

TP : FILTRAGE ANALOGIQUE

Ce TP a pour objectifs de tracer les diagrammes de BODE (sur papier millimétré semi-logarithmique) de filtres analogiques passifs et actifs et découvrir le mode de fonctionnement du wobulateur et du détecteur de crêtes afin de visualiser la courbe de résonance d'un filtre.

1 Introduction

L'opération de filtrage analogique linéaire est une phase importante du traitement d'un signal et intervient dans un bon nombre d'applications (audio : séparation des voies..., instrumentation et acquisition du signal : élimination de parasites, de bruits...).

Le filtre est dit linéaire si l'équation différentielle qui le caractérise est linéaire. On distingue principalement cinq types de filtres analogiques : passe-bas, passe-haut, passe-bande, coupe-bande et déphaseur et deux grandes familles : les filtres passifs et les filtres actifs.

Important

Les instruments de mesure que vous utilisez pour relever les diagramme de BODE des différents filtres de ce TP ont eux même une bande passante qu'il est important de connaître pour faire des mesures dans de bonnes conditions. On peut supposer en bonne approximation que ces instruments de mesure se comportent comme des filtres passe-bas. C'est d'ailleurs le cas de tous les systèmes physiques lorsque la fréquence devient très élevée.

2 Filtre passif RC

On considère le filtre de la figure suivante :

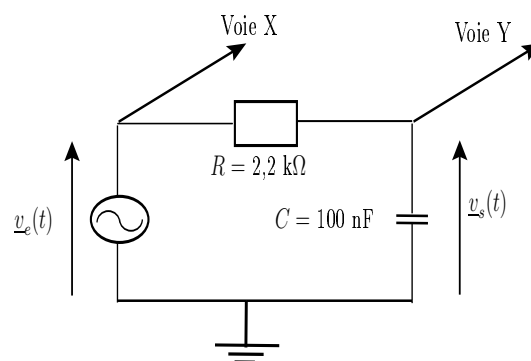


FIGURE 1 – Filtre RC

2.1 Fonction de transfert, fréquence de coupure

- ☞ Établir la fonction de transfert harmonique $\underline{H}(j\omega)$ du filtre RC. Quelle est la nature de ce filtre, son ordre ?
- ☞ Déterminer l'expression théorique de sa fréquence de coupure f_c et faire l'application numérique.
- ☞ Pouvez-vous relever convenablement les diagrammes de BODE de ce filtre avec le multimètre numérique ? Justifier votre réponse.

2.2 Diagramme de Bode asymptotique

- ☞ Déterminer le diagramme asymptotique du gain de ce filtre.
- ☞ Quelle fonction ce filtre réalise-t-il pour des fréquences d'excitation f telles que $f \gg f_c$?

2.3 Relevé expérimentale du diagramme de BODE

2.3.1 Analyse Préliminaire

Avant de relever les diagrammes de BODE d'un filtre quelconque, il faut d'abord se donner une idée de la nature du filtre en balayant sommairement la plage des fréquences et en observant, à l'oscilloscope par exemple, la réponse en amplitude de ce filtre. Cela permet aussi de détecter les domaines nécessitant plus de points de mesure que d'autres (variations brutales au voisinage des fréquences de coupure,...) et de déterminer la plage de fréquences utile à un bon relevé des diagrammes.

Important :

Cette étude permet aussi de vérifier si la valeur maximale de la tension d'entrée imposée par le GBF reste fixe sur toute la plage de mesures et si aucune limitation (donc non-linéarité) n'intervient dans le domaine d'étude.

2.3.2 Relevé du diagramme de BODE

- ☞ Réaliser l'analyse préliminaire du filtre RC .
- ☞ Utiliser, si le domaine de fréquences le permet, le multimètre en position dB. Dans ce cas, il faut déterminer la valeur de **la tension sinusoïdale alternative pure de référence** celle qui donne 0 dB et fixer l'amplitude du signal d'entrée du filtre à cette valeur.
- ☞ Mesurer le déphasage en utilisant l'oscilloscope.
- ☞ Relever simultanément les diagrammes de Bode du gain et de la phase de ce filtre avec au moins une dizaine de points bien répartis. On utilisera une tension sinusoïdale alternative pure, son amplitude étant déterminée par la remarque précédente.

2.3.3 Analyse des diagrammes

- ☞ Représenter les diagrammes sur papier millimétré semi-logarithmique. Tracer le diagramme asymptotique du gain.
- ☞ Déterminer la fréquence de coupure expérimentale f_c . Comparez avec la fréquence théorique.

2.4 Étude expérimentale du comportement du filtre RC

On s'intéresse maintenant à l'effet du filtre RC sur un signal complexe. Le signal d'excitation $v_e(t)$ est un signal carré de fréquence f_0 , variant entre 0 et $V_m = 1$ V.

☞ Donner le développement en série de FOURIER du signal carré.

2.4.1 Cas où $f_0 \ll f_c$

☞ Avec le montage précédent, observez la réponse du filtre pour des signaux $v_e(t)$ carré de fréquences : $f_0 = f_c/20, f_c/10$. Commentez et concluez.

2.4.2 Cas où $f_0 \gg f_c$

☞ Avec le montage précédent, observez la réponse du filtre pour des signaux $v_e(t)$ carré de fréquences : $f_0 = f_c, 5f_c, 10f_c$. Commentez et concluez.

☞ Quelle est la forme de la tension de sortie pour $f_0 = 10f_c$? Quelle fonction réalise ce filtre lorsque $f_0 \gg f_c$? Comment peut-on alors écrire sa fonction de transfert?

☞ Quelle est dans ce cas le développement en série de FOURIER du signal de sortie?

☞ Relevé le spectre en amplitude du signal d'entrée et celui du signal de sortie.

☞ Comparer les amplitudes V_k des harmoniques des deux signaux. Concluez sur l'effet du filtre linéaire RC.

2.5 Application du filtre RC

☞ Pour le même signal carré, déterminer l'ondulation crête à crête de la tension de sortie $\frac{\Delta v_s}{\langle v_s \rangle}$, pour les fréquences $f_0 = 10f_c$, puis $f_0 = 100f_c$.

☞ En déduire une condition sur $T_0 = 1/f_0$ et $\tau = RC$ pour que l'ondulation soit la plus faible possible.

☞ Montrer qu'en régime établi, le signal d'entrée et le signal de sortie ont la même valeur moyenne. Vérifier cela de manière expérimentale.

☞ Quelle fonction mathématique réalisée par le circuit RC lorsque $f_0 \gg f_c$. Donner des exemples d'utilisation de cette fonction. Quelles sont les précautions d'emploi pour effectuer la moyenne temporelle d'un signal avec ce circuit?

2.6 Effet de la charge sur le filtre RC

Nous proposons dans ce paragraphe, d'analyser l'influence d'une charge sur les propriétés du filtre RC.

2.6.1 Charge résistive

On place en parallèle sur le condensateur du filtre RC utilisé dans les paragraphes précédentes, une charge résistive $R_c = 5$ k Ω .

- ☞ Déterminer la nature du filtre (sans tracer le diagramme de BODE). Quelle est la valeur du gain maximal G'_0 ? Mesurer la nouvelle fréquence de coupure f'_c .
- ☞ Conclure.

2.6.2 Influence de l'oscilloscope

On utilise cette fois le filtre RC avec les valeurs $R = 220 \text{ k}\Omega$ et $C = 1 \text{ nF}$.

- ☞ Comme précédemment, déterminer la nature du filtre par balayage. Quelle est la valeur du gain maximal G'_0 ? Mesurer la nouvelle fréquence de coupure f'_c . Comparer avec les valeurs théoriques.
- ☞ Conclure.

2.6.3 Conclusions

- ☞ Conclure sur l'influence de la charge sur les caractéristiques du filtre passif.
- ☞ Quelle modification proposez-vous d'apporter au montage pour éviter ces inconvénients?

3 Filtre passif CR

On considère le filtre de la figure suivante :

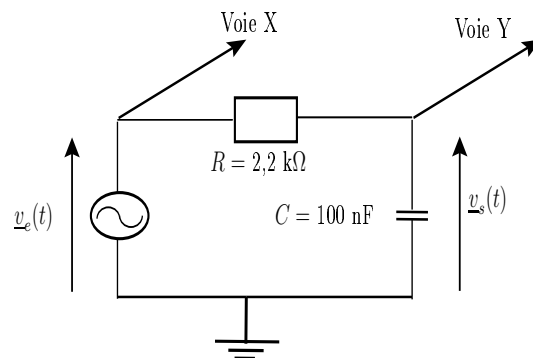


FIGURE 2 – Filtre CR

3.1 Fonction de transfert, fréquence de coupure

- ☞ Établir la fonction de transfert harmonique $\underline{H}(j\omega)$ du filtre RC. Quelle est la nature de ce filtre, son ordre?
- ☞ Déterminer l'expression théorique de sa fréquence de coupure f_c et faire l'application numérique.
- ☞ Pouvez-vous relever convenablement les diagrammes de BODE de ce filtre avec le multimètre numérique? Justifier votre réponse.

3.2 Diagramme de BODE asymptotique

- ☞ Déterminer le diagramme asymptotique du gain de ce filtre.
- ☞ Quelle fonction ce filtre réalise-t-il pour des fréquences d'excitation f telles que $f \gg f_c$?

3.3 Relevé expérimentale du diagramme de BODE

3.3.1 Analyse Préliminaire

Avant de relever les diagrammes de BODE d'un filtre quelconque, il faut d'abord se donner une idée de la nature du filtre en balayant sommairement la plage des fréquences et en observant, à l'oscilloscope par exemple, la réponse en amplitude de ce filtre. Cela permet aussi de détecter les domaines nécessitant plus de points de mesure que d'autres (variations brutales au voisinage des fréquences de coupure,...) et de déterminer la plage de fréquences utile à un bon relevé des diagrammes.

Important :

Cette étude permet aussi de vérifier si la valeur maximale de la tension d'entrée imposée par le GBF reste fixe sur toute la plage de mesures et si aucune limitation (donc non-linéarité) n'intervient dans le domaine d'étude.

3.3.2 Relevé du diagramme de BODE

- ☞ Réaliser l'analyse préliminaire du filtre CR.
- ☞ Utiliser, si le domaine de fréquences le permet, le multimètre en position dB. Dans ce cas, il faut déterminer la valeur de **la tension sinusoïdale alternative pure de référence** celle qui donne 0 dB et fixer l'amplitude du signal d'entrée du filtre à cette valeur.
- ☞ Mesurer le déphasage en utilisant l'oscilloscope.
- ☞ Relever simultanément les diagrammes de BODE du gain et de la phase de ce filtre avec au moins une dizaine de points bien répartis. On utilisera une tension sinusoïdale alternative pure, son amplitude étant déterminée par la remarque précédente.

3.3.3 Analyse des diagrammes

- ☞ Représenter les diagrammes sur papier millimétré semi-logarithmique. Tracer le diagramme asymptotique du gain.
- ☞ Déterminer la fréquence de coupure expérimentale f_c . Comparez avec la fréquence théorique.

3.4 Étude expérimentale du comportement du filtre CR

On s'intéresse maintenant à l'effet du filtre RC sur un signal complexe. Le signal d'excitation $v_e(t)$ est un signal triangulaire de fréquence f_0 , variant entre 0 et $V_m = 1$ V.

- ☞ Donner le développement en série de FOURIER du signal triangulaire.

3.4.1 Cas où $f_0 \ll f_c$

- ☞ Avec le montage précédent, observez la réponse du filtre pour des signaux $v_e(t)$ de fréquences : $f_0 = f_c/20, f_c/10$. Commentez et concluez.

3.4.2 Cas où $f_0 \gg f_c$

- ☞ Avec le montage précédent, observez la réponse du filtre pour des signaux $v_e(t)$ de fréquences : $f_0 = f_c, 5f_c, 10f_c$. Commentez et concluez.
- ☞ Quelle est la forme de la tension de sortie pour $f_0 = 10f_c$? Quelle fonction réalise ce filtre lorsque $f_0 \gg f_c$? Comment peut-on alors écrire sa fonction de transfert?

3.5 Influence de la charge sur le filtre CR

Nous proposons dans ce paragraphe, d'analyser l'influence d'une charge sur les propriétés du filtre CR.

On place en parallèle sur le condensateur du filtre CR utilisé dans les paragraphes précédentes, une charge résistive $R_c = 2,2 \text{ k}\Omega$.

- ☞ Déterminer la nature du filtre (sans tracer le diagramme de BODE). Quelle est la valeur du gain maximal G'_0 ? Mesurer la nouvelle fréquence de coupure f'_c .
- ☞ Conclure sur l'influence de la charge sur les caractéristiques du filtre passif.
- ☞ Quelle modification proposez-vous d'apporter au montage pour éviter ces inconvénients?

4 Filtre RLC série

Le circuit RLC permet, selon le signal de sortie choisi (aux bornes de R , C , L ou une combinaison série ou parallèle) de constituer des filtres de nature différente. Dans ce TP, on se limite à l'étude du filtre RLC série.

4.1 Étude théorique

☞ Établir la fonction de transfert harmonique $\underline{H}(j\omega)$ du montage 2.a. On fera apparaître les grandeurs suivantes : $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ (pulsation propre du signal) et $m = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}$ (coefficient d'amortissement) ou $Q_0 = \frac{1}{2m}$ (facteur de qualité).

☞ Quelle est la nature de ce filtre et son ordre?

☞ Déterminer l'expression théorique de sa ou ses fréquences de coupure, en faisant apparaître les coefficients m et f_0 la fréquence propre du circuit et en déduire sa bande passante Δf . Faire les applications numériques.

☞ Quelle fonction ce filtre réalise-t-il pour des fréquences d'excitation f telles que $f \gg f_0$ ou $f \ll f_0$?

4.2 Étude expérimentale

4.2.1 Présentation

La courbe de résonance du filtre RLC série s'obtient en relevant simultanément $\underline{v}_e(t)$ et $\underline{v}_s(t)$ pour différentes valeurs de fréquence. Il en résulte le traçage du diagramme de BODE et en déduire la nature du filtre, son ordre, la (ou les) fréquence de coupure et la bande passante (Méthode classique).

Dans ce présent TP, on ne trace pas le diagramme de BODE de ce filtre. Mais, on préfère visualiser automatiquement la fonction de transfert à l'oscilloscope et la tracer par la carte d'acquisition et ce pour différents facteurs d'amortissement (ou de qualité).

4.2.2 Wobulateur

Pour visualiser la fonction de transfert $\underline{H}(j\omega)$ directement à l'oscilloscope, en mode XY, il faut pouvoir présenter l'évolution de H non pas en fonction de temps, mais en fonction de la fréquence. Pour cela, on fixe pendant toute la manipulation l'amplitude de $\underline{v}_e(t)$. Par conséquent, on observera seulement les variations de $\underline{v}_s(t)$ avec la fréquence en utilisant un **wobulateur** et un **détecteur de crêtes**.

- ☞ On entre sur la voie X de l'oscilloscope une tension $\underline{v}_i(t)$ image de la fréquence variable du signal d'entrée. Pour cela, on utilise le GBF en Wobulateur interne (touches SWEEP et INT activées), c'est à dire en générateur de tension modulée en fréquence. La loi de variation de cette modulation de fréquence est commandée par une tension $v_i(t)$ qui est par construction, une rampe (tension en dent de scie). La fréquence de v_e varie linéairement (touche LIN activée) dans le temps selon $\underline{v}_i(t)$.
On peut régler la durée de cette rampe (bouton SW FREQ du GBF) et son excursion maximale avant retour à zéro (bouton F MAX du GBF).

4.2.3 Tracé automatique de la fonction de transfert (à l'oscilloscope)

4.2.3.1 Montage

Réaliser le montage suivant.

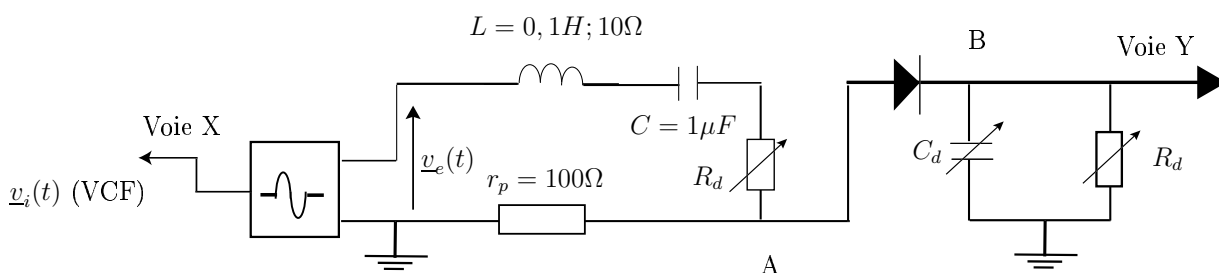


FIGURE 3 – Tracé automatique de la fonction de transfert

- ☞ Visualiser l'allure de la rampe $\underline{v}_i(t)$ sur la voie X de l'oscilloscope. Analyser l'influence des boutons de réglage F_{MAX} et SW_{FREQ} sur l'allure de ce signal.
- ☞ Visualiser la tension $\underline{v}_e(t)$ délivrée par le GBF sur la voie Y de l'oscilloscope. Analyser l'influence des boutons de réglage F_{MAX} et SW_{FREQ} sur l'allure de ce signal.
- ☞ Exciter le montage avec la tension $\underline{v}_e(t)$ et visualiser la réponse $\underline{v}_s(t)$ aux bornes de la résistance de détection $r = 100\Omega$ (voie Y) en fonction de la fréquence commandée par v_i (voie X), en mode XY.

4.2.3.2 Détecteur de crêtes

On peut visualiser une image fidèle de la fonction de transfert du filtre, en redressant $v_s(t)$ et en ne détectant que l'enveloppe de ce signal redressé. On utilise un simple redresseur à diode et d'un circuit de détection à filtre $R_d C_d$ (R_d potentiomètre, C_d boîte à décade) montage.

- ☞ Analyser l'effet du redresseur et du filtrage sur l'allure du signal v_s .
- ☞ Régler convenablement R_d et C_d pour ne plus voir à l'écran de l'oscilloscope, en mode XY, que l'enveloppe de la fonction de transfert du filtre.
- ☞ Faire le réglage nécessaire pour que le spot soit au milieu de l'écran de l'oscilloscope.
- ☞ Faire le calcul nécessaire pour lire directement la fréquence qui vous paraît intéressante.
- ☞ Profiter du montage en changeant les divers paramètres influençant la résonance à savoir C , L et R .

4.2.4 Tracé automatique à l'aide de la carte d'acquisition

- ☞ Une fois les réglages précédents sont correctement réalisés, remplacer l'oscilloscope par la carte d'acquisition.
- ☞ Tracer la courbe de résonance du filtre et en déduire les grandeurs qui vous semblent intéressantes après avoir fait l'étalonnage nécessaire.
- ☞ Comparer les résultats expérimentaux aux ceux théoriques et commenter.

4.3 Association des filtres passifs

L'importance des filtres d'ordre un et d'ordre deux tient dans le fait qu'une association de ces deux ordres