

TP ELEC 3 : Filtrage analogique – filtre actif et analyseur de spectre

Objectifs :

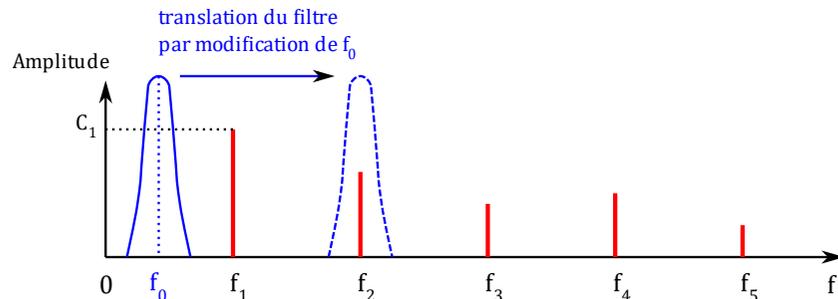
- Analyser l'effet d'un filtre passe-bande très sélectif sur un signal périodique.
- Analyser les rôles respectifs de la fréquence d'un signal et de la fréquence propre d'un filtre passe-bande.
- Réaliser un analyseur de spectre analogique
- Réaliser un montage à base d'Amplificateur Linéaire Intégré (ALI)

1) Les analyseurs de spectre

Un **analyseur de spectre** est un instrument de mesure permettant de représenter un signal dans le domaine fréquentiel contrairement à un oscilloscope qui affiche le signal dans le domaine temporel. Il existe des analyseurs de spectre pour différents types de signaux : électrique, optique, sonore, radioélectrique... Il existe essentiellement trois types d'analyseur.

- Analyseur de spectre à balayage analogique à fréquence d'accord réglable**

Un filtre passe-bande très sélectif, dont on fait varier la fréquence centrale f_0 depuis la fréquence nulle, permet de détecter et de mesurer les différentes composantes



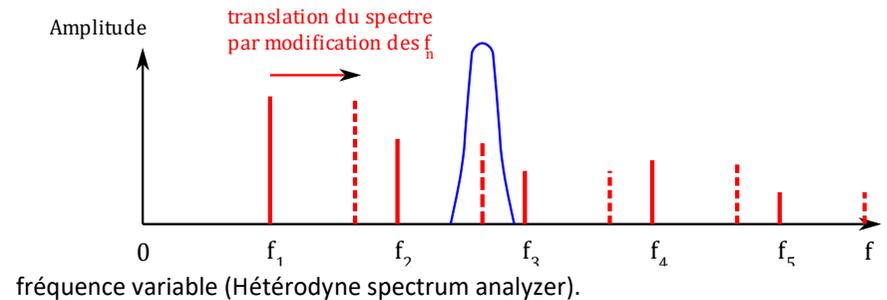
spectrales du signal à étudier. Lorsque f_0 s'identifie à l'une des fréquences f_n du signal, le filtre délivre un signal sinusoïdal d'amplitude proportionnelle au coefficient de Fourier C_n de la n^{ème} composante.

C'est ce type d'analyseur à passe-bande glissant (Tuned-filter spectrum analyzer) que nous allons utiliser dans le TP.

- Analyseur de spectre à balayage analogique à fréquence d'accord fixe**

Cette fois-ci, la fréquence centrale du filtre passe-bande sélectif est fixe et c'est le spectre du signal à analyser que l'on translate afin que ses harmoniques se présentent successivement dans la bande passante du filtre. Ce dernier délivre alors un signal sinusoïdal d'amplitude proportionnelle au coefficient de Fourier C_n lorsque le n^{ème} harmonique de fréquence f_n se trouve dans la bande passante.

Ce type de méthode réalise la multiplication du signal avec celui d'un oscillateur à



- Analyseur de spectre numérique à FFT (Fast Fourier Transform)**

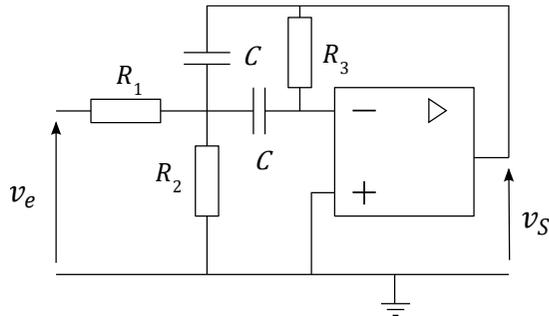
Le signal à analyser est numérisé et traité par l'algorithme de transformée de Fourier rapide. Ce type de méthode d'analyse est la plus répandue à ce jour. Nous l'utiliserons dans un TP ultérieur.

2) Etude théorique du montage

On souhaite réaliser un filtre passe-bande d'ordre 2 respectant le cahier des charges suivant :

- Le filtre passe-bande doit permettre une analyse spectrale analogique à fréquence d'accord réglable.
- Le domaine spectral [100 Hz; 2 kHz] doit pouvoir être exploré par l'analyseur de spectre.
- La résolution en fréquence doit rester inférieure à 100 Hz.

Pour ce faire, nous allons utiliser un filtre de Rauch (voir montage ci-dessous), comportant un ALI (amplificateur linéaire intégré). Il s'agit donc d'un filtre actif.



Dans le cas plus général, le montage associé à un filtre de Rauch est le suivant :

- Q1)** Prévoir par une étude qualitative la nature du filtre ainsi réalisé.
- Q2)** ** Montrer que ce filtre actif est un filtre passe-bande du second ordre de fonction de transfert canonique classique avec les caractéristiques suivantes :

$$H \cong \frac{v_s}{v_e} = \frac{H_0}{1 + jQ \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)}$$

→ Pulsation centrale : $\omega_0 = \frac{1}{C} \sqrt{\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 R_3}}$

→ Amplification à ω_0 : $H_0 = -\frac{R_3}{2R_1}$

→ Facteur de qualité $Q = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{R_3(R_1 + R_2)}{R_1 R_2}}$

- Q3)** Vérifier quantitativement que le choix suivant de composants permet de respecter le cahier des charges :

$R_1 = 470 \text{ k}\Omega$, R_2 résistance réglable de 10Ω à $100 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 1,0 \text{ M}\Omega$ et $C = 10 \text{ nF}$.

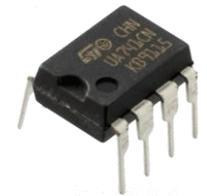
- Q4)** Montrer qu'en modifiant la valeur de R_2 , on décale la fréquence centrale du filtre sans modifier sa bande passante. Justifier que la valeur de cette bande passante est bien choisie.

- Q5)** On souhaite mettre en œuvre cet analyseur de spectre analogique sur un signal créneau périodique de fréquence 200 Hz et d'amplitude 2 V. Quelles sont les fréquences des 3 premiers harmoniques de ce signal ?

- Q6)** Comment déterminer les valeurs de la résistance variable R_2 permettant de détecter ces 3 premiers harmoniques ? quelles sont les allures attendues pour les signaux de sortie associés ?

3) Câblage de l'ALI et réalisation du montage

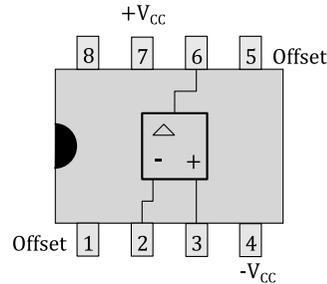
Un ALI est un circuit intégré¹ analogique², qui se présente sous la forme d'un composant à 8 broches (ou pattes ou pin connections) repérées à l'aide d'un **détrompeur** (demi-lune, rond...);



¹ **intégré** car il contient dans le volume réduit d'un boîtier noir (boîtier DIP pour *Dual In-line Package*) une grande quantité de composants électroniques de base

² **analogique** car ces composants constitutifs le sont (le modèle $\mu A741$ contient 22 transistors, 12 résistances et un condensateur, le tout brasé sur un circuit imprimé à substrat de silicium)

- 1 : réglage d'offset (inutilisée cette année)
- 2 : entrée inverseuse v_- (notée - sur le schéma)
- 3 : entrée non inverseuse v_+ (notée +)
- 4 : alimentation $-V_{cc} = -15\text{ V}$
- 5 : réglage d'offset (inutilisée cette année)
- 6 : sortie v_s
- 7 : alimentation $+V_{cc} = +15\text{ V}$
- 8 : non connectée



L'ALI est un composant actif car il ne fonctionnera que s'il est alimenté (« polarisé ») par deux tensions continues symétriques $\pm 15\text{ V}$.

Nous allons réaliser ce filtre sur une plaquette Pierron où se trouve l'ALI ainsi que son alimentation déjà branchée. L'ensemble des points reliés par un trait sont en réalité reliés par un fil et donc au même potentiel. L'ensemble des points noirs sont reliés à la masse du circuit, imposée par l'alimentation de l'ALI. Il existe par ailleurs trois points particuliers correspondant aux entrées + et - de l'ALI ainsi qu'à sa sortie.

- ✎ Brancher au secteur par le biais de son cordon d'alimentation la plaquette Pierron sur laquelle se trouve l'ALI, puis l'allumer, ce qui revient à allumer les alimentations $\pm 15\text{ V}$ connectées aux deux broches d'alimentations 4 ($-V_{cc}$) et 7 ($+V_{cc}$) de l'ALI.

Attention !!! L'alimentation doit être allumée en premier et éteinte en dernier (c'est le « bouton power » d'un appareil électrique).

- ✎ Réaliser le montage sans placer pour le moment de tension v_e en entrée ni effectuer les branchements de l'oscilloscope. On prendra soin de ne pas oublier de connecter la borne noire de cette plaquette (et donc de l'alimentation symétrique $\pm 15\text{ V}$) à la masse du montage.

Appel professeur pour vérification des branchements.

- ✎ Compléter le montage en branchant le GBF de manière à alimenter le filtre avec une tension d'entrée v_e (la masse du GBF devant être commune à celle du reste du montage), ainsi que l'oscilloscope de manière à visualiser les tensions d'entrée v_e et de sortie v_s du filtre, toujours en étant vigilant quant aux masses.

Appel professeur pour vérification des branchements.

4) Analyse spectrale analogique d'un signal périodique

- Q7) ✎ Proposer et mettre en œuvre une méthode d'identification des différentes harmoniques du signal créneau.
- Q8) ✎ Déterminer, grâce à votre filtre, les amplitudes C_n de chaque harmonique de fréquence f_n du signal. La décroissance en $1/n$ de ces amplitudes est-elle vérifiée ?

Appel professeur pour la présentation du protocole et des résultats.

5) Si vous avez le temps...

- ✎ Tracer le diagramme de Bode de ce filtre
- ✎ Déterminer expérimentalement sa bande passante ainsi que ses grandeurs caractéristiques et comparer aux grandeurs théoriques (calcul des Z-score).

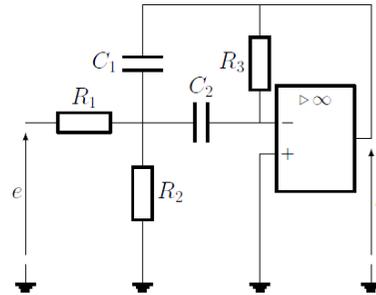
$$\rightarrow \text{Pulsation centrale : } \omega_0 = \frac{1}{C} \sqrt{\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 R_3}}$$

$$\rightarrow \text{Amplification à } \omega_0 : H_0 = -\frac{R_3}{2R_1}$$

$$\rightarrow \text{Facteur de qualité } Q = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{R_3(R_1 + R_2)}{R_1 R_2}}$$

Annexe n°1 : Etude théorique du filtre de Rauch

On considère le filtre de Rauch généralisé à deux condensateurs différents tel que sur le montage ci-dessous.



Détermination de sa fonction de transfert

Il y a rétroaction sur le - donc on est en mode linéaire et $V_- = V_+ = 0$
 En introduisant le point A au centre de la croix. On applique Millman à l'entrée inverseuse

$$\underbrace{V_-}_{=0} \left(Y_2 + \frac{1}{R_3} \right) = V_A Y_2 + \frac{s}{R_3} = 0 \Rightarrow s = -V_A R_3 Y_2$$

On peut alors Millman en A (en n'oubliant pas que $V_- = 0$)

$$V_A \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + Y_1 + Y_2 \right) = \frac{e}{R_1} + s Y_1$$

En multipliant la relation par $-R_1 R_3 Y_2$, on obtient

$$\begin{aligned} \underbrace{-V_A R_3 Y_2}_{=s} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} + R_1 Y_1 + R_1 Y_2 \right) &= -e R_3 Y_2 - R_1 R_3 Y_1 Y_2 s \\ \Rightarrow s \left(1 + \frac{R_1}{R_2} + R_1 Y_1 + R_1 Y_2 + R_1 R_3 Y_1 Y_2 \right) &= -e R_3 Y_2 \\ \Rightarrow \frac{s}{e} &= \frac{-j R_3 C_2 \omega}{1 + \frac{R_1}{R_2} + j\omega(R_1 C_1 + R_1 C_2) + (j\omega)^2 R_1 R_3 C_1 C_2} \end{aligned}$$

on reconnaît la fonction de transfert d'un passe-bande.

NB : avec le comportement asymptotique du filtre, on retrouve bien $s = 0$ à HF (les condensateurs sont des fils qui relient s à -) et $s = 0$ à BF (cette fois s est relié seulement par R_3 mais $i_3 = i_- = 0$ donc $s = V_-$).

Les formes canoniques de la fonction de transfert d'un filtre passe-bande sont les suivantes, avec $x = \frac{\omega}{\omega_0}$:

$$\frac{H}{H_0} = \frac{j \frac{x}{Q}}{1 + j \frac{x}{Q} + (jx)^2} = \frac{H_0}{1 + jQ \left(x - \frac{1}{x} \right)}$$

Nous avons

$$\frac{H}{H_0} = \frac{-j R_3 C_2 \omega}{1 + \frac{R_1}{R_2} + j\omega(R_1 C_1 + R_1 C_2) + (j\omega)^2 R_1 R_3 C_1 C_2}$$

soit

$$\frac{H}{H_0} = \frac{\frac{-j R_3 C_2 \omega}{1 + \frac{R_1}{R_2}}}{1 + j\omega \frac{R_1(C_1 + C_2)}{1 + \frac{R_1}{R_2}} + (j\omega)^2 \frac{R_1 R_3 C_1 C_2}{1 + \frac{R_1}{R_2}}}$$

Ou encore

$$\begin{aligned} \frac{H}{H_0} &= \frac{-1}{1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_1(C_1 + C_2)}{R_3 C_2} + j\omega \frac{R_1 R_3 C_1 C_2}{R_3 C_2}} \\ \frac{H}{H_0} &= \frac{-\frac{R_3 C_2}{R_1(C_1 + C_2)}}{1 + j \left(\omega \frac{R_1 R_3 C_1 C_2}{R_3 C_2} - \frac{1 + \frac{R_1}{R_2}}{R_3 C_2 \omega} \right)} \end{aligned}$$

Détermination de ses grandeurs caractéristiques

Par identification avec, par exemple, la dernière forme canonique :

$$H_0 = -\frac{R_3 C_2}{R_1(C_1 + C_2)}$$

$$\begin{cases} Q\omega_0 = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 (C_1 + C_2)} \\ \frac{Q}{\omega_0} = \frac{R_3 C_1 C_2}{C_1 + C_2} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} Q^2 = \frac{(R_1 + R_2) R_3 C_1 C_2}{R_1 R_2 (C_1 + C_2)^2} \\ \omega_0^2 = \frac{(R_1 + R_2)(C_1 + C_2)}{R_1 R_2 R_3 C_1 C_2 (C_1 + C_2)} \end{cases} \Leftrightarrow$$

$$\begin{cases} Q = \frac{1}{C_1 + C_2} \sqrt{\frac{(R_1 + R_2) R_3 C_1 C_2}{R_1 R_2}} \\ \omega_0 = \sqrt{\frac{(R_1 + R_2)}{R_1 R_2 R_3 C_1 C_2}} \end{cases}$$

On retrouve bien les résultats de début de TP dans le cas particulier où $C_1 = C_2 = C$.

Matériel utilisé par paillasse (10 paillasses)

- GBF + Oscillo
- 1 ALI, son alimentation (plaquettes Pierron)
- Résistance R variable de $10\ \Omega$ à $100\ \text{k}\Omega$ (boite à décades par exemple)
- Résistance $R_1 = 470\ \text{k}\Omega$
(par exemple boite AOIP $\times 10^4$ + boite AOIP $\times 10^5$ + connecteur métallique)
- Résistance $R_3 = 1,0\ \text{M}\Omega$ (boite AOIP $\times 10^6$)
- Capacité $C = 10\ \text{nF} \times 2$ par paillasse
- Boîtes de résistances et capacités variables
- 1 PC