, est telle que $\omega_0^2 = \frac{2}{LC}$. (*) Nous avons montré de plus que lorsque $R \leq R_{\min} = \frac{L}{2rC}$, le montage est instable (bien que rétroactionné sur la l'entrée inverseuse) donc inutilisable.

La valeur théorique précédente surestime en général la valeur expérimentale de la résistance limite. Pour trouver cette dernière, nous allons chercher à la main la zone d'instabilité du filtre. Pour ce faire, il suffit de débrancher une patte de R_0 (qui sera alors une patte en l'air) afin de ne **pas** envoyer de signal d'entrée et de chercher la valeur limite de R telle qu'il y ait un signal en sortie. La présence d'un tel signal, même faible, malgré un signal d'entrée nul est bien révélatrice d'un comportement instable.

2°) Des réglages expérimentaux

i. montage

→ Réalisez le montage correspondant au filtre précédent avec un AO TL081 ; $R_0 = 1,0 \text{ k}\Omega$; $L = 2,2 \text{ mH}$ et $C = 10 \text{ nF}$. Prenez soin de déterminer r auparavant à l'aide d'un ohmmètre. Pour la bobine, prenez les bobines miniatures et utilisez les plaquettes de montage adaptées.

$$r =$$

ii. premiers réglages

→ Après avoir déterminé la valeur minimale R_{\min} de R à respecter, réglez R à environ $1,1 R_{\min}$.

$$R_{\min} =$$

→ Recherchez la valeur expérimentale f_0 de la fréquence à laquelle l'amplification en amplitude est maximale. Pour cela, faire varier la fréquence de la tension d'entrée autour de la fréquence théorique attendue.

$$f_0 =$$

iii. 15 bonnes minutes d'affinage

→ Une fois repérée la fréquence centrale et l'amplification maximale T_{\max} correspondante, déterminez la bande passante $\Delta f = |f_1 - f_2|$ où f_1 et f_2 sont les fréquences telles que l'amplification soit égale à $T(f_2) = T(f_1) = \frac{T(f_0)}{\sqrt{2}} = \frac{T_{\max}}{\sqrt{2}}$. Déduisez-en le facteur de qualité : $Q = \frac{f_0}{\Delta f}$.

Cette mesure est délicate et n'a pour but que d'avoir une idée de l'ordre de grandeur du facteur de qualité de manière à ce qu'il soit d'environ 20. Inutile donc de faire les mesures très précisément : 5 minutes doivent très largement suffire.

$$f_1 = \qquad \qquad \qquad f_2 = \qquad \qquad \qquad Q =$$

→ Modifiez R (en la rapprochant, sans y devenir inférieure, de sa valeur limite R_{\min}) jusqu'à obtenir un facteur de qualité supérieur ou égal à 20 : la théorie nous indiquant que le facteur de qualité tend vers l'infini lorsque R tend vers R_{\min} .



Une modification de la valeur de R , si elle n'entraîne pas de modification de la valeur de f_0 entraîne, en revanche, une modification de la valeur de T_{\max} qu'il faut, alors, redéterminer avant de rechercher la bande passante.



Lors de la recherche de T_{\max} , il ne faut pas oublier que la tension de sortie de l'AO est limitée à $\pm V_{\text{sat}}$. En conséquence, il sera peut-être (et même sûrement) nécessaire de diminuer la tension d'entrée afin d'éviter la saturation de l'AO.



Comme l'indique le titre, 15 bonnes minutes suffisent ! Ce n'est pas un réglage critique, inutile d'y passer une heure.

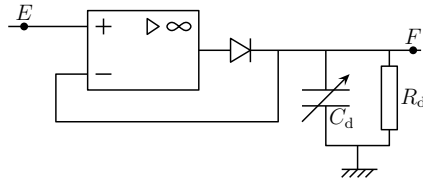
IV) Assemblage

1°) Le détecteur de crêtes ⌚

i. amélioration du montage connu

Ce montage a été étudié en cours §ELCT7-II.

- Réalisez le montage ci-dessous avec un AO TL081, $R_d = 10 \text{ k}\Omega$ et une diode à pointe (diode rapide fonctionnant en hautes fréquences). On pourra utiliser une autre plaquette de montage ainsi qu'une autre alimentation $-15 \text{ V} / +15 \text{ V}$.



Ce montage permet d'annuler un des défauts lié au détecteur de crête usuel : la tension de seuil. Son principe de fonctionnement combine à la fois un redressement sans seuil et un détecteur de crête.

ii. réglages

Il faut que $\tau = R_d C_d$, constante de temps caractéristique de la détection de crête, soit grande devant la période du signal dont on veut détecter l'enveloppe. Or il s'agit précisément du signal de sortie du filtre passe bande très sélectif. Autrement dit le signal d'entrée du détecteur de crête est une sinusoïde de fréquence ω_0 . Il faut donc : $\frac{1}{\tau} \leq \frac{f_0}{10}$. Régler C_d pour avoir : $\tau \simeq \frac{10}{f_0}$.

2°) Tous ensembles ⌚

- Reliez les différents modules réalisés les uns aux autres, conformément au schéma de principe. Cela revient à brancher le signal wobulant V_G sur l'entrée X de l'oscilloscope analogique et la sortie V_F du détecteur de crête sur la voie Y du même oscilloscope. L'accès au signal wobulant V_G se fait à une sortie du GBF située sur sa face arrière et nommée SWEEP OUT pour les GX240 (pour les autres appareils, appelez le professeur). Veillez à régler la fréquence f_{wob} de la wobulation de telle sorte que $T_{\text{wob}} \geq 10\tau$ afin que le détecteur de crête puisse fonctionner correctement. Autrement dit, prenez $F_{\text{mod}} \leq 500 \text{ Hz}$.
- Passez en mode XY et admirez (normalement, ça marche).

V) Et maintenant ? ⌚

1°) L'utilisation

i. quelques restrictions

Étant donné qu'il est difficile de connaître et surtout de maîtriser précisément les différentes pulsations caractéristiques de l'analyseur, on n'essaiera pas de l'étalonner mais on se contentera d'observer les résultats de spectres connus.

ii. ça marche !

- En envoyant des signaux de différentes formes (rectangulaire, triangulaire, sinusoïdale) et de fréquence inférieure à 5 kHz, observez les spectres obtenus et comparez avec ceux obtenus directement avec l'oscilloscope numérique.

2°) Et ses limites

i. c'était prévisible

- Augmentez la fréquence du signal envoyé à l'entrée de l'analyseur de spectre et observez le repliement de spectre.

ii. finesse

- En utilisant la méthode de votre choix (modulation de fréquence par wobulation intégrée, addition de deux tensions, multiplications de deux tensions) réalisez une tension u_1 envoyée sur l'entrée de l'analyseur présentant un spectre avec (au moins) deux pics de fréquences f_1 et $f_1 + f_2$ telle que f_2 soit facilement réglable.
- Modifiez f_2 afin de déterminer la valeur minimale permettant de voir à l'écran deux pics distinguables. Cette valeur minimale est ce qu'on appelle la résolution en fréquence : plus elle est faible, plus l'analyseur de spectre est performant.

$$\Delta f_{\min} =$$