

Les filtres

Formation radioamateur F6KJS - F6FTC

1°) Octave - Décade

a) Octave

Tous les musiciens savent que la note "La grave" a une fréquence de 440Hz, et que la note "LA aigu" a une fréquence de 880Hz soit le double. On dit qu'entre un La grave et un La aigu, il y a **une octave**

Deux fréquences f_1 et f_2 sont séparées d'une octave signifie que $f_2 = 2 \times f_1$

Par exemple,

La fréquence supérieure d'une octave à 1000 Hz est 2000Hz

La fréquence supérieure d'une octave à 2000 Hz est 4000Hz

De 1000 Hz à 4000 Hz, il y a donc 2 octaves

b) Décade

Soit deux fréquences f_1 et f_2 , une décade les sépare si $f_2 = 10 \times f_1$

La fréquence supérieure d'une décade à 1000 Hz est 10 000Hz

La fréquence supérieure d'une décade à 144 MHz est 1,44 GHz

La fréquence inférieure de 2 décades à 1000 Hz est 10 Hz

2°) Les filtres

Les filtres utilisés en radiofréquences ou audiofréquences ont pour but de sélectionner, parmi des signaux de fréquences différentes, ceux qui seront utiles en éliminant les signaux indésirables.

Un filtre est dit "**passif**" s'il n'est constitué que de composants passifs, résistances, condensateurs, bobines.

Un filtre est dit "**actif**" s'il comporte des éléments actifs tels que transistors, circuits intégrés....

Les différents types de filtres sont les suivants :

- Le **filtre passe-bas**, qui comme son nom l'indique se laissera traverser par les signaux de fréquences inférieures à sa fréquence de coupure notée F_c , tout en atténuant fortement les fréquences supérieures à F_c

- Le **filtre passe-haut**, qui se laissera traverser par les signaux de fréquences supérieures à sa fréquence de coupure notée F_c , tout en atténuant fortement les fréquences inférieures à F_c .

- Le **filtre passe-bande**, qui se laissera traverser par les signaux de fréquences situées entre deux fréquences f_1 et f_2 tout en éliminant fréquences inférieures à f_1 et supérieures à f_2

- Le filtre **coupe-bande (réjecteur)**, qui éliminera les fréquences comprises entre deux fréquences f_1 et f_2 tout en se laissant traverser par les

fréquences inférieures à f_1 et supérieures à f_2

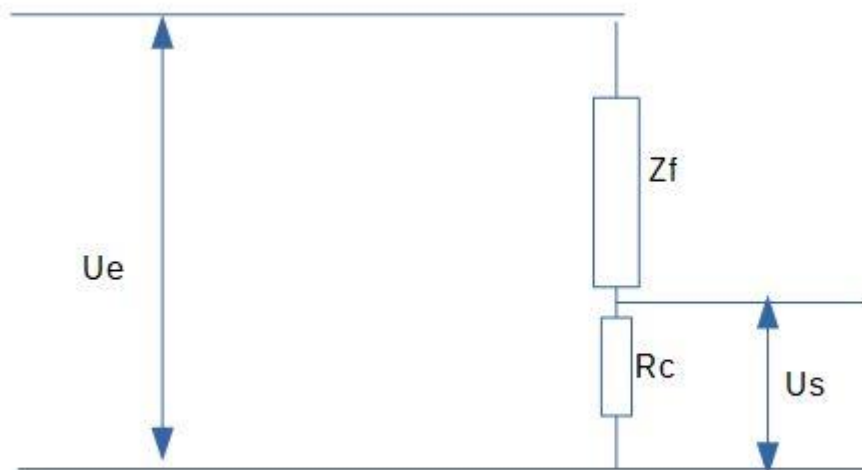
3°) Filtre et diviseur de tension



Un signal alternatif de tension U_e entre dans le filtre, une tension U_s est mesurée aux bornes de la charge R_c

L'impédance Z_f du filtre n'est pas constante, elle va varier en fonction de la fréquence (cette variation dépend des composants utilisés dans le filtre).

Dessignons d'une autre façon ce circuit :



On reconnaît ici un diviseur de tension. Une formule permet de calculer U_s en fonction de U_e

$$U_s = U_e \times R_c / (Z_f + R_c)$$

Par exemple,

Si le filtre n'est constitué que d'une bobine, on sait que la bobine est passante pour les très basses fréquences ($Z_L = L\omega$)

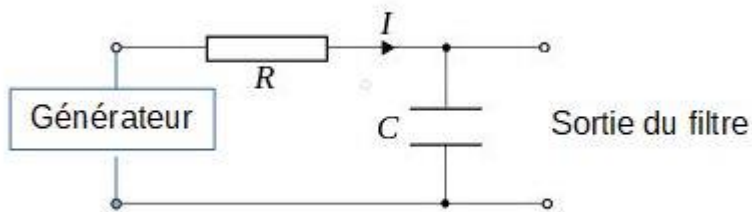
Z_f sera donc très faible, presque égale à 0, par conséquent, U_s sera presque égal à U_e , le filtre se laissera traverser par les très basses fréquences.

Si nous augmentons la fréquence, la bobine sera de moins en moins passante, son impédance va augmenter, Z_f sera donc de plus en plus grande (la tension à ses bornes va augmenter) et par conséquent U_s va diminuer, le filtre sera efficace pour les plus hautes fréquences.

Conclusion : l'impédance du filtre va dépendre de sa constitution (bobines, condensateurs...) et de la fréquence du signal d'entrée U_e .
Us, la tension de sortie va donc varier en fonction de l'impédance de ce filtre.

4°) Etude d'un filtre passe-bas très simple : le circuit RC

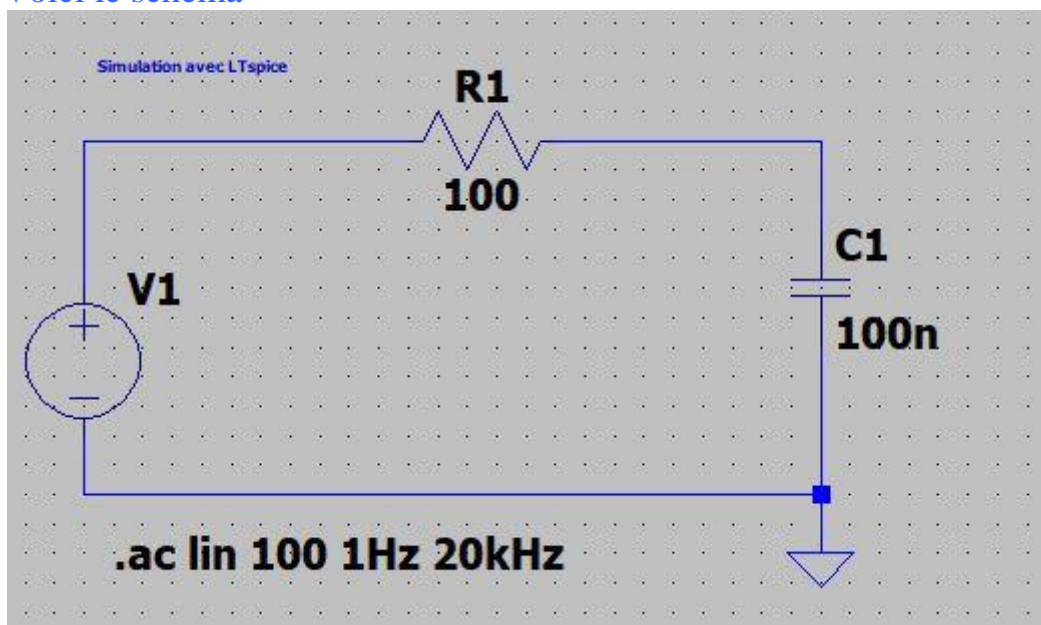
a) le filtre RC série



Un générateur de tension alternative dont on connaît la tension est à l'entrée du filtre, on mesure la tension à la sortie (aux bornes du condensateur)

Pour l'étude de ce filtre, des simulations ont été effectuées avec le logiciel LTspice (téléchargeable gratuitement)

b) Voici le schéma



Le générateur V1 délivre une tension alternative (5V) qui va varier de 1Hz à 20 kHz, c'est **l'entrée du filtre**.

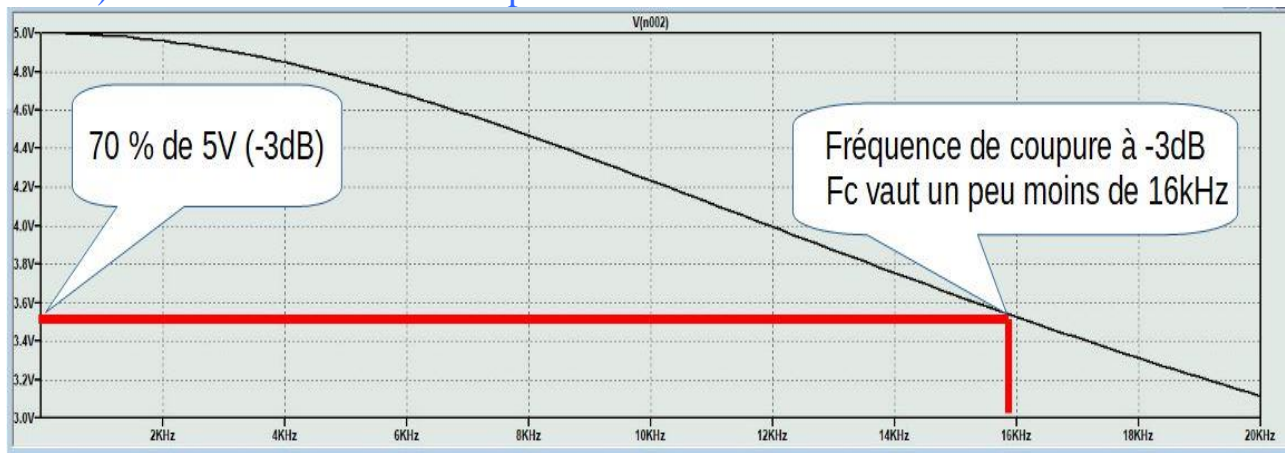
On mesure alors la tension aux bornes de C1 de 100 nF qui sera **la sortie du filtre**.

On peut imaginer ce qu'il va se passer.

Pour des fréquences basses, le condensateur sera fortement résistant, le courant ne le traversera pas et sera dirigé directement vers la charge

Plus la fréquence va augmenter, le condensateur sera de moins en moins résistant et déviara le courant vers la masse, la charge sera de moins en moins alimentée. La tension à la sortie du filtre va diminuer fortement.

c) On obtient la courbe de réponse suivante :

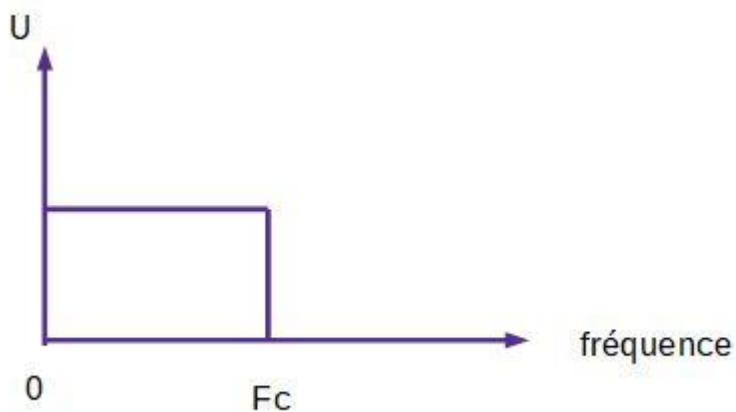


On étudie la tension de sortie en fonction de la fréquence d'entrée dans le filtre. On voit que pour des fréquences inférieures à 2 kHz environ, la tension en sortie de filtre est toujours d'environ 5V, puis diminue progressivement.

Pour trouver la fréquence de coupure à -3dB, on se positionne à 70% de 5V, soit 3.5V et on note la fréquence correspondante : environ 16kHz.

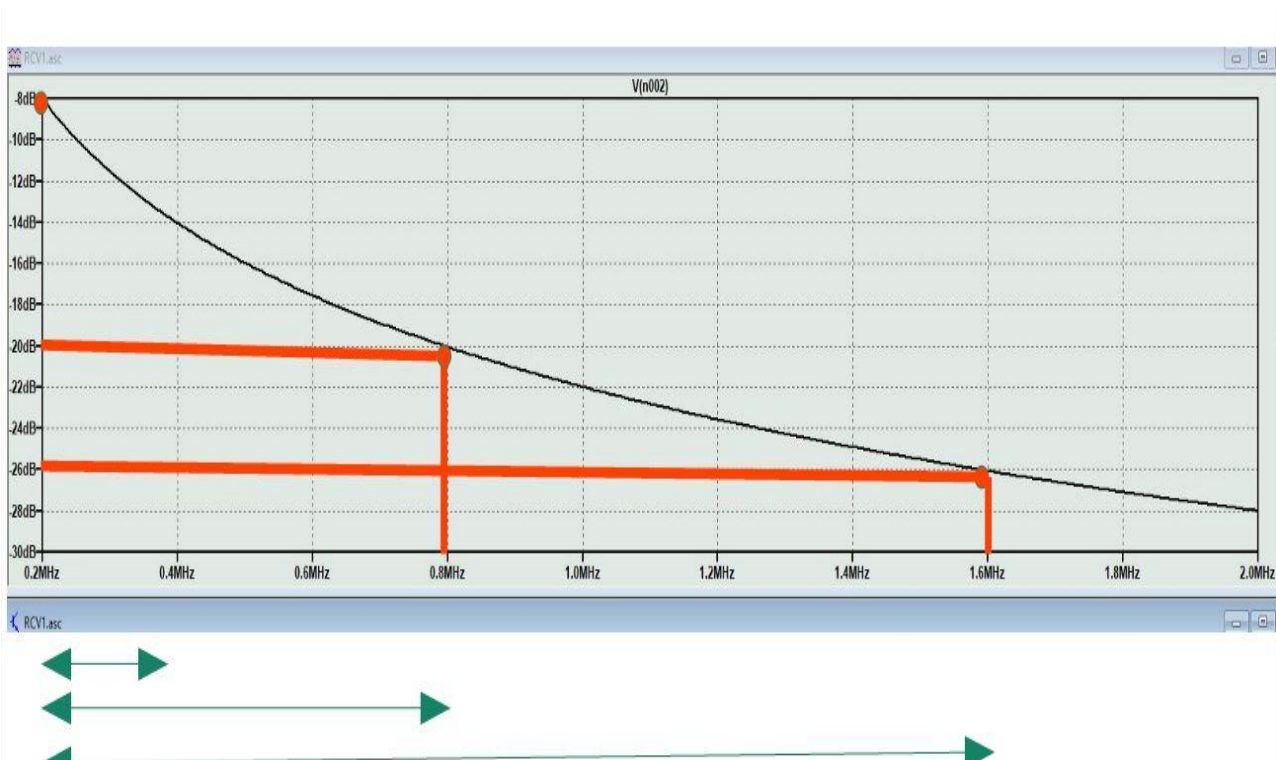
Fréquence de coupure à -3dB : $F_c = 16 \text{ kHz}$

Remarque : Une formule permet de retrouver $F_c = 1/(6,28 \times R \times C) = 15923 \text{ Hz}$
La coupure n'est pas nette, elle se fait progressivement, ce n'est pas un filtre idéal



Le filtre passe bas idéal aurait cet aspect. La tension aux bornes du condensateur reste la même jusqu'à la fréquence F_c puis elle est nulle pour toute fréquence supérieure à F_c

d) Pente d'un filtre



L'atténuation de la tension aux bornes du condensateur en fonction de la fréquence d'entrée du filtre a été exprimée maintenant en dB.

Le filtre n'étant pas idéal, la courbe à une certaine **pen**te. Elle s'exprime en **dB/octave** ou
Que remarque-t-on?

A 0,2 Mhz l'atténuation est -8db

A 1,6 Mhz, le gain est -26 dB

0,2 Mhz -----0,4 Mhz-----0,8 Mhz-----1,6Mhz
 octave1 octave2 octave3

1,6Mhz est donc l'octave 3 de 0.2Mhz

Entre -8dB et -26dB il y a 18dB d'écart.

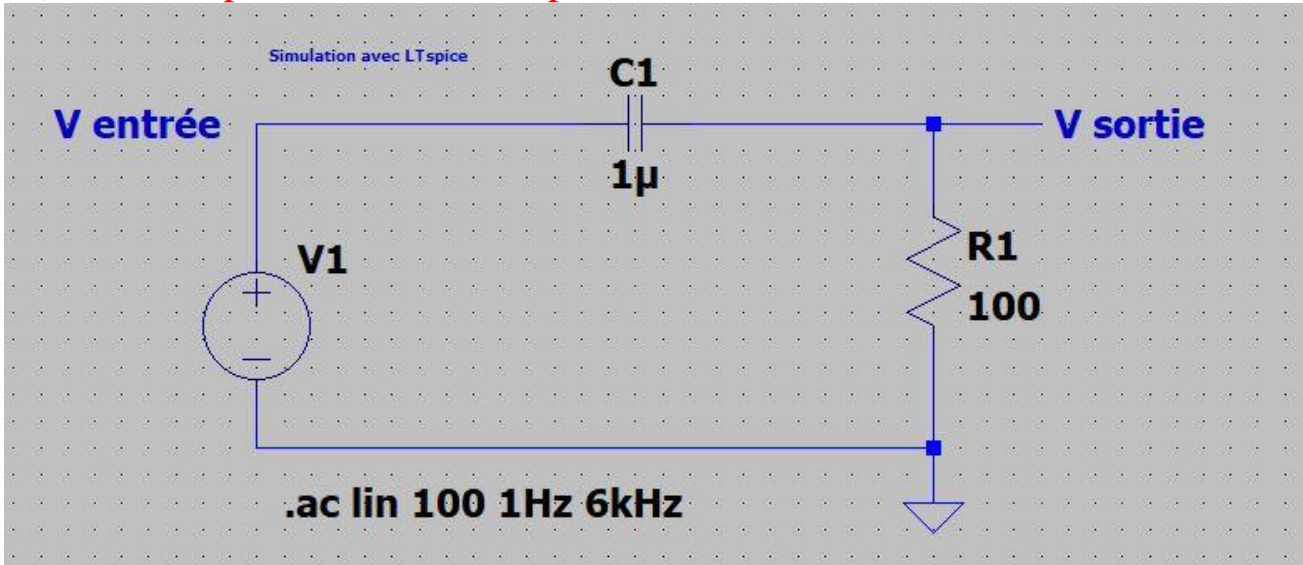
La pente est de 18 dB pour 3 octaves donc elle est de 6dB/octave

Entre 0,2 et 2Mhz, il y a une décade. L'atténuation passe de -8dB à -28dB donc un écart de 20dB

La pente est de 20dB par décade

Ce qu'il faut retenir : 6dB/octave = 20dB/décade

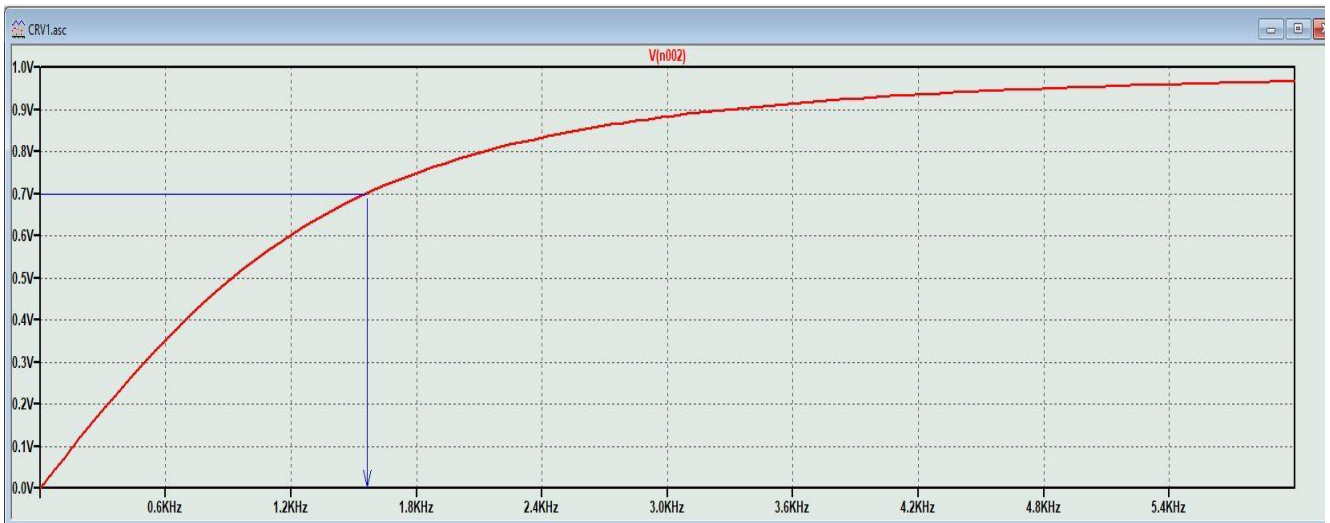
5°) Un filtre passe-haut très simple : le circuit RC



Cette fois-ci, le condensateur est à l'entrée du filtre. Il est très résistant aux fréquences basses ($Z_c=1/C\omega$).

Ce filtre CR atténuera donc plutôt les fréquences basses tout en étant **passant pour les fréquences hautes**.

C'est un filtre passe haut



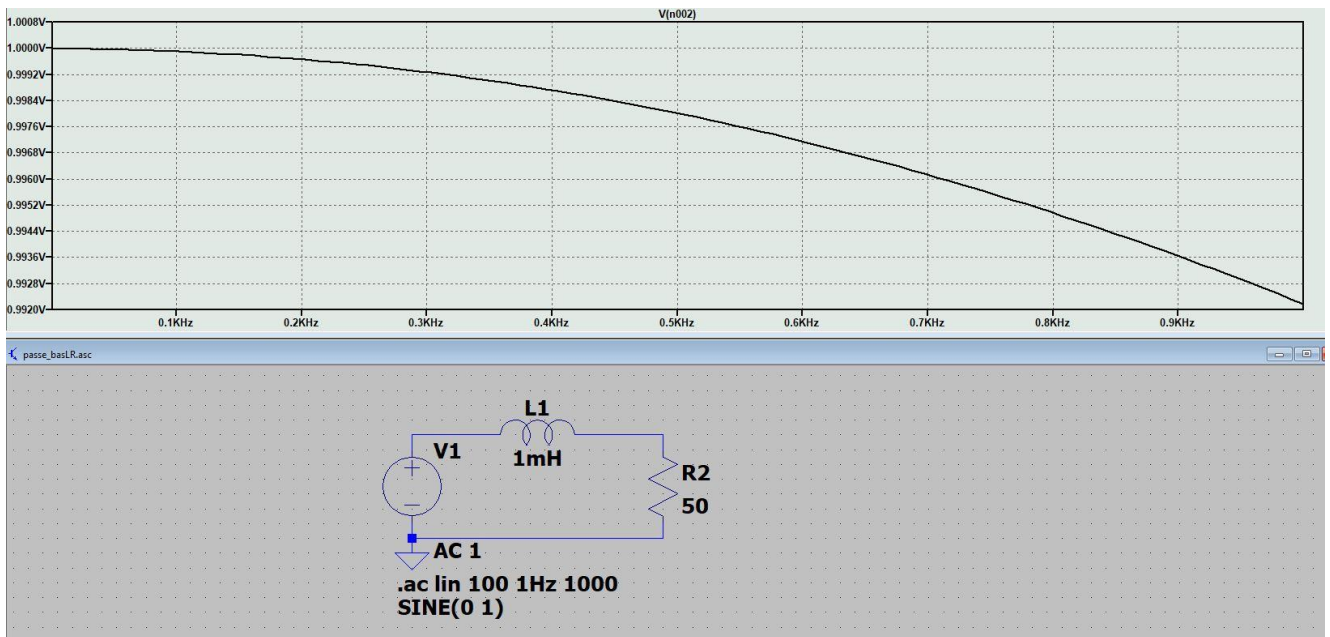
La tension du générateur a été fixée ici à 1V alternatif

On voit que vers 0,7V (70% de 1V) la fréquence de coupure correspondante est environ 1,5 - 1,6 kHz

Calculons la : $F_c = 1/(2 \times \pi \times R \times C) = 1592 \text{ Hz}$

La pente est également de 6dB/octave.

6°) Un filtre passe-bas très simple : le circuit LR



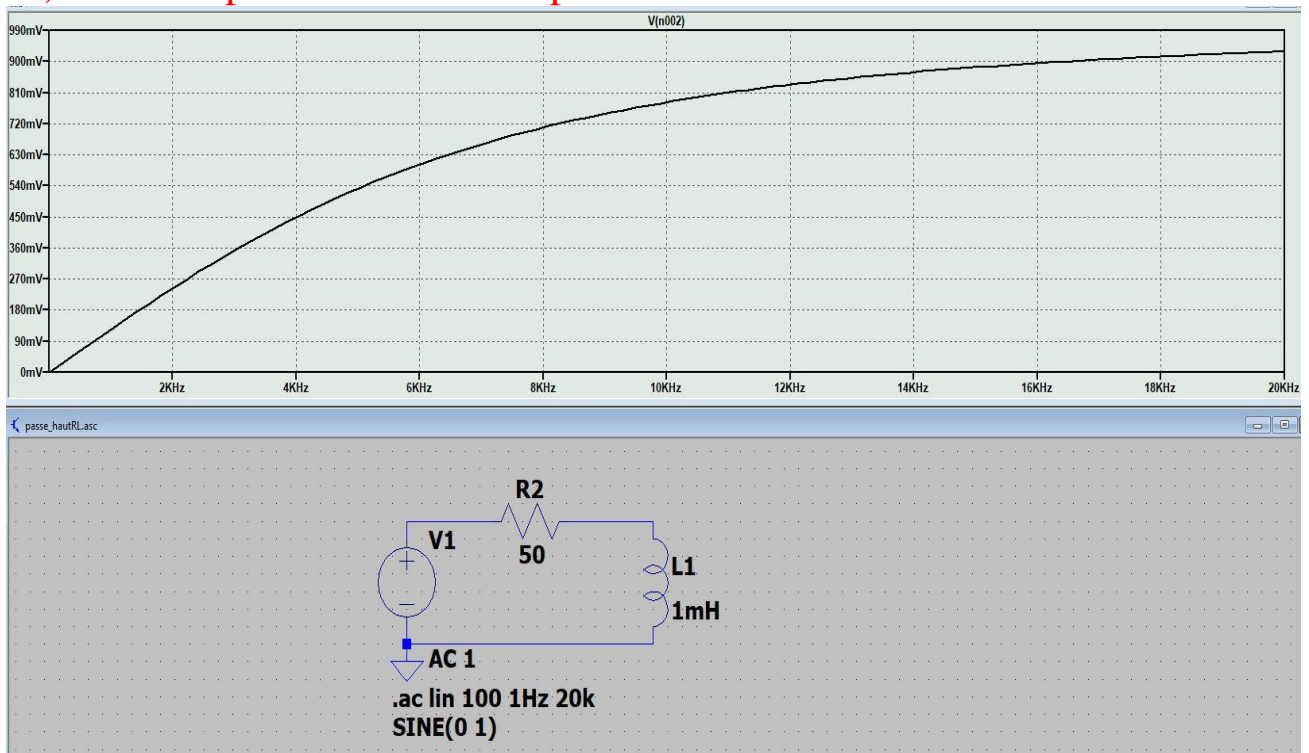
La tension de sortie du filtre est mesurée aux bornes de R2

La bobine L1 est passante pour les fréquences basses et atténue de plus en plus les fréquences hautes.

La fréquence de coupure à -3dB se calcule de la façon suivante : $F_c = (R / 2 \times \pi \times L)$

La pente est 6dB/octave ou 20 dB/décade

7°) Un filtre passe-haut très simple : le circuit RL



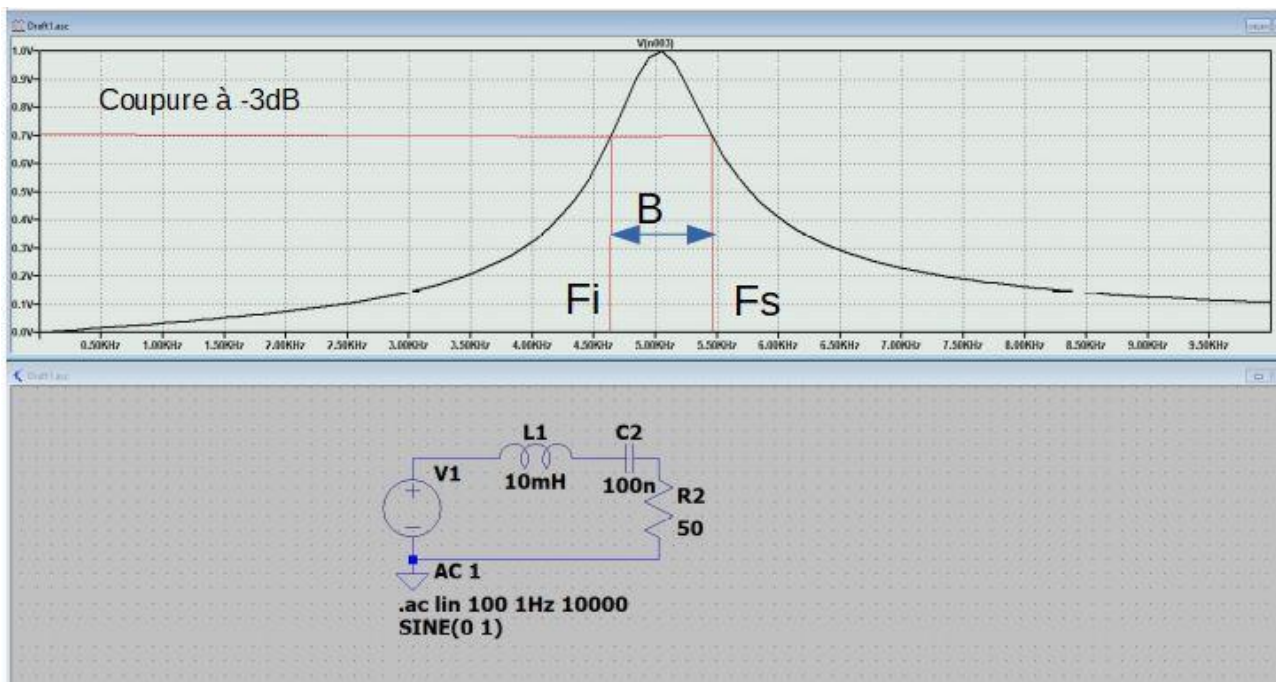
La tension de sortie du filtre est mesurée aux bornes de L1

La bobine L1 dévie les fréquences basses vers la masse et devient très résistante aux fréquences hautes.

La fréquence de coupure à -3dB se calcule de la façon suivante : $F_c = (R / 2 \times \pi \times L)$

La pente est 6dB/octave ou 20 dB/décade

8°) Etude d'un filtre passe-bande : le circuit LC série

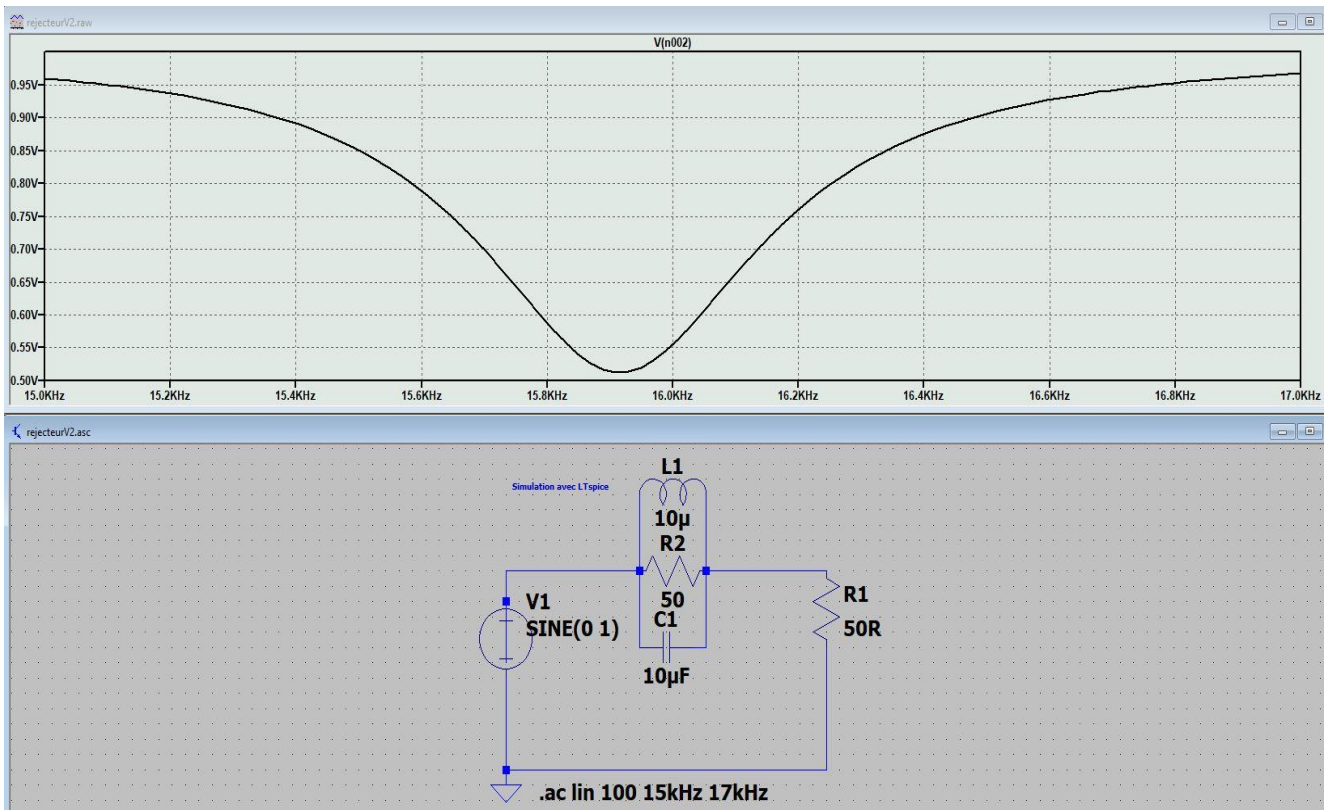


Que remarque t'on ?

- les fréquences les plus basses et les plus hautes sont atténuées
- B : la bande passante à -3dB est l'écart entre F_s (la fréquence de coupure supérieure) et F_i (la fréquence de coupure inférieure)

$$B = F_s - F_i$$

9°) Etude d'un filtre coupe-bande



La tension de sortie est mesurée aux bornes de R1

Pour trouver la bande passante à -3dB, il suffit de prendre 70% de 1V (la tension du générateur), tracer la droite parallèle à l'axe des fréquences qui coupera la courbe en deux points et donnera ainsi f_i et f_s et permettra le calcul de la bande passante à -3dB

f_i vaut à peu près 15,7 kHz

f_s vaut à peu près 16,1 kHz

$B = f_s - f_i = 16,1 \text{ kHz} - 15,7 \text{ kHz} = 0,4 \text{ kHz} = 400 \text{ Hz}$

La bande passante vaut environ 400 Hz

La fréquence ou la réjection est au maximum et se calcule avec la formule de Thomson : $f_0 = 1 / (6,28 \times \text{racine}(LC))$

On trouvera ici 15,9 kHz (entre 15,7 kHz et 16,1 kHz)

Ce circuit est aussi appelé réjecteur ou circuit bouchon

10°) Analyse spectrale - harmoniques

a) Définition

Soit F une fréquence donnée par exemple 440 Hz, F est la fondamentale

On appelle harmonique de rang 2 : $2 \times F = 2 \times 440 \text{ Hz} = 880 \text{ Hz}$

On appelle harmonique de rang 3 : $3 \times F = 3 \times 440 \text{ Hz} = 1320 \text{ Hz}$

On appelle harmonique de rang 4 : $4 \times F = 4 \times 440 \text{ Hz} = 1760 \text{ Hz}$

.....

b) Une première vidéo

Cette vidéo analyse, à l'aide du logiciel Audacity (logiciel libre que vous pouvez télécharger) un signal basse fréquence sinusoïdal de 440Hz, tant au point de vue temporel (analyse en fonction du temps) que spectral, (analyse en fonction de la fréquence). Voici le lien :

<https://youtu.be/4xVqS-U6aq0>

c) Une seconde vidéo

Cette fois un signal 440Hz est généré, mais il n'est plus sinusoïdal mais c'est un signal carré

<https://youtu.be/VOkYvRuYeaQ>

d) Une troisième vidéo, le spectre de la voix

<https://youtu.be/esJvTF76IDY>

Remarque : La législation

Dans ce but, pour toutes les modulations, l'**excursion** de fréquence ne doit pas dépasser $\pm 3 \text{ kHz}$ pour les fréquences inférieures à 30 MHz, et $\pm 7,5 \text{ kHz}$ pour les fréquences supérieures à 30 MHz. La **bande** occupée par l'émission ne doit en aucun cas sortir des limites de la **bande** de fréquences autorisée.