

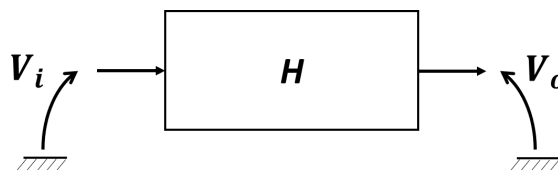
# Fonction de transfert et diagramme de Bode

## 1 Rappels

Avant de voir comment Matlab (Octave) peut nous permettre de rapidement calculer les fonctions de transfert et de simuler son impact, il est nécessaire de faire de brefs rappels sur des concepts essentiels à la compréhension.

### 1.1 Fonction de transfert

La fonction de transfert d'un système électronique (notée  $H$ ) représente le lien entre la tension sortie ( $V_o$ ) et la tension d'entrée de ce système ( $V_i$ ). Elle représente donc la relation exprimant de l'effet de l'entrée sur la sortie.



Dans le domaine fréquentielle, celle-ci est définie par la relation suivante qui correspondrait dans le domaine temporel à un produit de convolution (voir cours d'analyse supérieure).

$$V_o(j\omega) = H(j\omega)V_i(j\omega) \Leftrightarrow H(j\omega) = \frac{V_o(j\omega)}{V_i(j\omega)}$$

L'utilisation du domaine fréquentiel permet d'analyser facilement le comportement du système en fonction de la fréquence (via la transformée de Fourier pour les signaux périodiques ou via la transformée de Laplace si une évolution au cours du temps est à prendre en compte).

#### 1.1.1 Exemples

Ces concepts ont en fait déjà été abordés dans d'autres cours par le passé. En voici quelques exemples.

**Pont diviseur** Dès la première année, nous avons d'une façon déguisée déjà parlé d'une fonction de transfert (celle-ci est évidemment tellement simple qu'il n'y avait aucun intérêt à ce moment-là de l'appeler ainsi).

Soient deux résistances en série  $R_1$  et  $R_2$ , dont la tension appliquée sur les deux est  $V_i$ . Le courant y circulant est donc défini par la loi d'Ohm :  $I = \frac{V_i}{R_1 + R_2}$ . Par la même application de cette loi d'Ohm, la tension aux bornes de  $R_2$  sera  $V_o = R_2 I$ . Ainsi il vient :

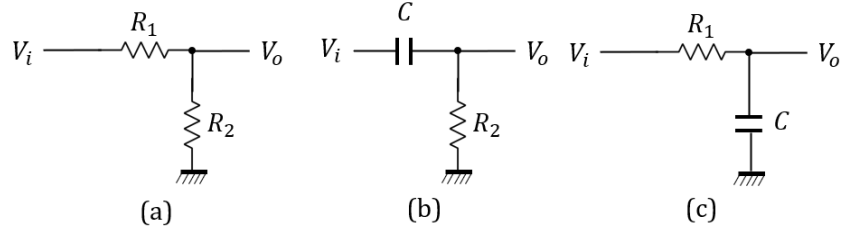


FIGURE 1 – (a) pont diviseur, (b) filtre 1er ordre passe-haut, (c) filtre 1er ordre passe-bas

$$V_o = R_2 \frac{V_i}{R_1 + R_2} \Leftrightarrow H = \frac{V_o}{V_i} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

La particularité ici est que l'impédance d'une résistance est indépendante de la fréquence ce qui rend cette dernière constante.

**Filtre passe-haut et passe-bas** Les impédances qui dépendent de la fréquence sont celles des condensateurs et des self-inductances, qui ont des impédances respectivement égales à  $\frac{-j}{\omega C}$  et  $j\omega L$ . Cela provient de la transformée de Fourier.

$$i_c = C \frac{du_c}{dt} \Rightarrow \bar{I}_c = C j\omega \bar{U}_c \Leftrightarrow \bar{Z} = \frac{\bar{U}_c}{\bar{I}_c} = 0 + j \frac{-1}{\omega C}$$

$$u_L = L \frac{di_L}{dt} \Rightarrow \bar{U}_L = L j\omega \bar{I}_L \Leftrightarrow \bar{Z} = \frac{\bar{U}_L}{\bar{I}_L} = 0 + j\omega L$$

Si nous reprenons le cas du pont diviseur expliqué précédemment, mais que nous remplaçons la résistance  $R_1$  par un condensateur, nous aurions, en utilisant le même raisonnement :

$$H(j\omega) = \frac{R_2}{\frac{1}{j\omega C} + R_2} = \frac{1}{\frac{1}{j\omega C R_2} + 1} = \frac{1}{1 - j \frac{f_c}{f}} \quad (\text{avec } f_c = (2\pi R_2 C)^{-1})$$

Cette fonction de transfert est "complexe" car l'expression de Fourier doit indiquer bien deux informations dans le domaine fréquentiel : l'amplitude et la phase (voir les concepts de la méthode de Fresnel en électricité en alternatif). Etant donné que les composants intervenant sont passifs, nous nous attendons à ce que la fonction de transfert ait une amplitude entre 0 et 1, ce qui se confirme par la fonction de transfert. En outre, étant donné la présence d'un condensateur, il existe un déphasage entre  $V_o$  et  $V_i$ . La représentation de l'évolution du module et du déphasage entre l'entrée et la sortie se représente dans un diagramme de Bode.

Ce montage a déjà été vu en électronique : il s'agit bien entendu de l'équation d'un filtre passe-haut ! D'ailleurs, si nous décidions de remplacer cette fois-ci  $R_2$  par un condensateur  $C$  au lieu de  $R_1$ , nous aurions obtenu un filtre passe-bas :

$$H(j\omega) = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R_1 + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{j\omega C R_1 + 1} = \frac{1}{1 + j\frac{f}{f_c}} \quad (\text{avec } f_c = (2\pi R_1 C)^{-1})$$

Il est à noter qu'en électronique nous parlons souvent de fréquence de coupure ( $f_c$ ). Il s'agit d'une fréquence "mathématiquement esthétique" afin de faire apparaître un rapport de fréquence dans l'équation. Physiquement, si la fréquence de travail est égale à celle de coupure du filtre, l'amplitude est divisée par  $\sqrt{2}$  et le signal de sortie est en retard de  $45^\circ$ . Parfois, on l'utilise pour dimensionner rapidement un filtre : par exemple pour un filtre passe-haut, on considère qu'en dessous de  $f_c/10$  aucune fréquence ne passe ( $H \simeq 0$ ) et au dessus de  $10f_c$  toutes fréquences passent ( $H \simeq 1$ ). Cependant il ne faut jamais considérer la fréquence de coupure comme la limite entre les deux états passant et non-passant : par exemple, si nous sommes à une fréquence entre  $f_c$  et  $10f_c$  pour un filtre passe-bas, nous aurons un signal de sortie non nul dont l'amplitude n'est réduite qu'entre 30 et 99%.

**Gain d'un amplificateur en système bouclé** Si l'amplificateur contient des condensateurs ou des self-inductances, cela signifie que son gain dépend de la fréquence. Nous pouvons donc représenter le comportement du gain sous forme d'une fonction de transfert. Cependant à l'opposé des filtres et du pont diviseur, l'amplitude (module) sera supérieure à 1, étant donné la présence d'un élément amplificateur dans le système (l'amplificateur opérationnel).

Soit le montage présenté en Figure 2 d'un amplificateur inverseur avec une capacité en entrée de montage, nous pouvons le résumer en un montage à deux impédances pour revenir aux calculs habituels de fonction de transfert (voir cours d'électronique de base). Par définition, le gain de ce montage (appelé dès lors  $T$  pour fonction de transfert) est dû au pont d'impédances.

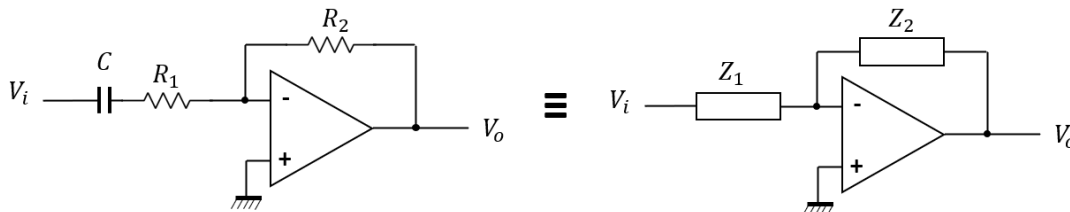


FIGURE 2 – Montage amplificateur inverseur passe-haut.

$$\bar{T}(\omega) = -\frac{\bar{Z}_2}{\bar{Z}_1} = -\frac{R_2}{R_1 + \frac{1}{j\omega C}} = -\frac{j\omega R_2 C}{j\omega R_1 C + 1} = -\frac{R_2}{R_1} \frac{j\omega R_1 C}{j\omega R_1 C + 1} = -\frac{R_2}{R_1} \frac{1}{1 - j\frac{f_c}{f}}$$

Le résultat obtenu pour la fonction de transfert nous indique que le gain vaut maximum  $-\frac{R_2}{R_1}$  (qui est celui de l'amplificateur inverseur sans le condensateur). La seconde partie du résultat est identique à l'équation d'un filtre passe-haut que nous avons démontré précédemment. Cette technique fonctionne pour tout montage mais il n'est pas toujours facile de mettre en évidence, dans l'équation, celle d'un filtre passe-bas ou passe-haut. C'est pourquoi le recours au tracé du diagramme de Bode est intéressant.

**Limite en fréquence d'un amplificateur opérationnel** Il est important de noter que dans l'expression de la fonction de transfert au paragraphe précédent n'est pas pris en compte la limite en fréquence de l'amplificateur opérationnel lui-même. En effet, comme il va être vu au cours théorique, l'amplificateur opérationnel voit la valeur de son gain  $A$  (supposé infini) chuter avec la fréquence ce qui réduit les performances du système à haute fréquence.

Cette limite d'utilisation de l'amplificateur opérationnel apparaît dans la fonction de transfert sous la forme d'un filtre "passe-bas" dont les paramètres dépendent de l'amplificateur opérationnel choisi ( $f_{TA}$  : la fréquence de transition, donnée dans les fiches techniques généralement sous le nom "Unity gain bandwidth") et du taux de réaction du système (noté  $B$ ).

$$T_r(\omega) = T(\omega) \frac{1}{1 + j \frac{\omega}{2\pi B f_{TA}}}$$

Le taux de réaction  $B$  correspond la proportion du signal de sortie  $V_o$  qui intervient dans la contre-réaction et est donc dépendant du gain. Augmenter le gain diminue le taux de réaction et donc la fréquence de coupure introduite par l'amplificateur opérationnel (qui sera donc une fréquence de coupure haute du gain), ce qui réduit donc la bande passante du système amplificateur (il faut donc faire un compromis entre le "gain" et la "bande passante"). Le calcul du taux de réaction est défini dans un autre document ("*Détermination du taux de réaction d'un système à ampli op*") : il découle de l'application du théorème de superposition.

Pour notre montage en Figure 2, le taux de réaction est  $B \simeq \frac{R_1}{R_1 + R_2}$  quand nous sommes dans la bande passante puisque l'effet capacitif du filtre passe-bas n'est plus à prendre en compte. Ainsi le montage complet a la fonction de transfert suivante ( $f_{cL} = (2\pi R_1 C)^{-1}$  : la fréquence de coupure basse due au filtre passe-haut du montage ;  $f_{cH} = B f_{TA}$  : la fréquence de coupure haute due à l'AOp) :

$$T_r(f) = -\frac{R_2}{R_1} \frac{1}{1 - j \frac{f_{cL}}{f}} \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_{cH}}}$$

Cette équation sera exploitée en section 2.1 afin de tracer le diagramme de Bode de ce montage via Octave.

## 1.2 Théorème de Fourier

Le théorème de Fourier, pour le résumer simplement, stipule qu'un signal périodique peut être décomposé en une somme infinie de sinusoïdales d'amplitudes et de phases différentes. Cela signifie donc que tout signal périodique est équivalent à une somme de signaux sinusoïdaux (appelée série de Fourier). Ainsi selon Fourier un signal périodique peut donc être représenté comme la mise en série de générateur sinus dont les fréquences sont multiples. Mathématiquement la transformée de Fourier d'un signal périodique peut donc s'exprimer ainsi ( $S_{DC}$  est la composante continue -qui correspond donc à une fréquence nulle-) :

$$S = S_{DC} + \sum_{n=1}^{\infty} S_n \sin(n \omega_0 t + \varphi_n)$$

La preuve en image (pour lancer l'animation, cliquez sur la figure 3 ci-dessous<sup>1</sup>) : à gauche le tracé du signal dans le domaine temporel, à droite l'amplitude de ses composantes harmoniques. On voit bien qu'en additionnant les sinus les un après les autres, nous nous rapprochons bien d'un signal carré. Malheureusement, nous n'arriverons pas au signal carré parfait car nous nous sommes arrêtés aux 100 premières harmoniques. Les amplitudes de chacun des sinus sont obtenues en appliquant la transformée de Fourier sur un signal carré.

FIGURE 3 – Réalisation d'un signal carré de 1Hz à partir de sa série de Fourier.

L'abscisse des séries de Fourier est généralement exprimée en Hertz (ou plus rarement en rad/s) qui représente la fréquence du sinus qui lui correspond ( $\sin(2\pi f t)$  ou, si exprimé en rad/s, il s'agit directement de la pulsation  $\omega = 2\pi f$ ). Notons que le développement de la série de Fourier spécifie que chacune des pulsations correspond à un multiple de la première : cette première fréquence est appelée "fondamentale" et les suivantes sont les harmoniques (la fréquence de  $3 f_0$  est appelée la 3ième harmonique de la fondamentale  $f_0$ . Dans la Figure 3, l'abscisse indique bien la fondamentale comme l'harmonique 1 et va jusqu'à la 100ième harmonique).

### 1.2.1 Analyse de la réponse d'un système à un signal périodique de forme quelconque

Etant donné que les fonctions de transfert dépendent de la fréquence, cela signifie que l'effet du système est différent pour chaque composante du signal d'entrée. Pour analyser la

---

1. Cela ne marche qu'avec un logiciel lecteur de pdf.

réponse d'un système, il faut donc décomposer le signal d'entrée en ses différentes composantes, réaliser le produit pour en trouver les composantes du signal de sortie. L'addition de ces composantes sinusoïdales permet alors de trouver le signal de sortie complet. Cette décomposition n'est autre que la transformée de Fourier et l'addition des résultats la transformée de Fourier inverse. Le signal de sortie peut donc s'écrire sous la forme suivante :

$$S_o = H_{DC} S_{DC} + \sum_{n=1}^{\infty} H(n \omega_0) S_n \sin(n \omega_0 t + \varphi_n + \varphi_H(n \omega_0))$$

Dans les deux formulations du signal d'entrée et de sortie présentées dans cette section, nous introduisons les phases  $\varphi_n$  et  $\varphi_H$ . Il s'agit respectivement de la phase de la  $n$  harmonique du signal d'entrée et du déphasage appliquée par le système qui dépend donc également de l'harmonique considérée. Les amplitudes ( $S_n$  et  $H(n)$ ) et les phases ( $\varphi_n$  et  $\varphi_H(n)$ ) peuvent être représentées en fonction de la fréquence sur un diagramme de Bode (il y en aura donc trois lors de l'analyse d'un système : celui du signal d'entrée, de la fonction de transfert et du signal de sortie).

### 1.3 Diagramme de Bode

Les fonctions de transferts sont des fonctions dites "complexes" : le terme en  $j$  représente l'ordonnée du "vecteur" représentant la sinusoïde considérée<sup>2</sup>. Ainsi pour une pulsation définie la fonction de transfert donne deux informations : le ratio en amplitude sortie sur entrée ( $\frac{V_o}{V_i}$ ) et le déphasage  $\Delta\varphi = \varphi_o - \varphi_i$  qui sont respectivement la magnitude  $|H(\omega)|$  et la phase  $\arctan\left(\frac{\mathcal{I}(H(\omega))}{\mathcal{R}(H(\omega))}\right)$ .

Le diagramme de Bode est un diagramme qui représente cette magnitude et ce déphasage en fonction de la fréquence afin d'avoir une lecture globale de cette fonction de transfert. Par habitude, l'amplitude est exprimé en décibel ( $20 \log |H(\omega)|$ ) et les fréquences sont indiquées sur une échelle logarithmique pour une meilleure lisibilité. En Figure 4, est représenté le diagramme de Bode d'un filtre passe-bas du premier ordre (voir 1.1.1).

Nous voyons bien que le diagramme de Bode de la Figure 4 est celui d'un filtre passe-bas car :

- A basse fréquence ( $f \rightarrow 0$ ), l'amplitude est  $\sim 0$  dB, soit  $|H| \simeq 1$ , et le déphasage est de  $0^\circ$ . Il n'y a donc pas de chute de tension, ni de déphasage :  $V_o = V_i$ .
- A haute fréquence ( $f \rightarrow \infty$ ), l'amplitude tend vers  $-\infty$  dB, soit  $|H| \rightarrow 0$  (et  $\varphi \rightarrow -90^\circ$ ). Il n'y a donc rien qui passe pour ces fréquences, on a  $V_o = 0$ .

Dans le cas où notre signal d'entrée est composé de plusieurs sinus (par application du théorème de Fourier par exemple, voir 1.2), il faut donc regarder l'effet de chaque harmonique dans le diagramme de Bode pour avoir le comportement de la fonction de transfert pour chacune de celles-ci (modification de l'amplitude et de la phase de chacun des sinus). En Figure 5 est représenté la construction du signal de sortie  $V_o$  si le signal d'entrée  $V_i$  est

---

2. En électricité, la partie "imaginaire" d'une impédance représente la partie réactive provoquant un déphasage de  $90^\circ$ .

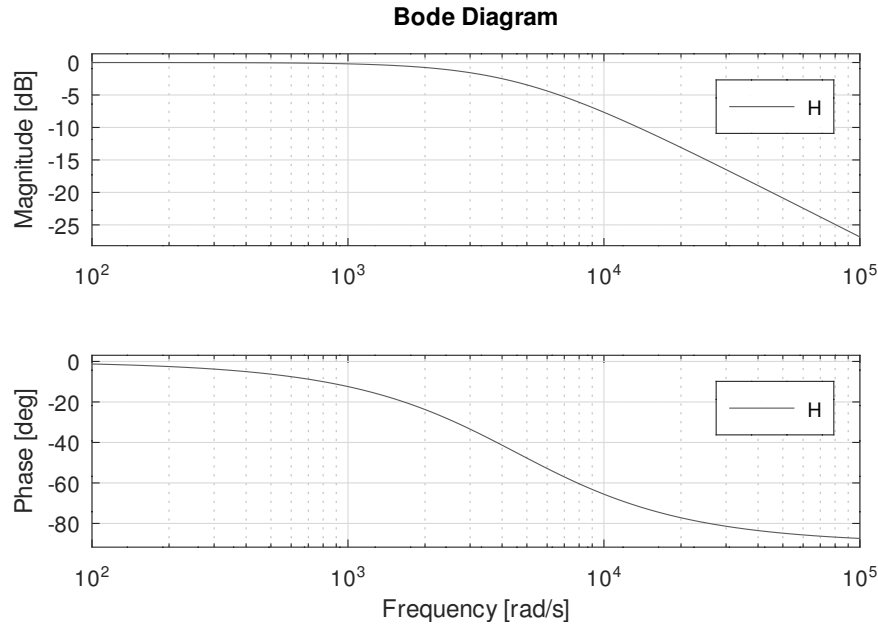


FIGURE 4 – Exemple d’un diagramme de Bode d’un filtre passe-bas du premier ordre dont  $f_c = 720$  Hz.

un signal carré de 10Hz entre 0 et 1V à travers un filtre passe-bas dont la fréquence de coupure est de  $10 \text{ Hz}^3$  : pour chaque harmonique calculée par Fourier, nous regardons dans le diagramme de Bode le gain et le déphasage appliqué par le filtre. Les sinus sortant du filtre ont donc chacun leur amplitude multiplié par le gain et leur phase en ajoutant le déphasage. Il ne reste plus qu’à tous les additionner pour reconstruire le signal de sortie (ce qui revient à effectuer la transformée de Fourier inverse).

## 2 Calculs sur Octave

Il existe une bibliothèque qui contient des fonctions toutes faites pour tracer le diagramme de Bode et simuler le signal de sortie après avoir subi l’effet de la fonction de transfert. Celle-ci s’appelle ”control” : elle sert notamment aux calculs de régulation et de boucle de retour (voir cours de régulation de première master).

Matlab charge au démarrage toute une série de bibliothèques dont ”control” ce qui rend son démarrage assez long. Octave ne charge que les nécessaires, il faut donc lui faire charger cette bibliothèque avant de lancer le script avec la commande suivante (elle peut être également mise en début de script pour ne plus devoir le faire manuellement) :

```
pkg load control
```

Normalement, la bibliothèque ”control” est installée lors de l’installation de Octave. S’il s’avère que l’interpréteur ne la trouve pas au chargement, il est possible de l’installer manuellement via la fenêtre de commande CLI. Si nous voulons tracer des signaux spécifiques

---

3. Au laboratoire d’électronique et mesure, une expérience similaire a été réalisée avec un autre filtre.

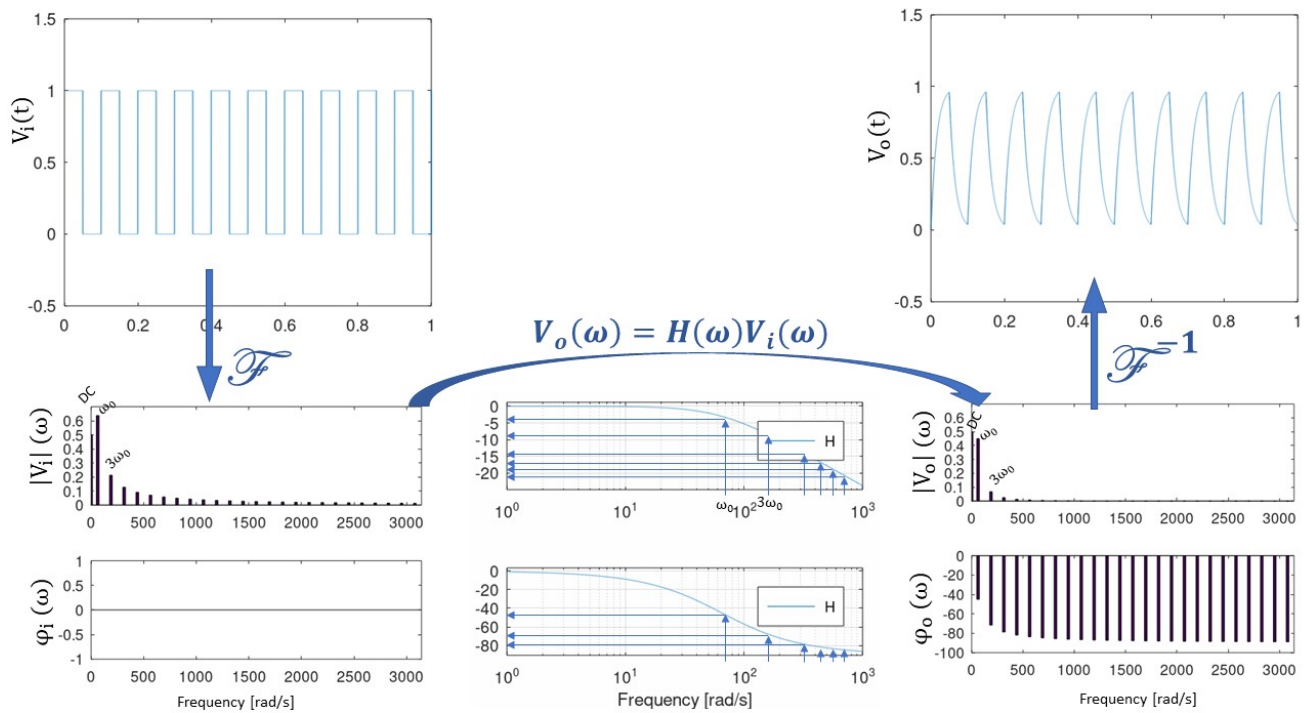


FIGURE 5 – Calcul de  $V_o$  pour un signal  $V_i$  carré 10 Hz 0 à 1V à travers un filtre passe-bas de  $f_c = 10 \text{ Hz}$ .

comme des signaux carrés, il existe également une bibliothèque : "signal". Elle n'est pas importée non plus par défaut dans Octave.

## 2.1 Fonction de transfert et diagramme de Bode

La bibliothèque "control" fournit la fonction "tf" (initiales de "transfer function") qui nous permet de créer un objet fonction de transfert. Elle demande deux vecteurs (au minimum) qui indiquent les coefficients des polynômes du numérateur et dénominateur.

$$[a_n \dots a_2 a_1 a_0] \Rightarrow a_n(j\omega)^n + \dots + a_2(j\omega)^2 + a_1(j\omega) + a_0$$

Ainsi, un filtre passe-bas, dont l'équation générale de la fonction de transfert est  $H(\omega) = \frac{1}{1+j\omega RC}$ , s'écrira sous la commande<sup>4</sup> :

$$H = \text{tf}(1, [R*C \ 1])$$

S'il n'y a pas de point-virgule, Octave indiquera alors dans la fenêtre de commande ('s' représentant  $j\omega$  et, dans le cas ici, 0.0154 le produit  $RC$ <sup>5</sup>) :

Transfer function 'H' from input 'u1' to output ...

4. doc : <https://www.mathworks.com/help/control/ref/tf.html>

5. qui n'est autre que la constante de temps, voir cours d'électricité de base



$$y1: \frac{1}{0.0154 s + 1}$$

Continuous-time model.

Vu les paramètres demandés par la fonction 'tf', il est nécessaire de préalablement transformer notre fonction de transfert pour la mettre sous forme de polynôme de  $j\omega$ . Il est cependant important de noter que le paramètre  $s$  n'est pas le  $j\omega$  de Fourier mais le  $p$  de Laplace (la fonction 'tf' est une transformée de Laplace et non de Fourier). Les termes  $p$  et  $j\omega$  ne sont pas, par définition, identiques. Cependant, si les signaux sont périodiques et que le système est en régime établi, ils sont égaux (ce qui est bien sur le cas d'une fonction de transfert)<sup>6</sup>.

S'il y a plusieurs montages successifs, par application de la définition de la fonction de transfert, la fonction de transfert de l'ensemble est le produit de toutes les fonctions de transfert successives. Cela est facilement réalisable avec l'objet fonction de transfert (Htot est la fonction de transfert de tout le montage) :

$$\begin{aligned} H1 &= \text{tf}(N1, D1); \\ H2 &= \text{tf}(N2, D2); \\ G &= 4; \\ H_{\text{tot}} &= G * H1 * H2; \end{aligned}$$

Il nous est désormais possible de tracer son diagramme de Bode via la commande suivante<sup>7</sup> pour obtenir une figure similaire à celle présentée en Figure 4 :

bode(H)

Si nous reprenons l'exemple du montage "amplificateur inverseur passe-haut" dont nous avons démontré l'équation du gain (de la fonction de transfert) en section 1.1.1. Voici un script que nous aurions pour tracer le diagramme de Bode montré en Figure 6.

$$T_r(\omega) = -\frac{R_2}{R_1} \frac{j\omega R_1 C}{j\omega R_1 C + 1} \frac{1}{1 + j \frac{\omega}{2\pi \frac{1}{B} f_{TA}}} = -\frac{R_2}{R_1} \frac{j\omega R_1 C}{j\omega R_1 C + 1} \frac{2\pi R_1 f_{TA}}{2\pi R_1 f_{TA} + j\omega(R_1 + R_2)}$$

$$\begin{aligned} R1 &= 10e3; \\ R2 &= 100e3; \\ C &= 20e-9; \end{aligned}$$

$$f_{TA} = 3e6;$$

$$\begin{aligned} H1 &= -1 * R2 / R1; \\ H2 &= \text{tf}([R1 * C \ 0], [R1 * C \ 1]); \end{aligned}$$

6.  $p = \sigma + j\omega$  donc si  $\sigma = 0$  alors  $p = j\omega$  ( $\sigma$  représentant l'évolution en phase transitoire qui est forcément nul pour un signal périodique)

7. doc : <https://www.mathworks.com/help/ident/ref/lti.bode.html>

```
H3 = tf(2*pi*R1*fta , [R1+R2 2*pi*R1*fta ] );
```

```
T = H1*H2*H3;
```

```
bode(T)
```

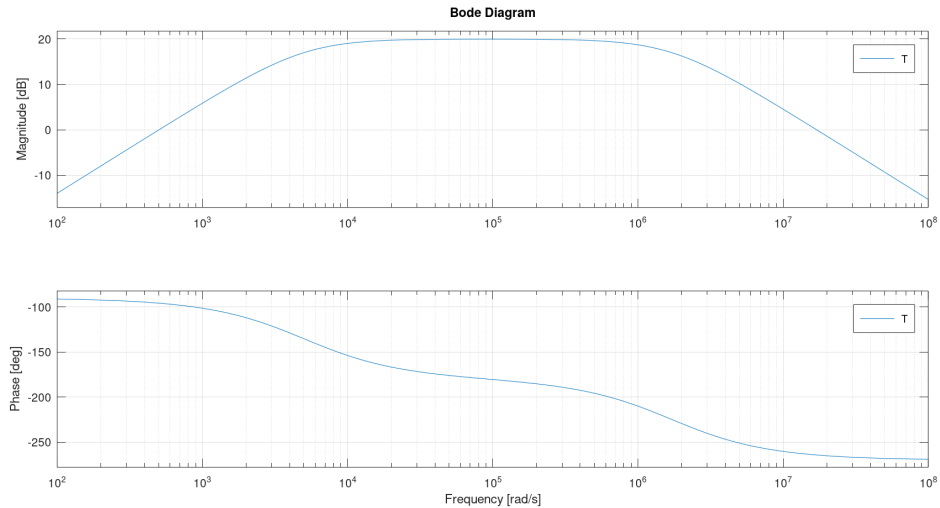


FIGURE 6 – Diagramme de Bode d’un montage à amplificateur inverseur passe-haut.

Le diagramme de Bode nous montre que le gain de -10 est assuré avec un déphasage nul qu’autour des 15kHz (il est mis un déphasage de -180° mais ceci représente bien l’inversion désirée qui n’est pas donnée par la magnitude). Il est intéressant de remarquer aussi que ce montage n’amplifie réellement que approximativement entre 80Hz et 2.7MHz (zone où on a une magnitude plus grande que 0 dB). En dehors de cet intervalle, il agit comme atténuateur.

## 2.2 Signal en sortie

La bibliothèque "control" nous permet également de tracer le signal de sortie  $V_o(t)$  en fonction du signal d’entrée  $V_i(t)$  et de la fonction de transfert du montage  $H(\omega)$  via la fonction "lsim"<sup>8</sup>. Elle n’effectue pas la même méthode que décrite en Figure 5 car, même si pour nous il s’agit de la méthode la plus simple, elle n’est pas la plus rapide numériquement. Cette fonction a besoin des points constituant le signal d’entrée, soit un vecteur  $V_i$  contenant les amplitudes et  $t$  les instants  $y$  correspondant (les vecteurs  $V_i$  et  $t$  sont donc de même taille qui dépend de la fréquence d’échantillonnage).

```
lsim(H, Vi, t)
```

Cette fonction trace directement un graphique représentant le signal d’entrée  $V_i$  et celui de sortie  $V_o$  en fonction du temps (exemple présenté en Figure 7) mais renvoie également les amplitudes de  $V_o$  pour chaque élément du vecteur  $t$ . Il est cependant important de noter que, si les conditions initiales ne sont pas données (ce qui est le cas ici), la réponse part du

8. doc : <https://www.mathworks.com/help/control/ug/plotting-system-responses.html>

point (0,0). Il faut alors prolonger les vecteur  $V_i$  et  $t$  afin de s'assurer de voir la réponse  $V_o$  en régime stationnaire.

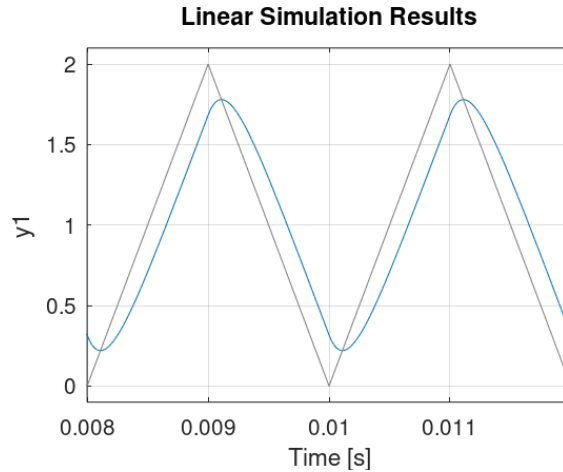


FIGURE 7 – Signal de sortie (en bleu) d'un filtre passe-bas du 1er ordre à  $f_c = 1\text{kHz}$  à un signal triangulaire 0-2V de 500 Hz en entrée (en gris).

Reprenons encore une fois l'exemple de notre montage "amplificateur inverseur passe-haut" avec les éléments déterminés aux sections 1.1.1 et 2.1, au quel on applique en entrée un signal triangulaire de 1.5 à 2.5V de 10kHz. Nous voyons en sortie que seule la partie alternative est amplifiée dû à l'effet "passe-haut" du montage, et que le signal est légèrement déformé car il y a des harmoniques atténuées, en hautes fréquences principalement (dû à la limite en fréquence de l'amplificateur opérationnel).

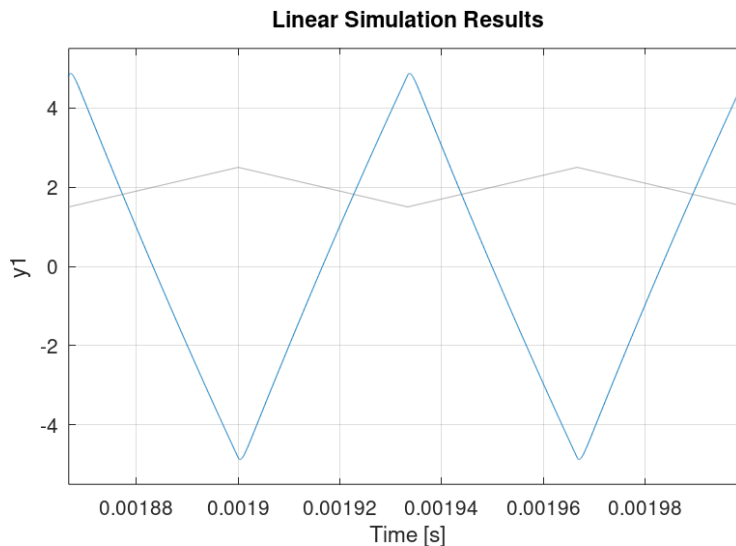


FIGURE 8 – Signal en sortie (en bleu) d'un montage "amplificateur inverseur passe-haut", dont l'entrée est un signal triangulaire 0.5V 10kHz avec offset de 2V (en gris).

## 2.3 Transformée de Fourier

Il est également possible de calculer le spectre d'un signal. Il existe différentes méthodes numériques pour y arriver mais la plus connue est la `fft` (pour "fast Fourier transform") dû à sa rapidité d'exécution. Il est important de savoir que cette fonction sous Octave renvoie un vecteur de nombres complexes sur le nombre de points donnés du signal. Pour calculer l'amplitude, il faut donc diviser par le nombre de points du signal et prendre la valeur absolue. Il ne faut pas oublier non plus que mathématiquement le spectre est symétrique, alors qu'en pratique on utilise pas les fréquences négatives. Ainsi il ne faut prendre que la moitié du vecteur et multiplier l'amplitude par 2 pour comptabiliser les deux sinus symétriques (sauf l'amplitude en continu qui n'existe qu'une seule fois dans le spectre). Ci-dessous un exemple de script pour obtenir la transformée de Fourier  $Fy$  d'un signal  $S$  calculé à partir d'un vecteur temps  $t$ .

```
Y = fft (S);  
L = length (t);  
P1 = abs(Y/L);  
Fy = P1 (1:L/2+1);  
Fy (2:end-1) = 2*P1 (2:end-1);
```

Il est intéressant aussi de noter que l'oscilloscope peut réaliser aussi une `fft`. Dans le mode "math", il y a une option pour tracer le spectre du signal pris sur un canal (ceux du B118 ne peuvent faire qu'un canal à la fois). Il est alors possible d'exporter le spectre sous forme de fichier Excel ou CSV.