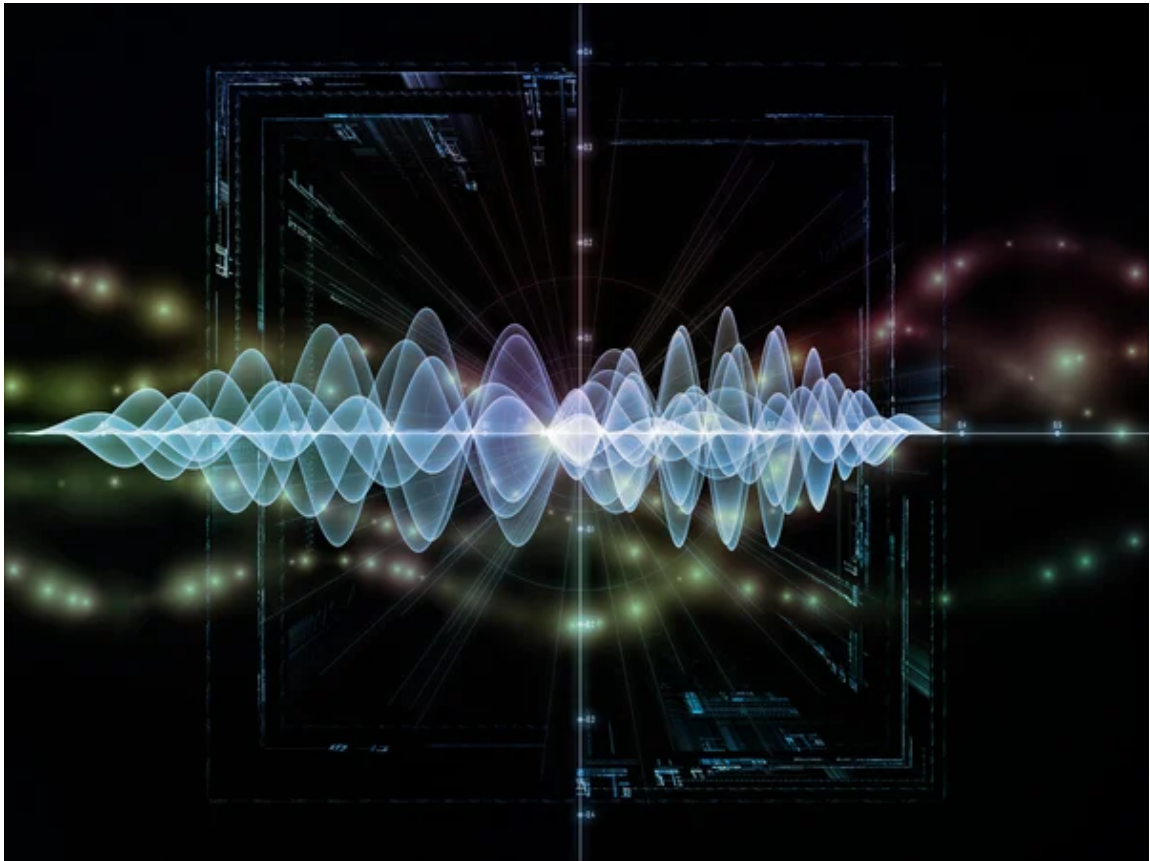


Escape No Game



Livable 2 : Etude de la réponse fréquentielle et filtrage

Sommaire

1] Conception d'un Filtre Fréquentiel Innovant pour la Récupération du Signal Inaudible

2] Analyse de l'Impédance Équivalente, du Module et de la Résonance d'un Circuit : Une Étude Approfondie des Variations en Fonction de la Pulsation (ω).

3] Optimisation des Composants pour la Détection Améliorée des Signaux Inaudibles : Justification des Dimensions et Valeurs Sélectionnées

4] Analyse de l'Évolution de la Tension aux Bornes du Condensateur : Établissement de l'Équation Différentielle et Résolution Exacte avec les Valeurs Calculées

5] Analyse du Filtre Proposé : Fonction de Transfert, Comportement Fréquentiel, Gain en Décibels et Phase, Tracer le diagramme de Bode

6] Simulation et Analyse de Performance du Filtre via LTSpice : Reproduction du Schéma, Variation des Composants, et Comparaison avec l'Étude Théorique

Contexte du projet

Le département Recherche et Développement de l'Agence AIL3C a pour mission de créer des solutions innovantes pour aider ses agents sur le terrain. Malgré leurs inventions notables telles que les masques-peaux et les cigares-pistolet, une récente mission a entraîné la perte de l'agent K57. Après avoir localisé une base de cyberpirates grâce à des signaux réseau, l'agent K57 a réussi à infiltrer la salle des serveurs mais s'est retrouvé coincé dans une salle de conférence sans accès réseau. La situation a conduit à sa découverte et à son échec. Le département est maintenant chargé de trouver une solution technique pour permettre la communication vers l'extérieur dans de telles situations, où le seul accessoire disponible était un micro connecté au système d'audioconférence, uniquement actif lors de l'utilisation de la salle.

Contexte du livrable 2 :

La solution retenue pour aller plus loin dans l'étude de faisabilité consiste à utiliser les hautes fréquences pour véhiculer le message de l'agent. Ce signal non audible permettrait de transmettre des informations en toute discrétion. Après avoir généré des ondes sonores à différentes fréquences, et en veillant à respecter les caractéristiques techniques d'un microphone, vous avez pu conclure sur une plage de fréquence adaptée pour transmettre votre signal.

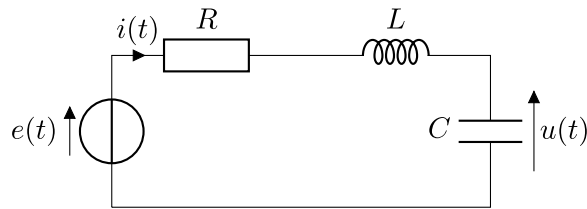
Objectif du livrable 2 :

Il doit permettre de préciser une première possibilité de mise en œuvre de la solution retenue. Afin de récupérer le signal caché dans le signal capté par le micro, nous envisageons de réaliser une opération de filtrage analogique de la fréquence sur laquelle le message a été émis.

1] Conception d'un Filtre Fréquentiel Innovant pour la Récupération du Signal Inaudible

Car le filtre passe-bande RLC est un circuit électronique permettant le passage d'une gamme spécifique de fréquences tout en atténuant les fréquences situées à l'extérieur de cette plage.

La fréquence de 21000 Hz a été jugé la plus adapté pour ce projet car la fréquence de 21000Hz est au-dessus du seuil de perception de l'homme mais reste en dessous de la limite de perception du microphone (au alentours de 24000 Hz), Il faut laisser une marge entre la limite afin d'avoir une plage de fréquence assez grande à étudier.



2] Analyse de l'Impédance Équivalente, du Module et de la Résonance d'un Circuit : Une Étude Approfondie des Variations en Fonction de la Pulsation (ω).

Calcul de l'impédance équivalente :

$$V = V_r + V_c + V_l$$

$$V = I \cdot R + I \cdot j\omega L + I \cdot \frac{1}{j\omega C}$$

$$V = I(R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C})$$

$$Z = \frac{V}{I} = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}$$

$$Z = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})$$

Etude de variation :

$$\bar{Z} = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})$$

On va mettre alors cette formule exprimée sous la forme de son admittance

soit : $\bar{Y} = \frac{1}{R + jx}$

$$\bar{Y} = \frac{1}{R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})}$$

On calcule alors l'évolution de son module puis les variations en fonctions de sa pulsation ω :

$$\bar{Y} = |\bar{Y}| \frac{1}{\sqrt{(R)^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}$$

$$\underline{\omega} \rightarrow 0 : \quad \bar{Y} = \frac{1}{-j\frac{1}{C\omega}} = jC\omega \quad |\bar{Y}| \rightarrow 0 \quad \varphi = \frac{\pi}{2}$$

$$\underline{\omega} \rightarrow +\infty : \quad \bar{Y} = \frac{1}{jC\omega} = \frac{-j}{\omega C} \quad \bar{Y} \rightarrow 0 \quad \varphi = -\frac{\pi}{2}$$

$$\underline{\omega} = \omega_0 : \quad \bar{Y} = \frac{1}{R} \quad |\bar{Y}| \rightarrow \frac{1}{R} \quad \varphi = 0$$

$$\underline{\omega} \neq \omega_0 : \quad |\bar{Z}| = \sqrt{(R)^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2} \quad || < \frac{1}{R}$$

La fréquence f_0 de résonance est égale à 21000 Hz avec :

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$$

Coefficient Q :

$$Q = \frac{f_0}{f_1 - f_2}$$

Nous prenons : f_1 : 21500 et f_2 = 20500

Donc Q = 21

3] Optimisation des Composants pour la Détection Améliorée des Signaux Inaudibles : Justification des Dimensions et Valeurs Sélectionnées

Calculons LC comme une variable à part x :

$$f_0 = 21000 = \frac{1}{2\pi\sqrt{x}}$$

$$21000 \times 2\pi\sqrt{x} = 1$$

$$\sqrt{x} = \frac{1}{2\pi \times 21000}$$

$$\sqrt{x} = \frac{1}{2\pi \times 21000}$$

$$x = \frac{1}{(2\pi \times 21000)^2}$$

$$x = 5,74 \times 10^{-11} = LC$$

Calculons maintenant L et C séparément :

Pour cette étape nous devons choisir arbitrairement L ou C.

Nous choisirons arbitrairement la valeur de C car C doit être une valeur normalisée c'est-à-dire la même valeur qu'un condensateur vendue dans le commerce.

1,0 pF	10 pF	100 pF	1 nF	10 nF	100 nF	1 µF
1,2 pF	12 pF	120 pF	1,2 nF	12 nF	120 nF	1,2 µF
1,5 pF	15 pF	150 pF	1,5 nF	15 nF	150 nF	1,5 µF
1,8 pF	18 pF	180 pF	1,8 nF	18 nF	180 nF	1,8 µF
2,2 pF	22 pF	220 pF	2,2 nF	22 nF	220 nF	2,2 µF
2,7 pF	27 pF	270 pF	2,7 nF	27 nF	270 nF	2,7 µF
3,3 pF	33 pF	330 pF	3,3 nF	33 nF	330 nF	3,3 µF
3,9 pF	39 pF	390 pF	3,9 nF	39 nF	390 nF	3,9 µF
4,7 pF	47 pF	470 pF	4,7 nF	47 nF	470 nF	4,7 µF
5,6 pF	56 pF	560 pF	5,6 nF	56 nF	560 nF	5,6 µF
6,8 pF	68 pF	680 pF	6,8 nF	68 nF	680 nF	6,8 µF
8,2 pF	82 pF	820 pF	8,2 nF	82 nF	820 nF	8,2 µF

Tableau 10 : Valeurs standards des condensateurs.

On prendra 56nF pour valeur de C ce qui nous donnera :

$$L = \frac{5,74 \times 10^{-11}}{56 \times 10^{-9}} = 1.025 \text{ mH}$$

Maintenant que L et C sont calculés nous pouvons passer à la valeur de R

$$\text{Soit } Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

$$\text{Alors : } R = \frac{\sqrt{\frac{L}{C}}}{Q} = \frac{\sqrt{\frac{1.025 \times 10^{-3}}{56 \times 10^{-9}}}}{21} \approx 6 \text{ Ohm}$$

Avec ces valeurs de composant la fréquence de résonance est le plus proche de 21000 Hz

4] Analyse de l'Évolution de la Tension aux Bornes du Condensateur : Établissement de l'Équation Différentielle et Résolution Exacte avec les Valeurs Calculées

$$V_c = V(t) = L \frac{d^2 U_c}{dt^2} + R \frac{dU_c}{dt} + \frac{1}{C} U_c.$$

$$\Leftrightarrow L \frac{d^2 U_c}{dt^2} + R \frac{dU_c}{dt} + \frac{1}{C} U_c = 0$$

$$\Leftrightarrow Lr^2 + Rr + \frac{1}{C} = 0$$

Nous allons donc dès à présent déterminé delta :

$$\Delta = 6^2 - 4 * 1.025 * 10^4 * \frac{1}{5.6 * 10^{-8}}$$

$$= -7285 < 0$$

Il y a donc deux racines réelles :

$$r_1 = \frac{-R + i\sqrt{7285}}{2L} \text{ et } r_2 = \frac{-R - i\sqrt{7285}}{2L}$$

Ainsi :

$$r_1 = \frac{-6 + i85}{2L} \text{ et } r_2 = \frac{-6 - i85}{2L}$$

$$\text{Donc } y = e^{\frac{-6}{2L}x} \left(\lambda \cos\left(\frac{85}{2L}x\right) + i\lambda \sin\left(\frac{85}{2L}x\right) \right) + y_p$$

$$\text{Ainsi } y_p = e^{\frac{-6}{2L}x} Q(x)$$

Malheureusement nous avons rencontré des difficultés lors de la réalisation de cette équation et de sa résolution afin de trouver sa solution.

Nous n'avons donc pas pu répondre exactement au problème posé dans cette question.

5] Analyse du Filtre Proposé : Fonction de Transfert, Comportement Fréquentiel, Gain en Décibels et Phase, Tracer le diagramme de Bode

On va établir alors les fonctions de transfert du filtre $T(\omega)$? Mais qu'est-ce qu'une fonction de transfert ? Eh bien c'est un modèle mathématique de la relation entre l'entrée et la sortie d'un système linéaire, le plus souvent invariant.

Ainsi par la relation $T(\omega) = \frac{V_s}{V_e}$, on obtient en remplaçant les valeurs que :

$$T(\omega) = \frac{Z_r}{Z_r + Z_l + Z_c} * U_e = \frac{R}{R + j\omega L + \frac{1}{jC\omega}} * U_e = \frac{1}{1 + j\frac{L}{R}\omega + \frac{1}{jRC\omega}} U_e.$$

$$\text{D'où : } H(j\omega) = \frac{1}{1 + j(\frac{L}{R}\omega - \frac{1}{RC\omega})}$$

En posant, on rappelle que $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ et $Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$ puis en simplifiant : $\frac{L}{R} = \frac{Q}{\omega_0}$ et $\frac{1}{RC} = Q\omega_0$

Par correspondance :

$$\rightarrow |H(j\omega)| = \frac{\frac{\omega}{Q\omega_0}}{\sqrt{(\frac{\omega}{Q\omega_0})^2 + (1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2})}}$$

Nous avons à présent établi la fonction de transfert correspondante.

Passons maintenant à l'étude du gain est la capacité d'un dispositif à augmenter la puissance d'un signal. Le gain exprime généralement en décibels le coefficient de transmission d'un dispositif.

La formule du gain est donnée par la relation :

$$G = 20 \log \left(\frac{V_s}{V_e} \right) \text{ dB}$$

Ainsi on peut associer cette formule à notre équation de transfert qui est :

$$\text{BdB}(\omega) = -20 \log(|H(j\omega)|)$$

En remplaçant :

$$\text{BdB}(\omega) = -20 \log \left(\frac{\omega}{\omega_0 Q} \right) - \log \left(\sqrt{\left(\frac{\omega}{\omega_0 Q} \right)^2 + \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \right)} \right)$$

$$\text{BdB}(\omega) = -20 \log \left(\frac{\omega}{\omega_0 Q} \right) - \frac{1}{2} * \log \left(\left(\frac{\omega}{\omega_0 Q} \right)^2 + \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \right) \right)$$

$$\text{BdB}(\omega) = -20 \log \left(\frac{\omega}{\omega_0 Q} \right) + 10 * \log \left(\left(\frac{\omega}{\omega_0 Q} \right)^2 + \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \right) \right)$$

$$\text{BdB}(\omega) = -20 \log \left(\frac{\omega}{1.31946^{5+21}} \right) + 10 * \log \left[\left(\frac{\omega}{\frac{1.31946^5}{21}} \right)^2 + \left(1 - \frac{\omega^2}{1.74^{10}} \right) \right]$$

ω_0 prend la Valeur de 1.31946^5 car selon la formule $\omega_0 = 2 * \pi * f_0$ avec $f_0 = 21 * 10^3 \text{ Hz}$.

Passons maintenant à l'argument ou la phase (Q) de la fonction de transfert. :

→ Selon la formule : $Q = \log(|H(j\omega)|)$

$$\text{Soit } Q = \log \left(\frac{\frac{\omega}{\omega_0 Q}}{\sqrt{\left(\frac{\omega}{\omega_0 Q} \right)^2 + \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \right)}} \right)$$

$$\text{Ainsi } Q = \arg \left(\frac{\omega}{2.770885^{17}} \right) - \arg \left(\sqrt{\left(\frac{\omega^2}{1.31946^5} \right)} \right)$$

Nous venons ainsi d'obtenir la phase et le gain pour la fonction de transfert correspondant à notre circuit et à nos valeurs de composants.

Pour tracer le diagramme de Bode de notre fonction de transfert nous avons choisi de le réaliser avec python en utilisant la bibliothèque numpy et matplotlib nous permettant de tracer des graphiques.

Nous avons ajouté de nombreux commentaires à notre code pour une meilleure compréhension :

```
In [1]: import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

#Définition des paramètres du filtre passe bande
Q = 21 #facteur de qualité
f0 = 21000 # Hz

#Fréquences de 10000 à 100000 Hz avec un pas de 100 Hz
frequences = np.arange(10000, 100001, 100)

#Calcul de la pulsation (ω)
omega = 2 * np.pi * frequences

#Fonction de transfert du filtre passe-bande
H = 1 / (1 + 1j * Q * (frequences / f0 - f0 / frequences))

#Calcul de l'amplification en dB
amplificationdB = 20 * np.log10(np.abs(H))

#Trouver les indices où l'amplification est supérieure à -3 dB
indices = np.where(amplificationdB > -3)[0]

#Afficher les fréquences correspondantes
frequences_above_minus3dB = frequences[indices]

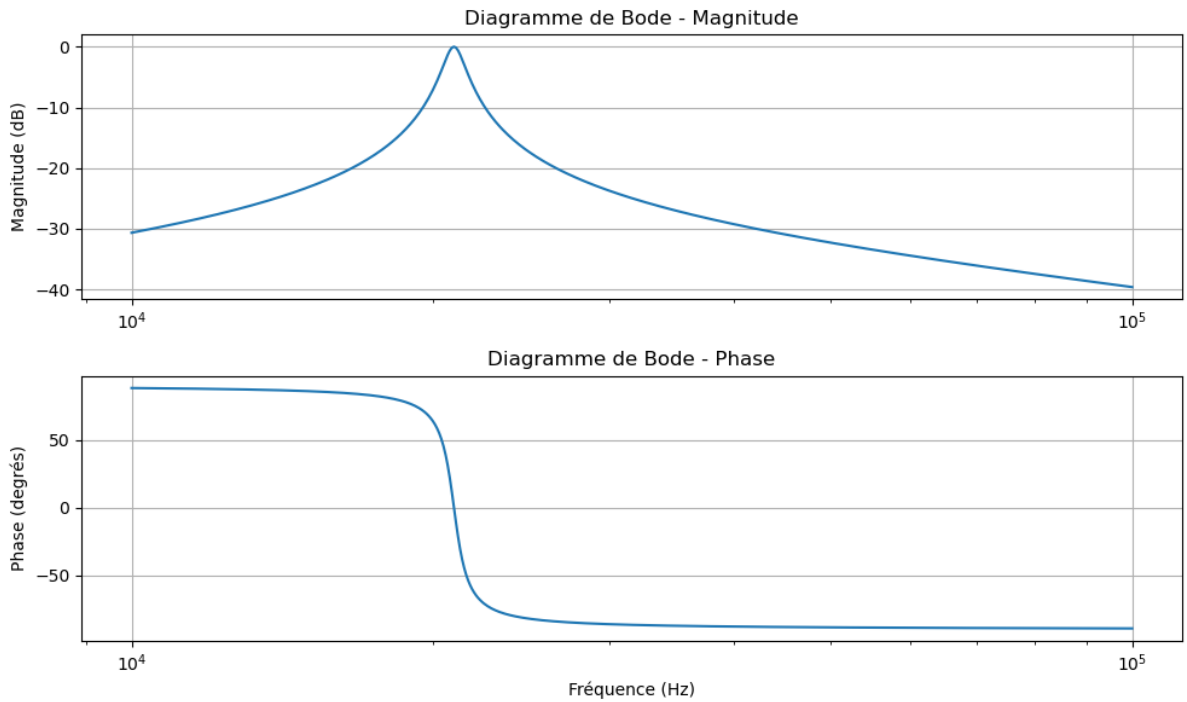
#Tracé du diagramme de Bode
plt.figure(figsize=(10, 6))

#Tracé de la magnitude en décibels
plt.subplot(2, 1, 1)
plt.semilogx(frequences, amplificationdB)
plt.title('Diagramme de Bode - Magnitude')
plt.ylabel('Magnitude (dB)')
plt.grid(True)

#Tracé de la phase en degrés
plt.subplot(2, 1, 2)
plt.semilogx(frequences, np.angle(H, deg=True))
plt.title('Diagramme de Bode - Phase')
plt.xlabel('Fréquence (Hz)')
plt.ylabel('Phase (degrés)')
plt.grid(True)

plt.tight_layout()
plt.show()

#Afficher les fréquences où l'amplification est supérieure à -3 dB
print("Fréquences où l'amplification est supérieure à -3 dB:")
print(frequences_above_minus3dB)
```



Fréquences où l'amplification est supérieure à -3 dB:
 [20600 20700 20800 20900 21000 21100 21200 21300 21400 21500]

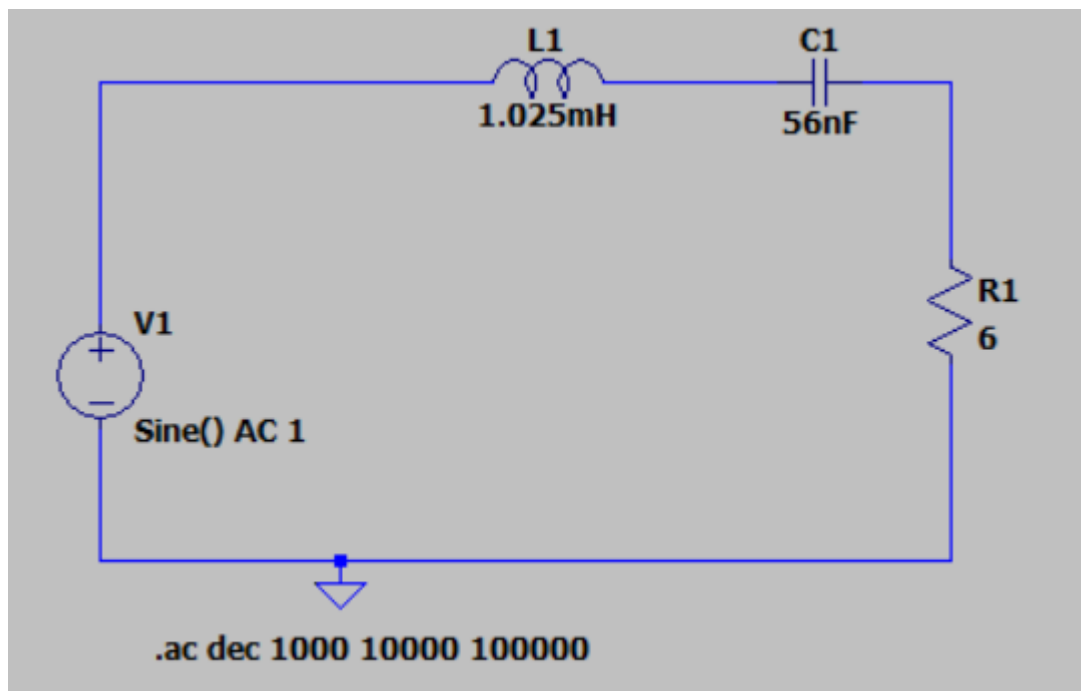
6] Simulation et Analyse de Performance du Filtre via LTSpice : Reproduction du Schéma, Variation des Composants, et Comparaison avec l'Étude Théorique

Pour réaliser le schéma de notre circuit filtre passe-bande sur le logiciel LTSpice, nous nous sommes aidés des valeurs trouvées dans la question 3.

Nous avons utilisé un circuit filtre passe bande ce qui est équivalent à un circuit RLC.

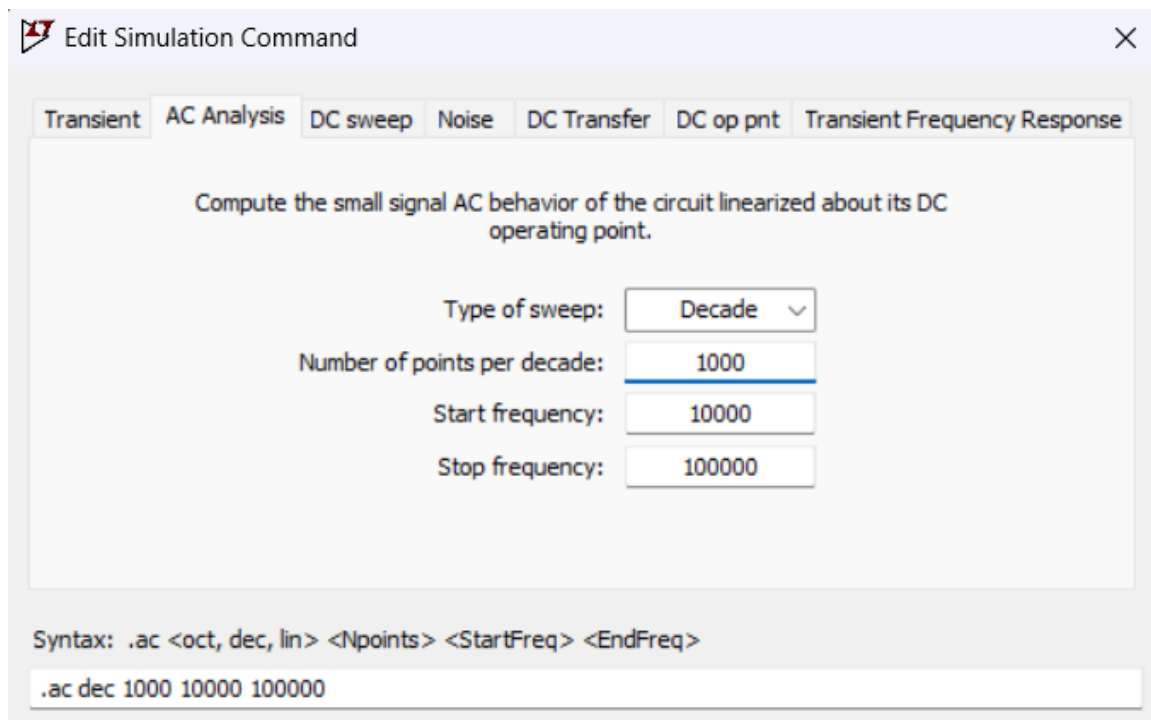
Un circuit RLC est un circuit composé d'un générateur, d'un condensateur d'une bobine et d'une résistance le tout relié à la terre.

Ainsi en construisant le circuit sur LTSpice, nous obtenons :



Grâce à nos calculs réalisés dans le 3ème point nous avons pu construire notre circuit.
=> Sine() AC 1, nous permet d'obtenir du courant lorsque nous sommes dans un circuit alternatif ce qui est notre cas. Soit les valeurs que nous avons attribué aux composants : => Pour le générateur V : Sine() AC 1 => Pour la bobine L : 1.025 mHenry => Pour le condensateur C : 56 nFarad => Pour la résistance R : 6 Ohms

Nous allons donc maintenant simuler notre circuit pour obtenir notre diagramme de Bode, cependant nous avons du compléter une fenêtre avant de pouvoir tracer notre diagramme. Cette fenêtre se nomme « Edit Simulation Command », il suffit d'aller dans « Ac Analysis » et de remplir les valeurs demandées. Soit les valeurs que nous avons attribués :



Edit Simulation Command

Transient AC Analysis DC sweep Noise DC Transfer DC op pnt Transient Frequency Response

Compute the small signal AC behavior of the circuit linearized about its DC operating point.

Type of sweep: Decade

Number of points per decade: 1000

Start frequency: 10000

Stop frequency: 100000

Syntax: .ac <oct, dec, lin> <Npoints> <StartFreq> <EndFreq>

.ac dec 1000 10000 100000

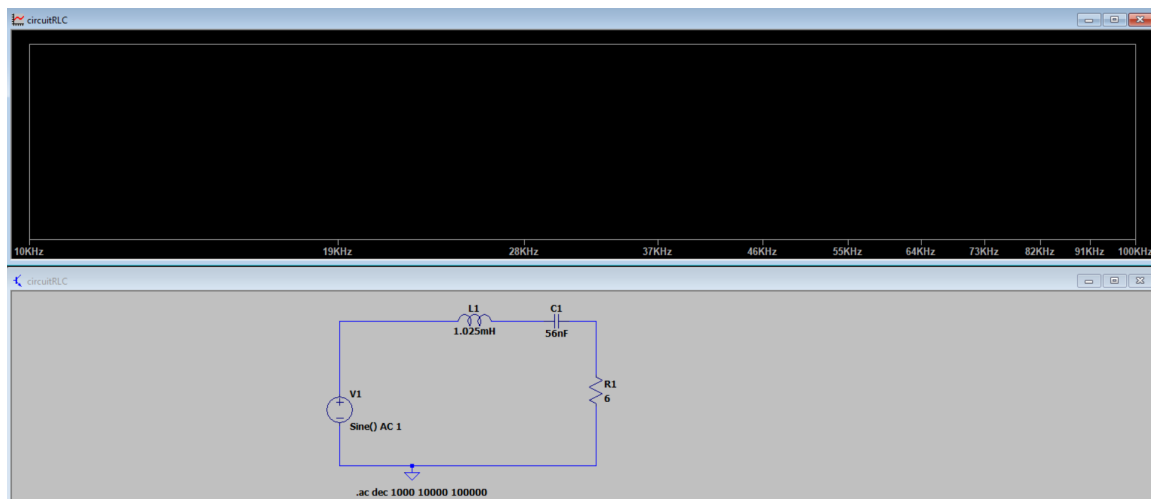
Voici les valeurs que nous avons attribuées au circuit.

Pour la variable « .ac dec 1000 10000 100000 », .ac correspond à, dec correspond au type de balayement, nous avons choisi « decade », pour le nombre de points, nous avons choisi 1000 points.

Pour la plage de fréquence à balayer nous avons choisi de 10 000 Hz à 100 000 Hz.

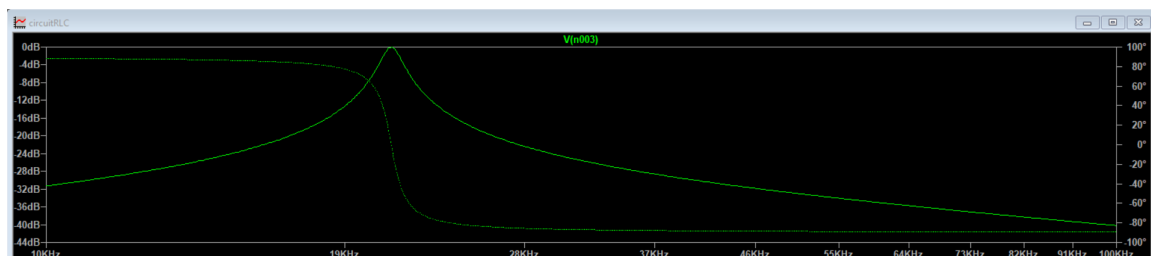
Ensuite nous avons utilisé la fonction "run" dans l'onglet "Simulate", il suffit d'appuyer sur ce bouton et le circuit se lancera.

Lorsque le circuit se lance, il y a une double page qui s'ouvre avec le spectre du circuit :



Il faudra sélectionner la zone que l'on veut pour avoir le spectre du circuit c'est-à-dire la zone du circuit entre le condensateur et la résistance.

Nous obtenons alors le spectre suivant :



Ainsi, nous pouvons remarquer que notre sons non audible c'est-à-dire 0dB se situe au niveau de notre fréquence voulue c'est-à-dire 21000 Hz.

Conclusion

En conclusion, la solution privilégiée pour approfondir l'étude de faisabilité consiste à utiliser des hautes fréquences non audibles pour discrètement transmettre des informations via un microphone. Après la génération d'ondes sonores à des fréquences spécifiques, une plage adaptée a été déterminée. La mise en œuvre envisagée implique un filtrage analogique pour récupérer le signal émis et dissimulé dans le spectre capté par le microphone, ouvrant ainsi la voie à une possible réalisation pratique de cette solution.

Perspective

Nous avons bien travaillé tous ensemble sur ce livrable. On s'est tous partagé les tâches, puis on a mis en commun.

A travers ce livrable, nous avons pu apprendre à mieux utiliser LTspice ainsi que Jupyter de façon efficace et compréhensible.

William Moreau-Blanguernon : Notre travail de groupe sur la mise en place de notre circuit filtre passe bande a été une expérience enrichissante. Chacun d'entre nous a apporté des compétences spécifiques à la table, ce qui a grandement contribué à la qualité globale du livrable. J'ai apprécié la façon dont nous avons pu résoudre les défis techniques ensemble et créer un produit final solide.

Louis Mangin: Ce livrable sur la mise en place du circuit filtre passe bande a été un défi passionnant. Le travail d'équipe a été essentiel pour le succès du projet. Chacun d'entre nous a assumé des rôles spécifiques et a travaillé de manière synergique pour élaborer un travail construit.

Axel Joly-Levert : Travailler sur la mise en place du circuit filtre passe bande dans le cadre de notre livrable a été une expérience gratifiante. Notre groupe a fait preuve d'une grande collaboration et de compétences techniques pour concevoir un travail solide. J'ai particulièrement apprécié la manière dont nous avons résolu les problèmes ensemble, en combinant nos connaissances pour atteindre nos objectifs.