Thème I. Ondes et signaux (Électricité)

TD n°8 Filtrage linéaire — Filtres passifs

Méthode : Comment travailler des exercices ?

Avant la séance de TD :

★ Sur une feuille de brouillon, avec un crayon à la main et le chapitre ouvert sous les yeux.

★ Essayer des « trucs » même si cela n'aboutit pas.

★ Faire des schémas complets et suffisamment grands.

★ Ne rien écrire sur l'énoncé de TD afin de pouvoir refaire les exercices après la correction en classe.

★ Réfléchir environ 10 à 15 min sur chaque exercice demandé. Si vous bloquez complètement sur une question/un exercice, passez à la suite au bout de 10 min, et me poser des questions soit directement soit par mail `nvalade.pcsi@gmail.com` .

Après la séance de TD :

★ Refaire les exercices corrigés ensemble, sans regarder le corrigé dans un premier temps.

★ Une fois l'exercice terminé ou si vous êtes totalement bloqué, reprendre avec le corrigé.

Capacités \ Exercice n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Analyser la décomposition fournie d'un signal périodique en une somme de fonctions sinusoïdales.		✎									
Tracer le diagramme de Bode (amplitude et phase) associé à une fonction de transfert d'ordre 1.				✎			✎				
Utiliser les échelles logarithmiques et interpréter les zones rectilignes des diagrammes de Bode en amplitude d'après l'expression de la fonction de transfert.				✎	✎	✎	✎	✎		✎	
Utiliser une fonction de transfert donnée d'ordre 1 ou 2 (ou ses représentations graphiques) pour étudier la réponse d'un système linéaire à une excitation sinusoïdale, à une somme finie d'excitations sinusoïdales, à un signal périodique.					✎	✎	✎	✎			✎
Choisir un modèle de filtre en fonction d'un cahier des charges.							✎	✎	✎	✎	✎
Expliciter les conditions d'utilisation d'un filtre en tant que moyenneur, intégrateur, ou dérivateur.							✎	✎	✎	✎	✎

Parcours possibles

♪ Si vous avez des difficultés sur ce chapitre : exercices n°1, n°2, n°3, n°4 + cahier d'entraînement :

♪ ♪ Si vous vous sentez moyennement à l'aise, mais pas en difficulté : exercices n°1, n°2, n°4, n°5, n°6.

♪ ♪ ♪ Si vous êtes à l'aise : exercices n°1, n°6, n°8, n°9, n°10.

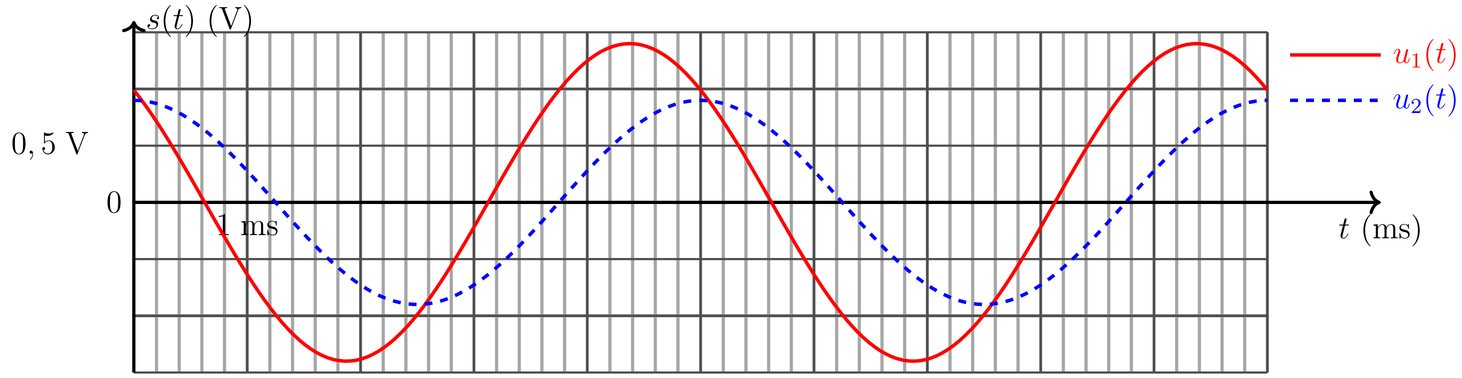
I Exercices d'application directe du cours

Exercice n°1 TP : Mesure d'un déphasage

Q1. Qui de u_1 ou u_2 est en avance sur l'autre ?

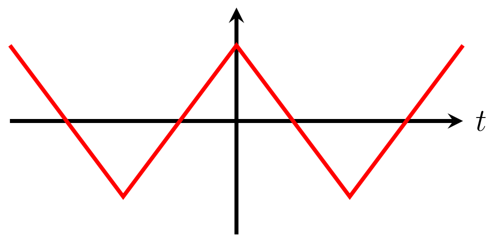
Q2. Quel est le signe du déphasage de u_2 par rapport à u_1 ?

Q3. Déterminer le déphasage de u_2 par rapport à u_1.



Exercice n°2 Spectre d'un signal triangulaire

On étudie un signal triangulaire de période 1 ms, et d'amplitude 0, 5 V.



Le développement en série de Fourier du signal triangulaire est donné par :

$$s(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8A}{((2n-1)\pi)^2} \cos((2n-1)\omega t) \quad \text{avec } \omega = 2\pi f$$

Q1. Quelle est la fréquence du signal triangulaire ?

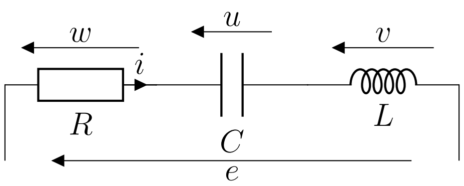
Q2. Quelles sont les fréquences et amplitudes des 4 premiers harmoniques ?

Q3. Tracer le spectre.

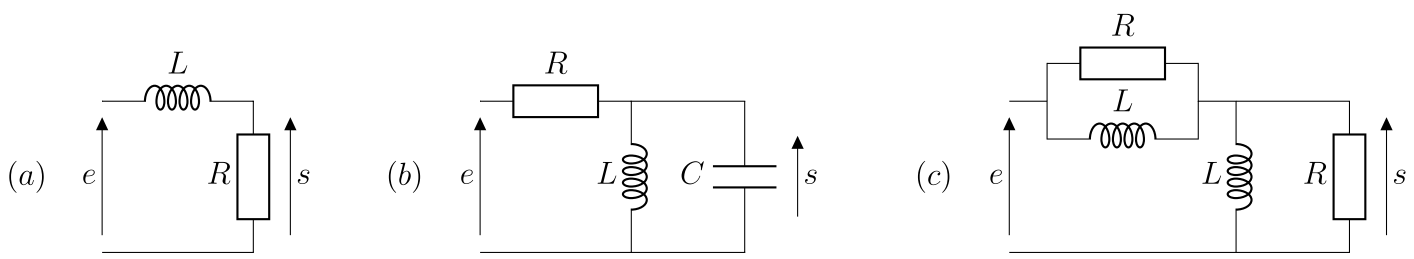
Exercice n°3 Comportements asymptotiques ♪

Q1. À partir des comportements asymptotiques, assigner à chaque grandeur ci-dessous le type de filtre correspondant.

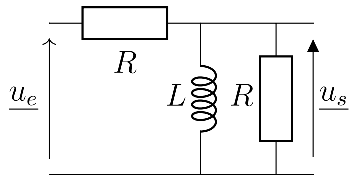
w •	• Passe-bas
u •	• Passe-bande
v •	• Passe-haut



Q2. Pour chacun des circuits ci-dessous, déterminer la nature du filtre.



Exercice n°4 Filtre RL ♪



On étudie le filtre ci-contre constitué d'une résistance $R = 1,0$ kΩ et d'une bobine idéale d'inductance $L = 0,5$ H.

Q1. Déterminer la nature du filtre d'après le comportement asymptotique des dipôles.

Q2. Établir sa fonction de transfert.

Q3. Identifier la ou les affirmations fausses concernant la pulsation de coupure d'un filtre :

- ◯ c'est la pulsation de l'intersection des deux asymptotes du diagramme de Bode en gain ;
- ◯ c'est la pulsation pour laquelle le gain en décibels vaut le gain en décibels maximal diminué de 3 décibels ;
- ◯ c'est la pulsation pour laquelle le gain vaut la moitié du gain maximal.

Q4. Établir l'expression de la pulsation de coupure du filtre étudié. Faire l'application numérique.

Q5. Diagramme de Bode asymptotique

(a) À basse fréquence :

i. Déterminer l'équivalent de la fonction de transfert.

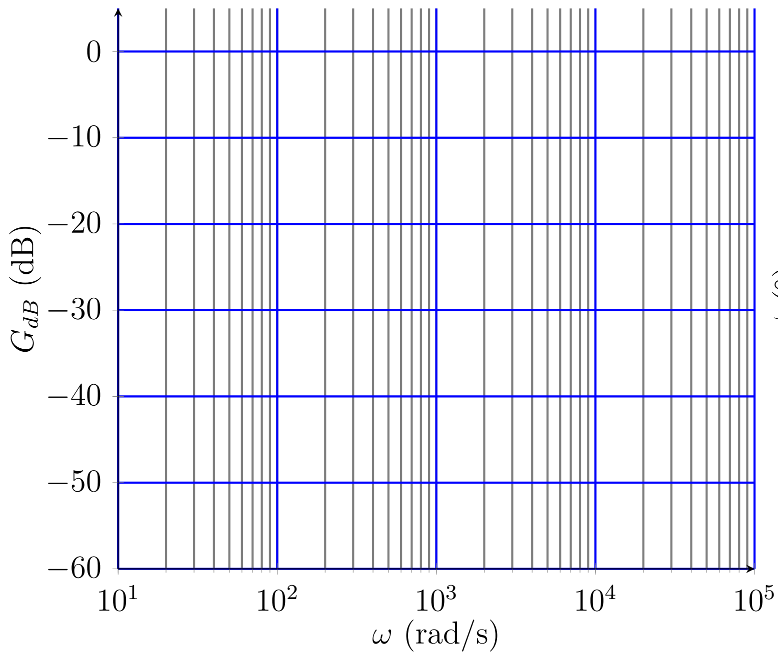
ii. En déduire l'équation de l'asymptote au gain en décibel. Comment est-elle ?

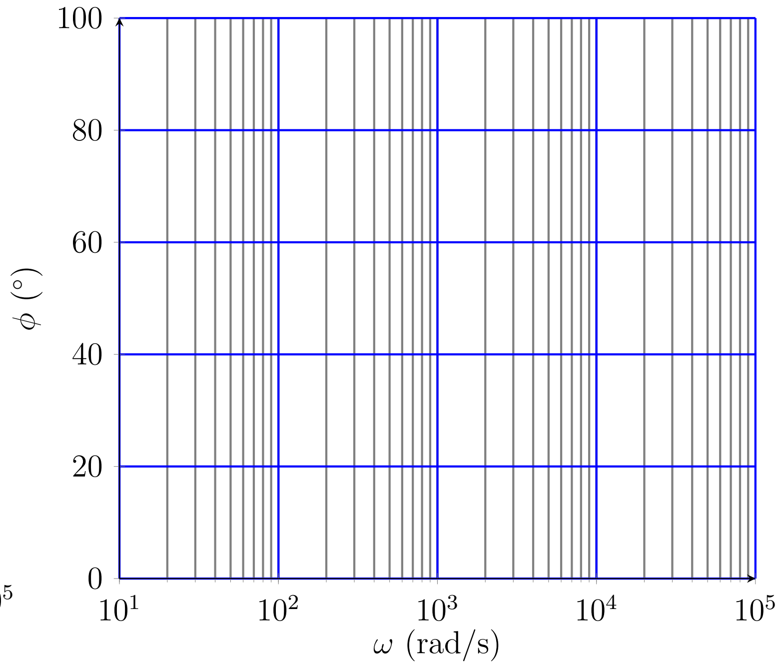
iii. Déterminer l'équation de l'asymptote de la phase.

(b) Faire de même à haute fréquence.

(c) Tracer le diagramme de Bode asymptotique sur le papier semi-log fourni ci-dessous.

Q6. Tracer le diagramme de Bode réel en ajoutant les points essentiels.





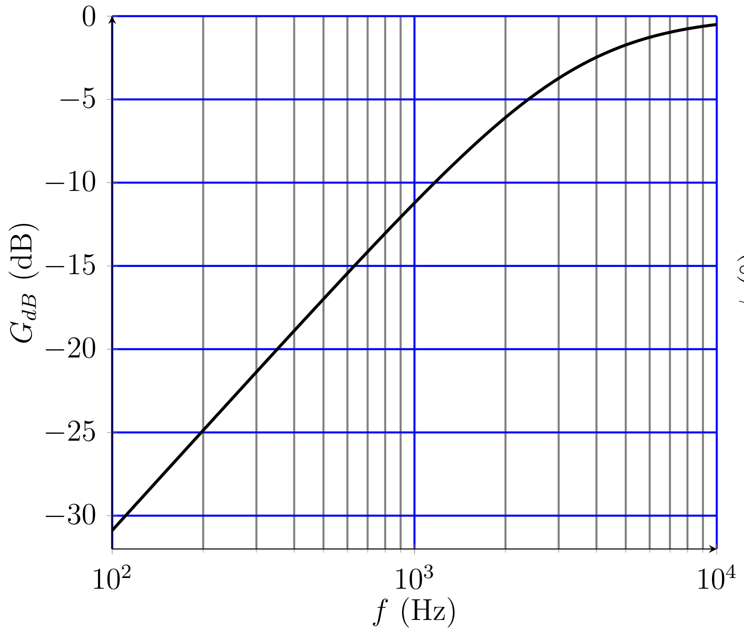
Exercice n°5 Filtrage avant un haut-parleur tweeter ♪ ♪

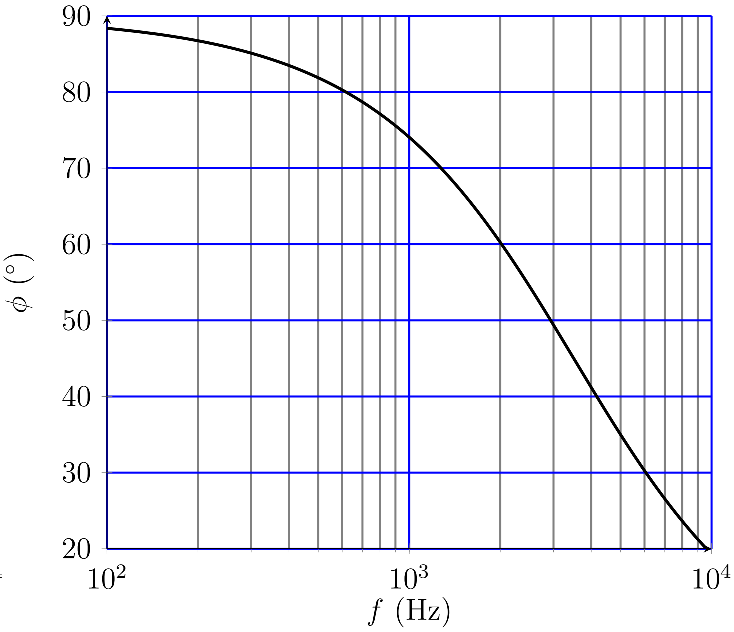
Avant d'envoyer le signal en entrée d'un haut-parleur tweeter chargé d'émettre les sons aigus, on place un filtre passe-haut du premier ordre de fréquence de coupure $f_c = 3500$ Hz.

On en donne la fonction de transfert :

$$\underline{H} = \frac{j\frac{f}{f_c}}{1 + j\frac{f}{f_c}}$$

et son diagramme de Bode :





On modélise le son que l'on souhaite transmettre par la somme de trois signaux sinusoïdaux (le spectre de musique est bien plus complexe, ce qui en donne toute sa beauté, mais l'objectif est de comprendre l'idée...) :

$$u_e = E\cos(2\pi f_1 t) + E\cos(2\pi f_2 t + \pi/4) + E\cos(2\pi f_3 t - \pi/5)$$

avec $f_1 = 587$ Hz (do du milieu du piano) ; $f_2 = 2093$ Hz (do7) ; $f_3 = 4186$ Hz (do8 : dernière touche du piano)

Q1. Représenter le spectre en amplitude de u_e.

Q2. Proposer une écriture générale du signal en sortie du filtre et qui sera envoyée en entrée du haut-parleur.

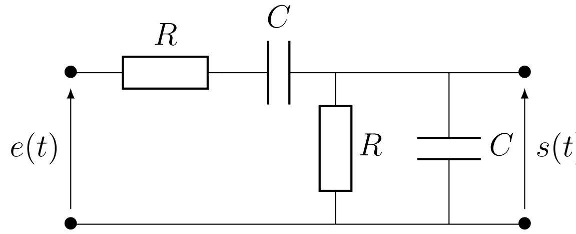
Q3. Déterminer toutes les caractéristiques du signal de sortie.

Q4. En utilisant une autre couleur, superposer sur le spectre de Q1 le spectre en amplitude de u_s.

II Exercices d'approfondissement

Exercice n°6 Filtre de Wien ♪ ♪

On s'intéresse au filtre de Wien représenté ci-dessous.

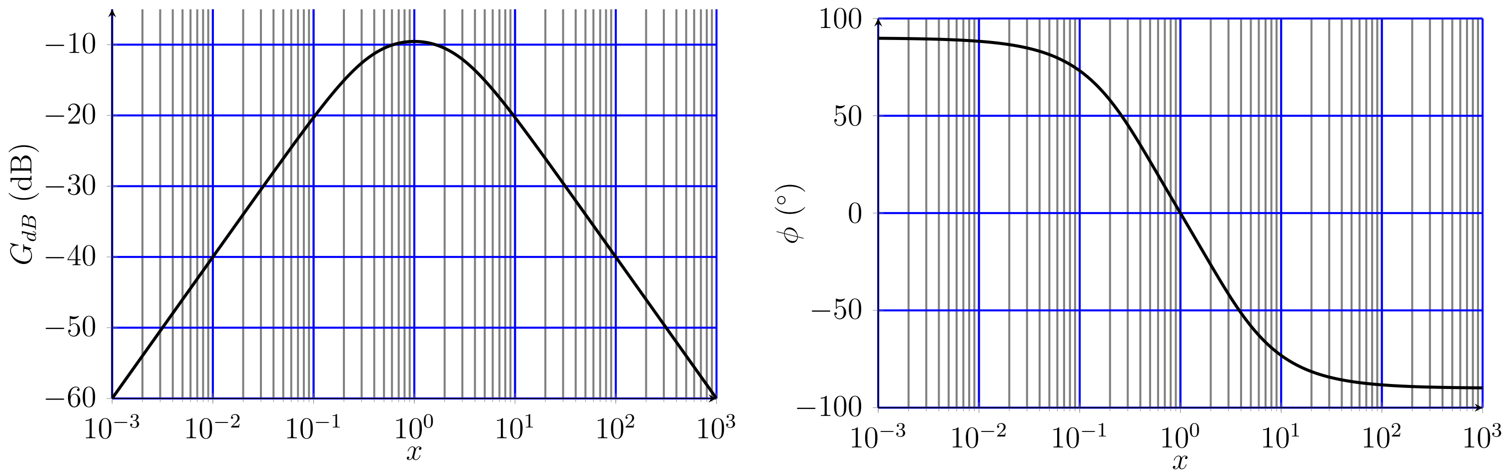


Q1. Par analyse des comportements asymptotiques des dipôles, déterminer le type de filtre dont il s'agit.

Q2. ♪ ♪ Déterminer la fonction de transfert $\underline{H}$ du filtre et l'écrire sous la forme $\underline{H} = \dfrac{H_0}{1 + jQ\left(x - \dfrac{1}{x}\right)}$ où $x = \dfrac{\omega}{\omega_0}$.
Identifier l'expression de ω_0. Quelle valeur commune ont Q et H_0 ? On vérifiera succinctement l'homogénéité.

Q3. Pour quelle pulsation le gain de ce filtre est-il maximal ?
Calculer la valeur maximale du gain. En déduire sa valeur de dB, et calculer le déphasage correspondant.

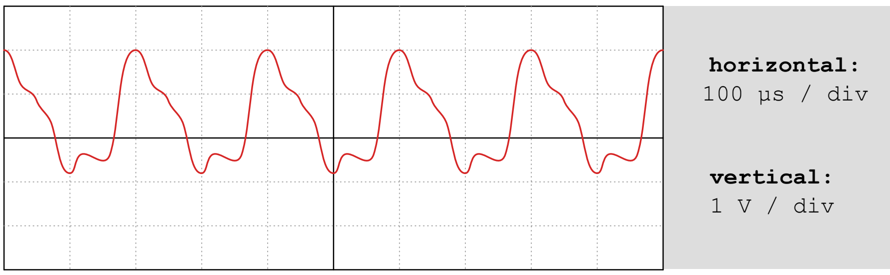
Q4. On donne le diagramme de Bode du filtre de Wien ci-dessous.
En exploitant la fonction de transfert, retrouver les pentes des asymptotes du diagramme de Bode en gain fourni.



Q5. Mesurer graphiquement la largeur en fréquence de la bande passante. Retrouver la valeur du facteur de qualité.

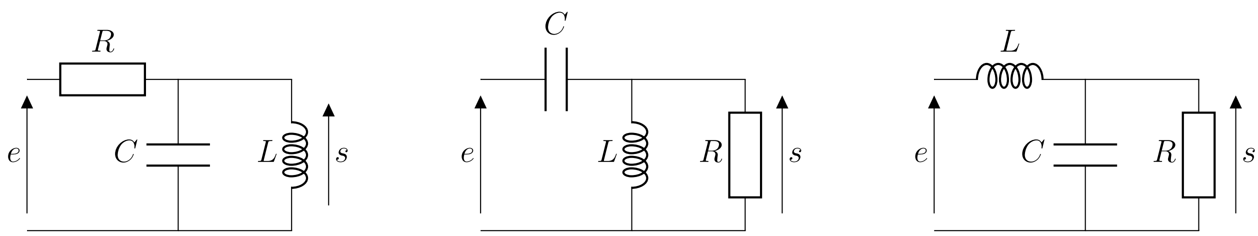
Exercice n°7 Dimensionnement d'un moyenneur ♪ ♪ ♪

Le signal ci-dessous est délivré par un capteur. La grandeur que vous cherchez à mesurer est directement reliée à la valeur moyenne du signal.



Q1. Où se trouve la valeur moyenne d'un signal dans son spectre ?

Q2. En déduire duquel de ces filtres vous avez besoin.



Q3. Exprimer la fonction de transfert et la mettre sous la forme

$$\underline{H} = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + j\frac{\omega}{Q\omega_0}} \qquad \text{avec} \qquad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Donner l'expression du facteur de qualité Q en fonction de R, L et C.

Q4. Tracer le diagramme asymptotique de Bode en amplitude et y faire explicitement apparaître ω_0. Quel rôle joue cette grandeur ?

Q5. Cherchez-vous à produire un phénomène de résonance, ou bien à l'éviter ? En déduire parmi les jeux proposés ci-dessous le plus adapté pour moyenner le signal observé :

Composant	Jeu 1	Jeu 2	Jeu 3
R (Ω)	10	100	1
L (H)	1	10^{-2}	10^{-2}
C (F)	10^{-4}	10^{-2}	10^{-6}

Exercice n°8 Transformation d'un triangle ♪ ♪

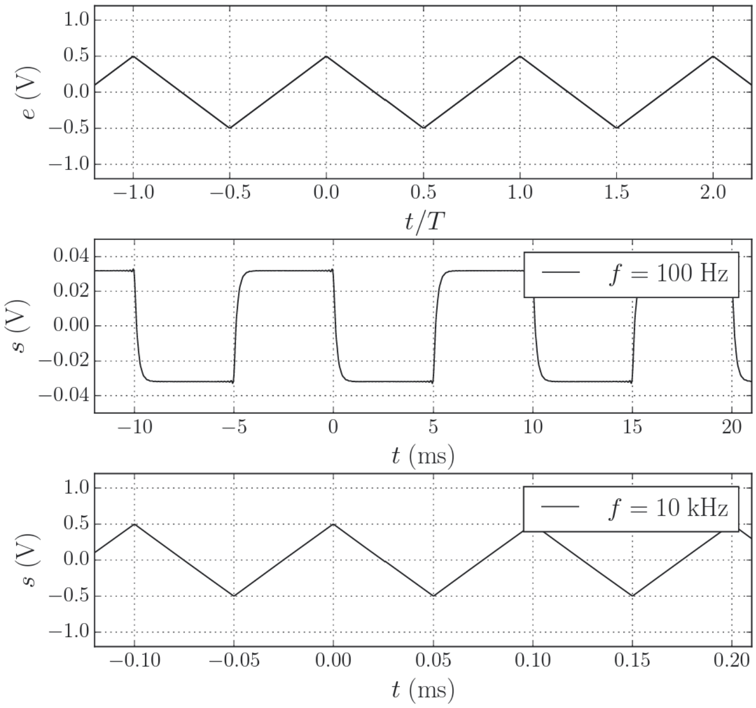
On considère un signal triangle, dont l'allure est représentée ci-après. T représente la période du signal, qu'on pourra faire varier, tout en maintenant l'amplitude constante.
On obtient pour les fréquences $f = 100$ Hz et $f = 10$ kHz les oscillogrammes suivants.

$$\underline{H_1} = \frac{H_0}{1 + j\dfrac{f}{f_c}}$$

$$\underline{H_2} = \frac{H_0 j\dfrac{f}{f_c}}{1 + j\dfrac{f}{f_c}}$$

$$\underline{H_3} = \frac{H_0}{1 + jQ\left(\dfrac{f}{f_c} - \dfrac{f_c}{f}\right)}$$

$$\underline{H_4} = \frac{H_0}{1 + \dfrac{j}{Q}\dfrac{f}{f_c} - \left(\dfrac{f}{f_c}\right)^2}$$



Q1. Quelle opération réalise ce filtre pour $f = 100$ Hz ? et pour $f = 10$ kHz ? En déduire la nature du filtre.

Q2. Parmi les fonctions de transferts suivantes, laquelle choisiriez-vous pour décrire ce filtre ?

Q3. En vous servant des oscillogrammes fournis, déterminer les paramètres inconnus intervenant dans cette fonction de transfert.

Q4. Proposer un montage simple qui permettrait de réaliser ce filtre. On proposera des valeurs pour les composants.

Exercice n°9 Filtre passe-haut ♪ ♪ ♪

On cherche à traiter un signal électrique issu d'un enregistrement musical proche de 300 Hz (plutôt dans les sons graves), bruité par le réseau électrique à 50 Hz que l'on veut filtrer. Plus précisément, on souhaite construire un filtre présentant une atténuation importante à $f_1 = 50$ Hz ($G_{dB}(f_1) \leq -20$ dB), mais la plus faible possible à $f_2 = 300$ Hz ($G_{dB}(f_2) \geq -0,5$ dB).

Q1. On appelle gabarit d'un filtre la traduction graphique sur le diagramme de Bode des contraintes imposées par le cahier des charges, c'est-à-dire une représentation du plan $(G_{dB}, \log(\omega))$ sur laquelle sont matérialisées les zones interdites (à hachurer) du diagramme de Bode.

Le représenter pour le filtre considéré

Q2. Rappeler les pentes des asymptotes d'un filtre passe-haut du premier ordre.

Q3. Un filtre passe-haut du premier ordre peut-il convenir ? Justifier.

Q4. Proposer un montage simple (avec R, L et C) répondant au cahier des charges.

Exercice n°10 Mesure d'un écart de fréquence ♪ ♪ ♪

Le décalage Doppler f_D proportionnel à la vitesse à mesurer est souvent inférieur à 1 Hz et il concerne une onde dont la fréquence initiale est de l'ordre de 10 MHz. La mesure précise de cette minuscule variation est réalisée par détection synchrone.

On considère deux signaux sinusoïdaux $v_1(t) = A\cos(2\pi f_1 t)$ et $v_2 = B\cos(2\pi f_2 t + \varphi_0)$, où A, B et φ_0 sont des constantes, dont on souhaite mesurer l'écart de fréquence $f_2 - f_1$, supposé très inférieur aux fréquences f_1 et f_2. Le montage de détection synchrone qui permet d'y parvenir est représenté schématiquement sur la figure 1 : il est formé d'un multiplieur analogique $\mathcal{M}$ (qui donne une tension de sortie proportionnelle au produit de ses deux tensions d'entrée) et d'un filtre $\mathcal{F}$ dont la nature sera étudiée plus loin.

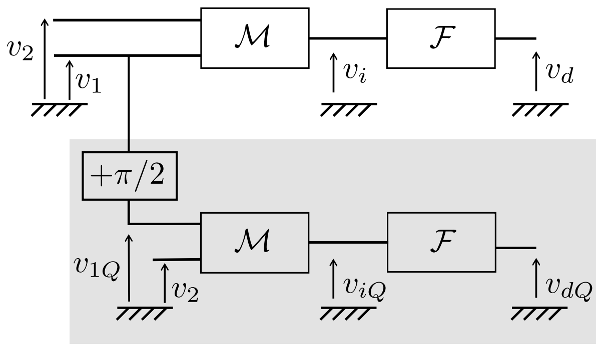


FIGURE 1 – Principe d'un montage de détection synchrone. Jusqu'à la question Q3 incluse, la partie inférieure sur fond gris n'a pas à être considérée.

Q1. Exprimer à un facteur près le signal intermédiaire v_i, puis justifier que son spectre fait apparaître les fréquences $f_2 + f_1$ et $|f_2 - f_1|$. Indiquer le type de filtrage qui permet d'obtenir, à la sortie du filtre, un signal v_d de fréquence $|f_2 - f_1|$.

Le traitement des signaux radars fait intervenir des composants spécifiques aux hautes fréquences. Pour des ultrasons au contraire, avec des fréquences de l'ordre de 10^4 Hz, des composants usuels disponibles dans un lycée (résistances, condensateurs et bobines d'auto-induction) fonctionneraient.

Q2. Proposer pour $\mathcal{F}$ un schéma électrique de filtre passif convenable, sans préciser pour l'instant les valeurs des composants. Un filtre d'ordre 1 est acceptable mais le jury valorisera davantage un filtre d'ordre 2, plus efficace.

Q3. Exprimer la fonction de transfert du montage de la question précédente. Pour $f_1 \approx f_2 \approx 40$ kHz, proposer des valeurs réalistes pour les composants du filtre $\mathcal{F}$.

À l'issue du filtrage, v_d est pratiquement sinusoïdal et mesurer sa fréquence revient à mesurer $|f_2 - f_1|$, ce qui était le but à atteindre.

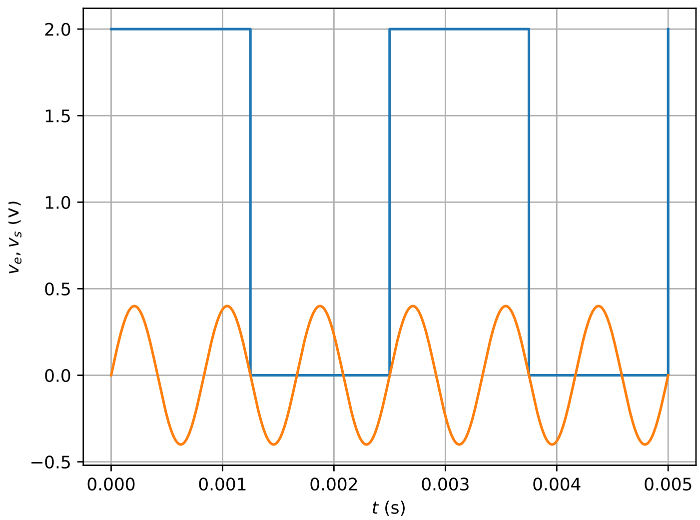
Cependant, dans le cas de l'effet Doppler (où $f_1 = f$ et $f_2 = f_r$), il est important de connaître le signe de $f_2 - f_1$ (pour connaître le sens de déplacement). Pour cela, on complète le montage de la figure 1 par une seconde voie (représentée sur fond gris) dans laquelle on applique des opérations analogues après avoir déphasé v_1 de $+\pi/2$ (démodulation en quadrature).

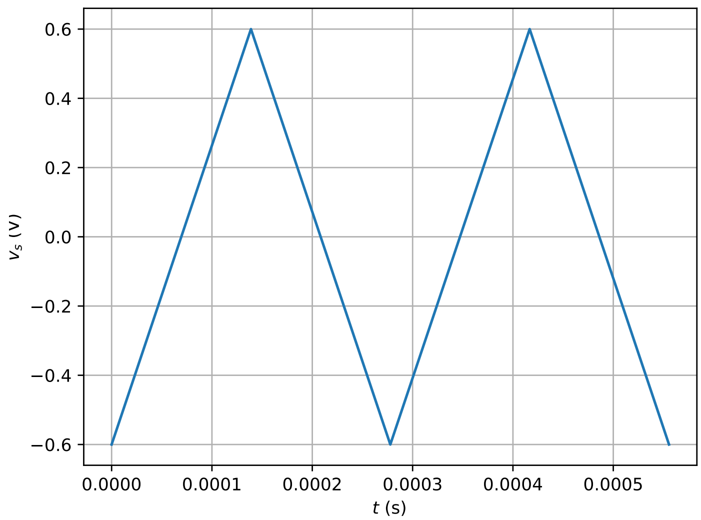
Q4. Dans l'hypothèse d'un filtrage idéal, exprimer le signal v_{dQ} et expliquer comment son observation conjointe à celle de v_d permet d'obtenir le signe de $f_2 - f_1$.

III Résolution de problème

Exercice n°11 Identification d'un filtre

On soumet un filtre à un signal créneau de fréquence 400 Hz puis 3600 Hz, et on obtient les courbes ci-dessous. Déterminer la nature et les caractéristiques du filtre.

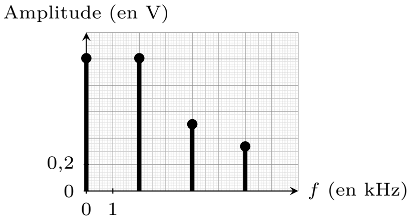
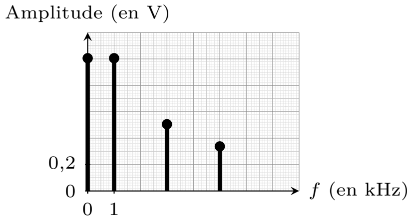
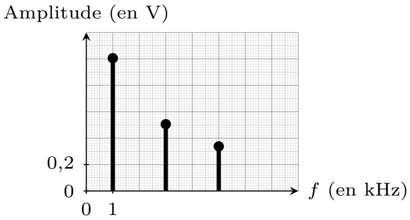
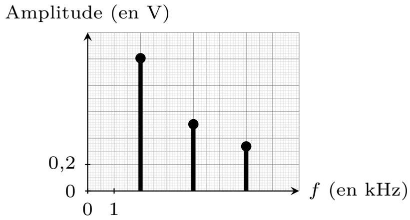




IV Extraits du cahier d'entrainement de physique-chimie

Entraînement 5.8 — Pêle-mêle.

Un étudiant dispose de quatre spectres en amplitude et de quatre signaux. Malheureusement, l'ensemble est mélangé. Pouvez-vous l'aider à associer le bon signal au bon spectre (a, b, c ou d) ?

Spectre a 	Spectre b 
Spectre c 	Spectre d 

Signal n° 1 $A_1\left(\cos(\omega_0 t)+\frac{1}{2}\cos(3\omega_0 t)+\frac{1}{3}\cos(5\omega_0 t)\right)$ avec $A_1 = 1$ V et $f_0 = 1$ kHz	**Signal n° 2** $A_2\left(1+\sin(\omega_0 t)+\frac{1}{2}\sin(2\omega_0 t)+\frac{1}{3}\sin(3\omega_0 t)\right)$ avec $A_2 = 1$ V et $f_0 = 2$ kHz
Signal n° 3 $A_3\Big(\cos((\omega_0-\omega_1)t)+\frac{1}{2}\cos((\omega_0+\omega_1)t) + \frac{1}{3}\cos((\omega_0+3\omega_1)t)\Big)$ avec $A_3 = 1$ V, $f_0 = 3$ kHz et $f_1 = 1$ kHz	**Signal n° 4** $A_4\left(1+\sin(\omega_0 t)+\frac{1}{2}\sin(3\omega_0 t)+\frac{1}{3}\sin(5\omega_0 t)\right)$ avec $A_4 = 1$ V et $f_0 = 1$ kHz

a) Spectre du signal n° 1 .... ☐

b) Spectre du signal n° 2 .... ☐

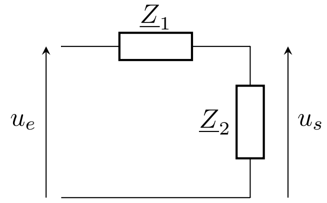
c) Spectre du signal n° 3 .... ☐

d) Spectre du signal n° 4 .... ☐

Fonctions de transfert

Entraînement 5.9 — Filtre passe-bande.

Nous disposons du filtre ci-contre, constitué de deux dipôles dont les impédances complexes sont :



$$\underline{Z}_1 = R + \frac{1}{\mathrm{j}C\omega} \quad \text{et} \quad \underline{Z}_2 = \frac{R}{1+\mathrm{j}RC\omega} \quad \text{avec} \quad C = 47\,\mathrm{nF} \text{ et } R = 1\,\mathrm{k\Omega}.$$

Nous souhaitons écrire la fonction de transfert du filtre $\underline{H}(\mathrm{j}\omega) = \dfrac{\underline{u}_s}{\underline{u}_e}$ sous sa forme canonique :

$$\underline{H}(\mathrm{j}x) = \frac{H_0}{1+\mathrm{j}Q\left(x-\frac{1}{x}\right)} \qquad \text{avec} \qquad x = \frac{\omega}{\omega_0}.$$

a) À l'aide d'un pont diviseur de tension, exprimer $\underline{H}(\mathrm{j}\omega)$ ....

b) Identifier H_0 ....

c) Identifier Q ....

d) Identifier et calculer ω_0 .

De la fonction de transfert au diagramme de Bode

Entraînement 5.11 — Calcul de gain en décibel.

On considère les fonctions de transfert suivantes : $\underline{H}_1 = 3{,}0$ et $\underline{H}_2 = \mathrm{j}\dfrac{\omega}{\omega_0}$ et $\underline{H}_3 = 1 + \mathrm{j}\dfrac{\omega}{\omega_1}$.

Le gain en décibel G_{dB} d'un filtre se détermine à partir de la relation :

$$G_{\mathrm{dB}} = 20\log\big(|\underline{H}|\big).$$

Déterminer le gain en décibel associé aux différentes fonctions de transfert ou combinaisons de fonctions de transfert ci-dessous.

a) $\underline{H}_1$ ....

b) $\underline{H}_2$ ....

c) $\underline{H}_3$ ....

d) $\underline{H}_1 - \underline{H}_2$ ....

e) $\dfrac{\underline{H}_2}{\underline{H}_3}$ ....

f) $\underline{H}_2 \times \underline{H}_3$ ....

Entraînement 5.12 — Calcul de phase.

On reprend les mêmes fonctions de transfert que précédemment : $\underline{H}_1 = 3{,}0$ et $\underline{H}_2 = \mathrm{j}\dfrac{\omega}{\omega_0}$ et $\underline{H}_3 = 1 + \mathrm{j}\dfrac{\omega}{\omega_1}$.

Le déphase φ introduit par un filtre entre les signaux d'entrée et de sortie se détermine à partir de la relation :

$$\varphi = \arg(\underline{H}) = \arctan\left(\frac{\mathrm{Im}(\underline{H})}{\mathrm{Re}(\underline{H})}\right).$$

Déterminer le déphasage associé aux différentes fonctions de transfert ou combinaisons de fonctions de transfert ci-dessous.

a) $\underline{H}_1$ ....

b) $\underline{H}_2$ ....

c) $\underline{H}_3$ ....

d) $\underline{H}_1 - \underline{H}_2$ ....

e) $\dfrac{\underline{H}_2}{\underline{H}_3}$ ....

f) $\underline{H}_2 \times \underline{H}_3$ ....

Entraînement 5.13 — Diagramme de Bode en phase.

On utilise un filtre passe-haut de fonction de transfert $\underline{H}(\mathrm{j}x) = \dfrac{\mathrm{j}x}{1+\mathrm{j}x}$ avec $x = \dfrac{\omega}{\omega_0}$.

Déterminer la valeur du déphasage $\varphi(x) = \arg\big(\underline{H}(\mathrm{j}x)\big)$ du filtre pour des signaux tels que :

a) $\omega = \omega_0$ (la pulsation propre du filtre) ....

b) $\omega \gg \omega_0$ (en hautes fréquences) ....

c) $\omega \ll \omega_0$ (en basses fréquences) ....

Entraînement 5.14 — Calcul de gain.

Pour les fonctions de transfert suivantes, évaluer le gain $G(x) = \left|\underline{H}(\mathrm{j}x)\right|$ pour $x = 1$.

a) $\underline{H}(\mathrm{j}x) = \dfrac{1-\mathrm{j}x}{1+\mathrm{j}x}$ ....

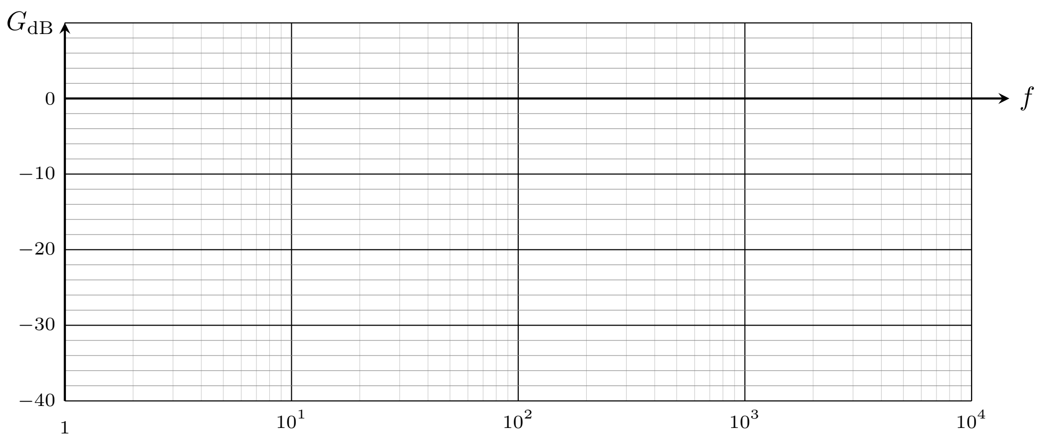
b) $\underline{H}(\mathrm{j}x) = -\dfrac{\mathrm{j}x}{1+\mathrm{j}x}$ ....

c) $\underline{H}(\mathrm{j}x) = \dfrac{1}{1+2\mathrm{j}mx+(\mathrm{j}x)^2}$ avec $m = 2$ ....

Entraînement 5.15 — Tracé sur papier semi-logarithmique.

Un élève souhaite étudier le comportement d'un filtre passe-haut en basses fréquences. Pour cela, il relève les amplitudes des tensions d'entrée et de sortie pour différentes fréquences bien inférieures à la fréquence de coupure du filtre.

Fréquence (en Hz)	200	700	2 000
Amplitude du signal d'entrée ($U_{\text{entrée}}$ en V)	1	1	1
Amplitude du signal de sortie (U_{sortie} en V)	0,04	0,14	0,40



Le gain en décibel est donné par la relation $G_{\text{dB}} = 20\log\left(\dfrac{U_{\text{sortie}}}{U_{\text{entrée}}}\right)$.

Calculer le gain en décibel pour chacune des fréquences et placer le point correspondant sur le graphe ci-dessus.

a) Point A : $f = 200\,\text{Hz}$. ....

b) Point B : $f = 700\,\text{Hz}$. ....

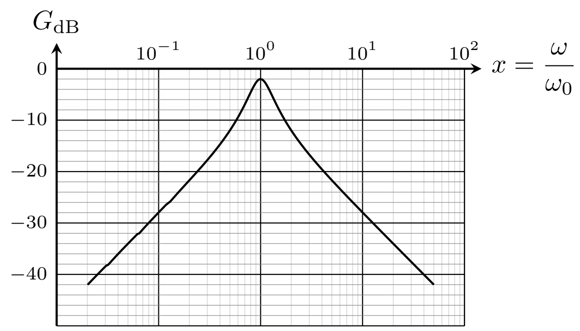
c) Point C : $f = 2\,000\,\text{Hz}$. ....

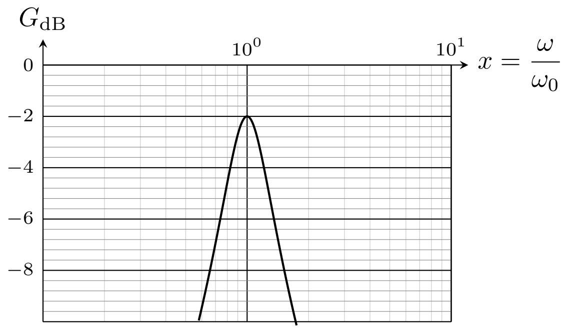
d) Déterminer la pente de la droite passant les points A, B et C. ....

Entraînement 5.16 — Bande passante et facteur de qualité d'un filtre.

On dispose d'un filtre passe-bande de fréquence propre $f_0 = 15\,\text{kHz}$, dont les deux fréquences de coupure à $-3\,\text{dB}$ sont f_{c1} et f_{c2} (avec $f_{c1} < f_{c2}$), et dont la fréquence de résonance est f_r.

Le diagramme de Bode en gain du filtre en fonction de $x = f/f_0$ et un agrandissement sont fournis.





À partir des graphiques donnés ci-dessus, déterminer les différentes grandeurs caractéristiques du filtre.

a) f_r .... ☐ b) f_{c1} .... ☐ c) f_{c2} .... ☐

Réponses mélangées

0 $\quad \frac{1}{2}\cos(a+b) + \frac{1}{2}\cos(a-b)$ $\quad \dfrac{R\mathrm{j}L\omega}{R + \mathrm{j}L\omega - RLC\omega^2}$ $\quad$ (e)

$20\log\left(\dfrac{\omega}{\omega_0}\right) - 10\log\left(1 + \left(\dfrac{\omega}{\omega_1}\right)^2\right)$ $\quad \underline{u}(2 + \mathrm{j}RC\omega) - \underline{u}_s$ $\quad \dfrac{\pi}{2}$ $\quad 1/3$ $\quad \dfrac{\pi}{2} + \arctan\left(\dfrac{\omega}{\omega_1}\right)$

$\dfrac{\frac{1}{3}}{1 + \frac{1}{3\mathrm{j}RC\omega} + \frac{\mathrm{j}RC\omega}{3}}$ $\quad 10\,\text{kHz}$ $\quad \sqrt{a^2+b^2}$ $\quad \dfrac{R(1 - LC\omega^2)}{1 - LC\omega^2 + \mathrm{j}RC\omega}$ $\quad$ (f) $\quad -\arctan\left(\dfrac{\omega}{3\omega_0}\right)$

$19{,}2\,\text{kHz}$ $\quad -8{,}0\,\text{dB}$ $\quad 1/\sqrt{2}$ $\quad \underline{i}_1 + \underline{i}_2$ $\quad 10\log\left(1 + \left(\dfrac{\omega}{\omega_1}\right)^2\right)$ $\quad$ (d)

(a) $\quad R + \dfrac{1}{\mathrm{j}C\omega}$ $\quad 1$ $\quad \dfrac{1}{C\omega}$ $\quad -\pi/2$ $\quad 20\log\left(\dfrac{\omega}{\omega_0}\right) + 10\log\left(1 + \left(\dfrac{\omega}{\omega_1}\right)^2\right)$

$1/3$ $\quad$ (d) $\quad$ (a) $\quad 1/3$ $\quad b/a$ $\quad +20\,\text{dB/décade}$ $\quad 2{,}1 \times 10^4\,\text{rad/s}$ $\quad 1$

$S_0\cos(2\pi f_p t)$

$\pi/2$ $\quad \pi/2$ $\quad +\dfrac{mS_0}{2}\Big(\cos(2\pi(f_p + f_0)t) + \cos(2\pi(f_p - f_0)t)\Big)$ $\quad 0$ $\quad \dfrac{1}{1 + 3\mathrm{j}RC\omega - (RC\omega)^2}$

$\dfrac{\pi}{2} - \arctan\left(\dfrac{\omega}{\omega_1}\right)$ $\quad$ (c) $\quad \arctan\left(\dfrac{\omega}{\omega_1}\right)$ $\quad 9{,}5\,\text{dB}$ $\quad 15{,}0\,\text{kHz}$ $\quad -28{,}0\,\text{dB}$

$mS_0/2$ $\quad 11{,}7\,\text{kHz}$ $\quad \dfrac{R\mathrm{j}L\omega}{R + \mathrm{j}L\omega}$ $\quad 20\log\left(\dfrac{\omega}{\omega_0}\right)$ $\quad mS_0/2$ $\quad \pi/4$ $\quad$ (b) $\quad R$

0 $\quad L\omega$ $\quad 2{,}5\,\text{V}$ $\quad -17{,}1\,\text{dB}$ $\quad \dfrac{1}{RC}$ $\quad 1/4$ $\quad S_0$ $\quad$ (a) $\quad 10\log\left(9 + \left(\dfrac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right)$