

filtres analogiques : quelques bases

la magie des réseaux de filtrage est l'un des phénomènes les plus saisissants de l'électronique

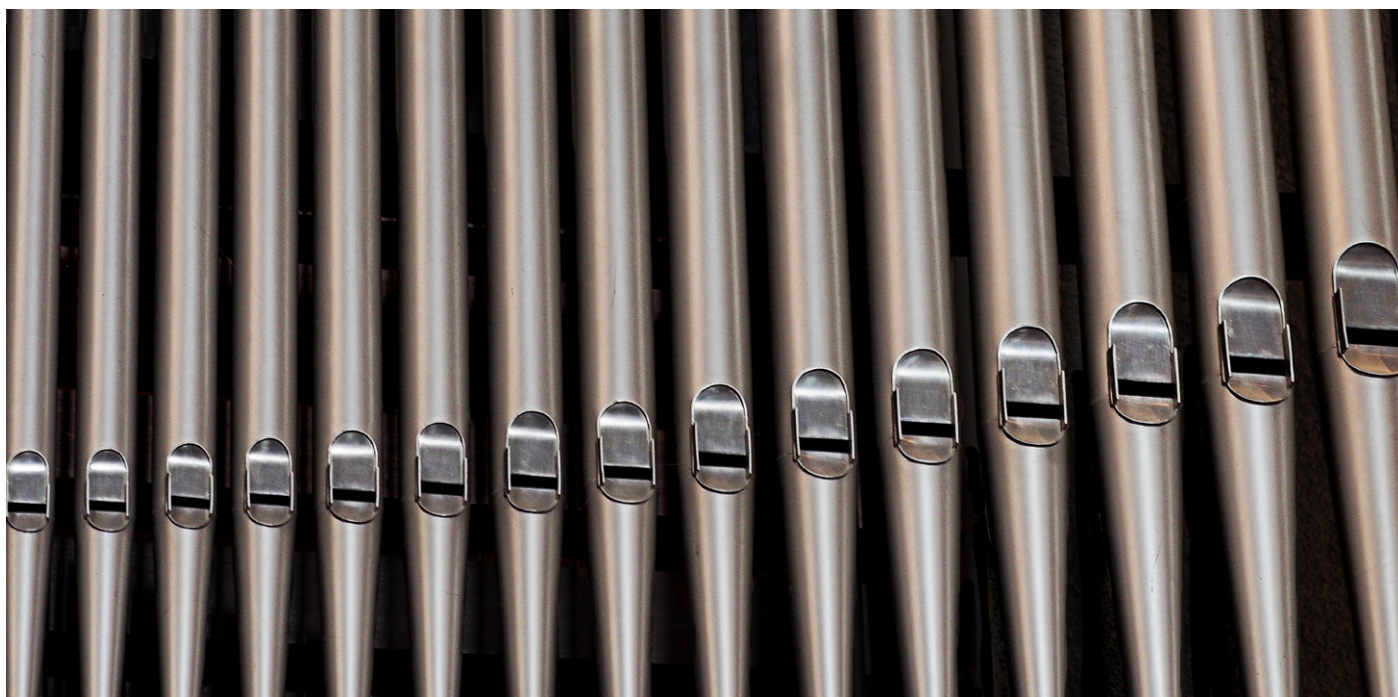


Image : <https://pixabay.com/fr/photos/organe-tuyaux-%C3%A9glise-musique-1550156/>

Robert Lacoste (Chaville)

Les filtres sont des circuits présents dans de très nombreux projets, tout électronicien doit donc savoir se débrouiller pour bricoler et mettre au point un tel circuit. Malheureusement, la conception de filtres, voire leur utilisation, est souvent perçue comme proche de la magie noire. Pourquoi ? À cause des calculs, sans doute. Ne vous laissez pas intimider, je vous promets qu'on peut aller loin, même sans maths compliquées !

Dans mes derniers articles parus, j'ai parlé d'amplificateurs opérationnels. Ce sont des composants avec lesquels on peut faire des tas de choses, et en particulier construire des filtres dits actifs. Les filtres sont indispensables dans de très nombreux projets, tout électronicien doit pouvoir se débrouiller avec de tels circuits. Et pour commencer, ne pas se laisser effrayer par les concepts mathématiques souvent utilisés : transformation de Laplace, pôles et zéros, et autres notions un peu abstraites mais bien utiles. Sans remettre en cause l'importance des maths, je tente ici une présen-

tation pragmatique des filtres : comment spécifier un filtre, comprendre ses principales variantes et utiliser efficacement quelques outils de conception assistée par ordinateur ? Promis, pas de maths compliquées !

Caractéristiques

Commençons par un peu de vocabulaire. Par définition, un filtre est un circuit qui atténue certains signaux plus que d'autres, en général en fonction de leur fréquence. La **figure 1** vous rappelle les types les plus classiques : un filtre passe-bas laisse passer les basses fréquences,

mais atténue les signaux de haute fréquence. Il est par exemple parfait pour supprimer le bruit HF sur un signal provenant d'un capteur. Inversement, un filtre passe-haut atténue les basses fréquences. Les filtres passe-bande sont une combinaison des deux et atténuent toutes les fréquences en dessous ou au-dessus d'une plage donnée. Par exemple, dans tout récepteur radio un filtre passe-bande atténue tous les signaux à l'exception de ceux proches de la fréquence voulue. Enfin, un filtre réjecteur de bande (ou coupe-bande) fait le contraire et atténue une gamme de

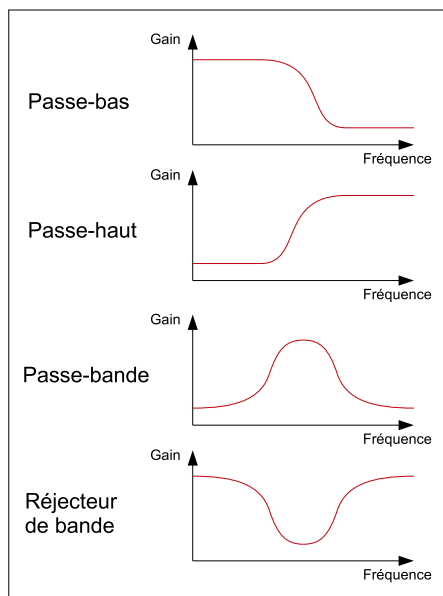


Figure 1. Une petite illustration des quatre types classiques de filtres fréquentiels.

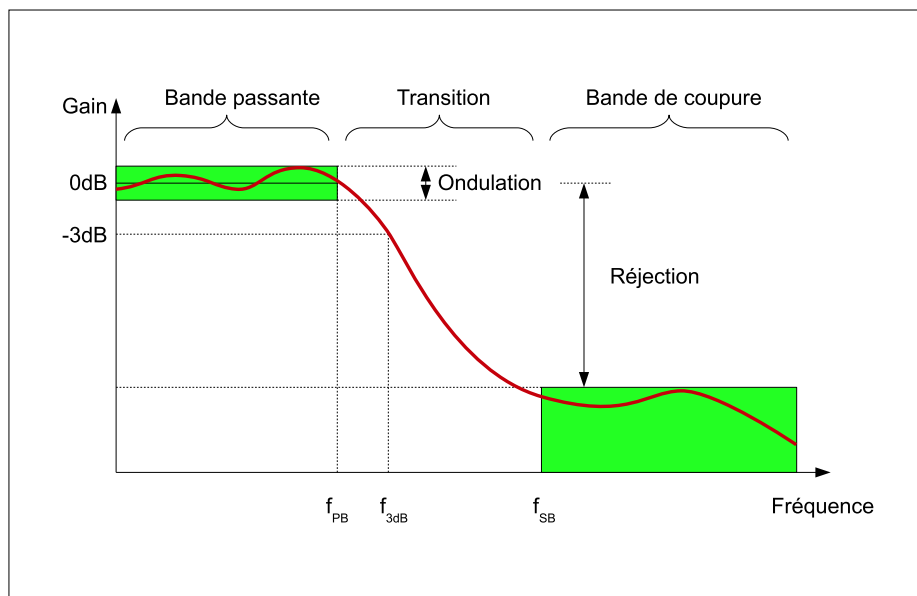


Figure 2. Un filtre, ici passe-bas, est spécifié par sa fréquence de coupure, son ondulation dans la bande passante et sa réjection dans la bande de coupure.

fréquences sélectionnée. Par exemple, un filtre réjecteur de bande centré à 50 ou 60 Hz est présent dans pratiquement tous les pèse-personnes électroniques, pour éliminer les perturbations causées par les lignes secteur environnantes.

Comment spécifier un filtre ? La **figure 2** l'illustre sur l'exemple d'un passe-bas. Le premier paramètre est bien sûr la fréquence de coupure. Par définition, c'est la fréquence à laquelle le filtre atténue la puissance du signal de 50%. Cela signifie que les pertes du filtre seront de 3 dB à cette fréquence. Vous n'êtes pas à l'aise avec les dB ? Le décibel est le $1/10^e$ d'un bel, et un bel est le logarithme du rapport de deux puissances. Prenez votre calculatrice et tapez $10 \times \log(1/2)$, vous obtiendrez -3.01, que tout le monde arrondit à -3 dB.

Mais une atténuation de 3 dB est probablement déjà trop importante pour votre application. La variation maximale de la puissance du signal dans la bande passante réellement utilisable (ici de DC à f_{PB}) est appelée ondulation du filtre. Enfin, vous voudrez très probablement spécifier que le filtre doit fournir une atténuation minimale, appelée réjection, au-delà d'une certaine fréquence f_{SB} . Bien sûr, ces spécifications doivent être établies avec soin : un filtre avec 0,01 dB d'ondulation jusqu'à 10 kHz et 100 dB de réjection à partir de 11 kHz est théoriquement envisageable, mais vous aurez besoin de beaucoup de temps et d'argent pour sa conception...

Filtres RC

Commençons par les filtres les plus basiques, les filtres RC. Le filtre passe-bas le plus simple est une résistance R suivie d'un condensateur C raccordé à la masse (**figure 3**). L'impédance du condensateur diminue lorsque la fréquence augmente, d'où une atténuation croissante. Ce filtre est dit d'ordre 1, et fournit une atténuation de 6 dB par octave. Ceci veut dire que l'atténuation augmente de 6 dB à chaque doublement de la fréquence. Son atténuation est de 20 dB par décade, c'est-à-dire lorsque la fréquence est multipliée par 10 (c'est bien la même chose. Un indice pour ceux qui se demandent pourquoi : $2^{3,33} = 10$, et $3,33 \times 6 = 20...$). Regardez à nouveau la figure 3, j'ai simulé ce filtre pour

vous en utilisant *Proteus (Labcenter)* [1]. Vous pouvez faire la même chose avec n'importe quel simulateur basé sur *Spice* comme l'excellent et gratuit LT-Spice. La simulation le montre, l'atténuation de ce filtre RC est de -20 dB à 100 kHz, et de -40 dB à $10 \times 100 \text{ kHz} = 1 \text{ MHz}$, 20 dB de plus comme prévu. Les valeurs de R et C sont faciles à calculer : la fréquence de coupure est $1/(2\pi RC)$ soit ici 10 kHz. Vous faut-il un filtre plus raide, c'est-à-dire atténuant plus vite les hautes fréquences ? Simple, vous pouvez enchaîner plusieurs cellules RC. Par exemple, j'ai simulé un filtre RC d'ordre 2, constitué de deux cellules RC en série (figure 3). L'atténuation est maintenant de $2 \times 6 = 12$ dB par octave, ou $2 \times 20 = 40$ dB par décade. Rien de

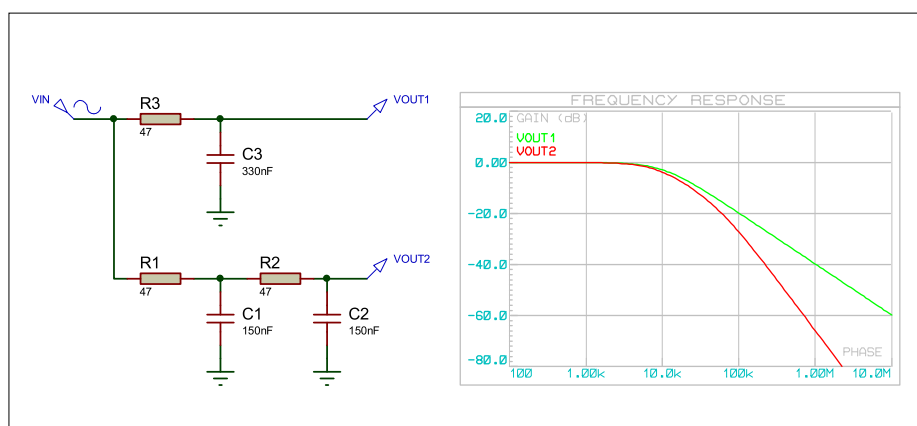


Figure 3. Un filtre RC d'ordre 1 (en haut) fournit une atténuation de 20 dB/décade comme le montre la courbe verte, contre 40 dB/décade pour un filtre d'ordre 2 (rouge).

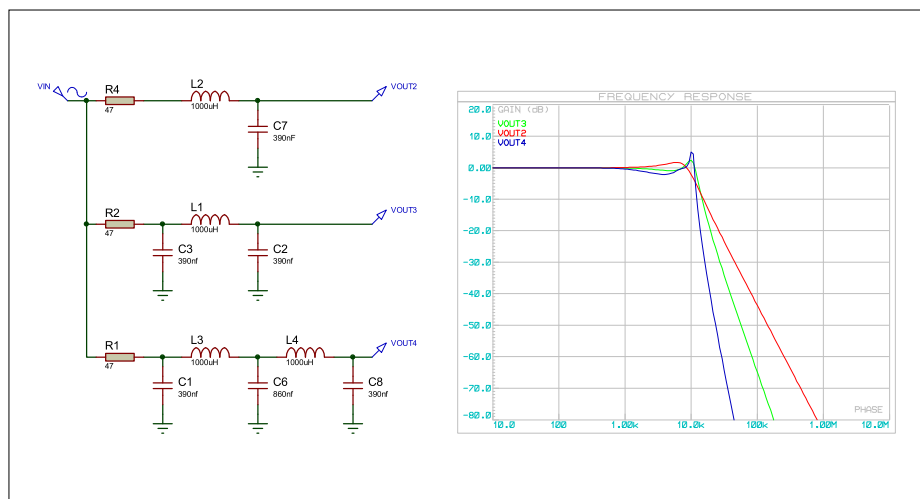


Figure 4. Cette simulation montre la réponse en fréquence de trois filtres LC, respectivement d'ordre 2, 3 et 5 (de haut en bas). Leurs sorties sont en l'air, d'où un dépassement sur les courbes de réponse.

magique. La fréquence de coupure à 3 dB est décalée vers le bas par rapport à une seule cellule RC, simplement parce qu'à la fréquence où chaque cellule atténue de 3 dB, l'atténuation totale est de 6 dB. Il faut donc changer un peu la valeur des composants pour conserver la même fréquence de coupure.

Et pour les autres types de filtre ? S'il vous faut un filtre passe-haut, permutez simplement les condensateurs et les résistances. Un passe-bande ? Il suffit de connecter en série une cellule passe-bas et une cellule passe-haut avec les fréquences de coupure appropriées. Et pour un filtre coupe-bande ? Connectez deux cellules passe-haut et passe-bas entre le signal et la masse. Simplissime, non ?

Filtres LC

Maintenant comment construire un filtre plus performant qu'un filtre RC, avec le même nombre de composants ? Avec un filtre LC. Un tel filtre est fabriqué avec des condensateurs et des inductances (**figure 4**), et non plus des résistances. Quelle est la pente d'un tel filtre ? Super facile : comptez le nombre de condensateurs, ajoutez le nombre d'inductances, vous obtenez l'ordre du filtre. La règle marche d'ailleurs aussi pour les filtres RC. Multipliez ensuite cet ordre par 6 dB pour obtenir l'atténuation par octave, ou par 20 dB pour une atténuation par décade. Par exemple, le premier filtre simulé sur la figure 4 a une inductance et un condensateur. Deux composants, donc

c'est un filtre d'ordre 2, avec la même atténuation de 12 dB par octave que l'exemple du double RC de la figure 3. L'exemple du bas a trois condensateurs et deux inductances, donc son atténuation est de $5 \times 20 = 100$ dB par décade ou $5 \times 6 = 30$ dB par octave.

Ultra-simple... Enfin, presque. Voyons maintenant les petits détails. Si vous regardez à nouveau la figure 4, vous verrez que ces filtres LC ont une réponse bizarre autour de leur fréquence de coupure : il y a un dépassement, ce qui signifie qu'ils ont un gain positif à certaines fréquences. Bien sûr, ces filtres passifs ne peuvent pas "créer de l'énergie", ce gain positif est dû au fait que leur sortie est en circuit ouvert et qu'aucune énergie ne circule. Ne vous méprenez pas, ce n'est pas un artefact de la simulation, ce serait exactement la même chose sur un circuit réel : la tension mesurée à la sortie du filtre peut être supérieure à celle appliquée à l'entrée. L'amplitude du dépassement est directement liée au facteur de qualité des composants L et C, et en particulier à leur résistance série. Si les condensateurs et les inductances sont idéaux, le dépassement sera infini à la fréquence à laquelle L et C résonnent. C'est pourquoi j'ai ajouté une petite résistance série sur les simulations de la figure 4. Si vous changez la valeur de cette résistance, la forme de la courbe change. Je l'ai illustré sur la **figure 5** (graphique du haut), avec une résistance série comprise entre 5 et 100 Ω .

Comment éviter de telles oscillations ? En connectant la sortie du filtre à une impédance appropriée, égale à l'impédance de la source. Regardez le deuxième exemple de la figure 5 : ici j'ai ajouté une résistance de charge R3 de même valeur que la résistance source R2 (notée X). J'ai ensuite simulé le circuit avec des valeurs différentes pour ces résistances X, allant de 5 à 100 Ω . La courbe varie selon l'impédance, mais il n'y a jamais de dépassement. De plus, une valeur de résistance précise fournit une réponse très propre et plate, liée aux valeurs de L et C. Cette valeur, ici 50 Ω , est l'impédance caractéristique du filtre LC. Les filtres LC doivent donc être calculés pour obtenir la réponse en fréquence requise tout en tenant compte de l'impédance de la charge. Pour les filtres d'ordre 2 (une inductance et un condensateur), les calculs sont simples. La fréquence de coupure est $f_{3dB} = 1 / [2\pi \cdot \sqrt{LC}]$, et l'impédance caractéris-

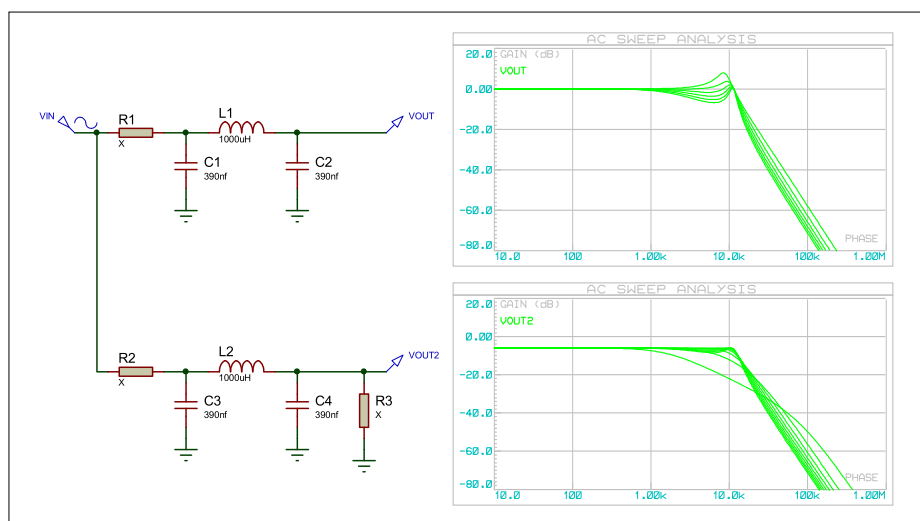


Figure 5. Réponse en fréquence d'un filtre LC à sortie ouverte, avec une résistance série R1 variable (en haut). Le dépassement disparaît lorsque le filtre est connecté à une charge X adaptée (en bas).

tique est $Z=\sqrt{L/C}$. Si vous connaissez la fréquence de coupure et l'impédance requise, vous pouvez facilement calculer L et C à partir de ces deux formules. Le calcul n'est pas aussi simple pour les filtres d'ordre supérieur, d'autant plus que les choix de conception sont nombreux comme nous le verrons un peu plus loin. Heureusement de nombreux outils de conception de filtres LC sont disponibles sur la toile [2]. *Coilcraft* met même à votre disposition un outil [3] permettant ensuite de commander en un clic les échantillons d'inductances nécessaires.

Du filtre LC au filtre actif

Les filtres LC sont très performants, et sont très utilisés en particulier en HF ou en électronique de puissance. Par contre l'utilisation d'inductances n'a pas que des avantages surtout dans les basses fréquences : ces composants peuvent être encombrants et chers, et ont souvent des résistances série importantes. Comment

filtrer passe-haut LC classique d'ordre 2 avec impédances adaptées. J'ai utilisé un condensateur de 390 nF et une inductance de 1 mH, ça donne une fréquence de coupure de 8 kHz et une impédance caractéristique de 50 Ω , proche de la valeur standard de 56 Ω . La courbe de réponse ne vous surprendra pas, elle montre une atténuation de $2 \times 20 = 40$ dB par décade (courbe verte). Son gain est de -6 dB dans la bande passante, car la tension est divisée par deux en raison des résistances de source et de charge égales (la tension est divisée par deux par ces deux résistances, donc la puissance est divisée par $2^2 = 4$, soit -6 dB. Vous vous rappelez ? $P = U^2/R$).

Regardez maintenant la partie centrale du schéma, toujours sur la figure 6. Le circuit est exactement le même mais j'ai remplacé l'inductance par un AoP, un condensateur et deux résistances. Ce circuit est un gyrateur. La réponse en fréquence de ce circuit (courbe rouge)

représenté dans la partie inférieure de la figure 6. Déplacez mentalement les composants et les fils, vous verrez qu'ils sont identiques, sauf que la sortie est maintenant directement connectée à la sortie de l'AoP. Ce dernier schéma vous dit quelque chose ? C'est le schéma d'un filtre passe-haut d'ordre 2 dit de Sallen-Key (inventé par R.P. Sallen et E.L. Key au MIT Lincoln Lab en 1955). J'ai modifié les valeurs des composants pour avoir des valeurs plus standard, mais vous pouvez voir que la réponse en fréquence est toujours la même. De plus il n'y a plus cette perte de 6 dB car le signal est pris directement à la sortie de l'AoP. Les filtres de type Sallen-Key et les gyrateurs sont donc plus que cousins.

Réponses classiques

Revenons à la conception d'un filtre. Pour un filtre d'ordre 1 ou 2, on n'a pas beaucoup de latitude : on peut choisir la fréquence de coupure et l'impédance caractéristique, mais c'est tout. Par contre, pour des filtres d'ordre supérieur, le choix est plus vaste : le filtre est constitué de plusieurs étages, et chacun peut être modifié indépendamment. Un filtre d'ordre élevé permet donc à la fois une pente plus raide et un meilleur contrôle sur la forme de la réponse.

► Un filtre d'ordre élevé permet donc à la fois une pente plus raide et un meilleur contrôle sur la forme de la réponse

conserver les performances d'un filtre LC sans utiliser d'inductance ? Avec un filtre actif, le plus souvent construit autour de notre ami l'amplificateur opérationnel. Il y a grosso-modo trois façons pour concevoir un filtre actif. La première est d'ajouter un AoP après un filtre passif. Cela permet de réduire son impédance de sortie ou d'augmenter son gain, mais l'intérêt s'arrête là. La deuxième est ce qu'on appelle les filtres à capacités commutées, et j'en parlerai dans mon prochain article. Reste la troisième option, qui est basée sur ce qu'on appelle des gyrateurs. Qu'est-ce que c'est que ça encore ? Un gyrateur [4] est un circuit qui « imite » le comportement d'une inductance, en utilisant un amplificateur opérationnel et uniquement des résistances et des condensateurs. Vous trouverez beaucoup de littérature sur le sujet, par exemple dans la bible, je veux dire dans *The Art of Electronics* d'Horowitz & Hill [5]. Il y a aussi une présentation claire du sujet écrite par Rod Elliott de ESP (*Elliott Sound Products*) [6] et publiée sur le web.

Voyons de quoi il s'agit (**figure 6**). La partie supérieure de la figure est un

est exactement la même que celle de la version LC, au moins jusqu'à 1 MHz. En dessous les performances de l'AoP commencent à être trop limitées. On a donc remplacé une inductance par un AoP, un condensateur et deux résistances. Maintenant un peu de magie : comparez ce schéma du milieu avec celui

téristique, mais c'est tout. Par contre, pour des filtres d'ordre supérieur, le choix est plus vaste : le filtre est constitué de plusieurs étages, et chacun peut être modifié indépendamment. Un filtre d'ordre élevé permet donc à la fois une pente plus raide et un meilleur contrôle sur la forme de la réponse.

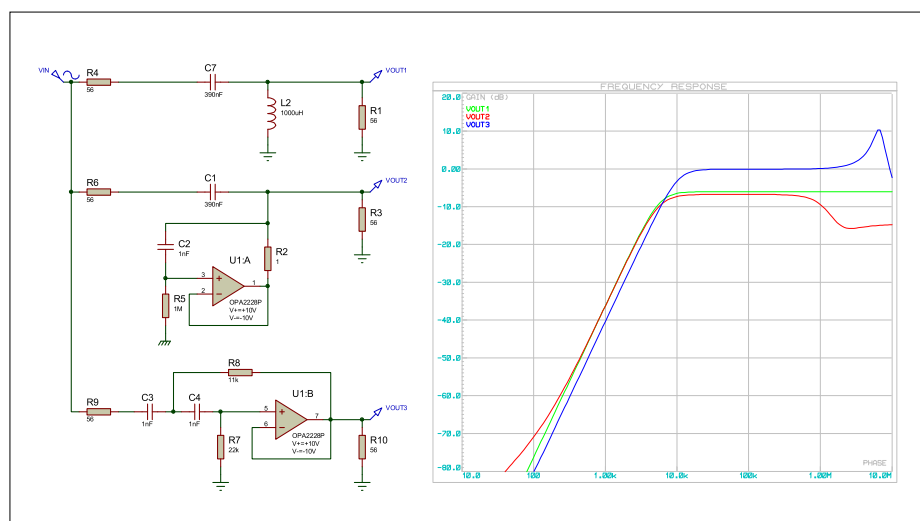


Figure 6. Transformation d'un filtre passe-haut LC (en haut) en un circuit à base de gyrateur (au milieu), très proche du filtre Sallen-Key (en bas).

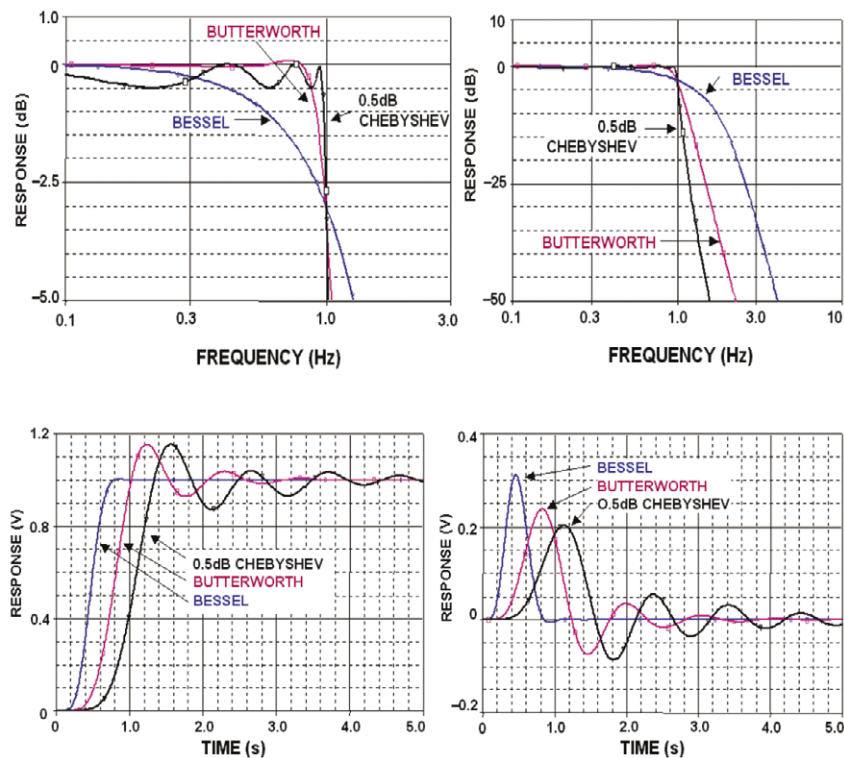


Figure 7. Réponse en fréquence et en temps des trois variantes de filtre les plus courantes. Source : *Linear Circuit Design Handbook*, Hank Zumbahlen / Analog Devices.

Rien ne vous empêche de concevoir votre propre filtre, en ajustant chaque étage comme vous le voulez. Cependant les mathématiciens ont bien travaillé ce sujet, et ont calculé plusieurs filtres "optimaux" en fonction de l'application voulue, pour un ordre donné s'entend. Vous voulez une courbe de réponse aussi plate que possible dans la bande passante ? Ne vous fatiguez pas, Stephen Butterworth

l'a calculé pour vous en 1930, le résultat s'appelle bien sûr le filtre de Butterworth. Préférez-vous une réjection aussi forte que possible, en tolérant une certaine ondulation dans la bande passante, par exemple 1 dB ? Utilisez un filtre de Tchebychev, dérivé des polynômes de Tchebychev. Les filtres dits elliptiques en sont de proches cousins.

La dernière variante courante, le filtre

de Bessel, est un peu plus complexe à comprendre. Ces filtres ne sont pas très bons ni en terme de planéité ni en terme d'atténuation, mais ont un avantage clé dans le domaine temporel : leur « retard de groupe » est presque plat. Cela nous amènerait un peu loin, mais cette caractéristique préserve au mieux la forme temporelle des signaux filtrés. Gardons le sujet pour un autre article.

Liens

- [1] Simulateur 'Proteus VSM mixed-signal simulator' : www.labcenter.co.uk
- [2] Outil en ligne 'Tony Fisher's LC filter designer' : <http://www-users.cs.york.ac.uk/~fisher/lcfilter/>
- [3] Outil en ligne 'Coilcraft LC filter designer' : www.coilcraft.com/apps/lc_filter_designer/lc_filter_designer.cfm
- [4] Gyrateur : <https://moodle.supelec.fr/rdk/base/index.php?idFiche=77&cle=gyrateur>
- [5] 'The Art of Electronics', 3rd edition, Paul Horowitz and Winfield Hill, Cambridge University Press, ISBN 978-0-521-80926-9 [version française éditée par Elektor : « Traité de l'électronique analogique & numérique » (volume 1, ISBN 978-2-86661-168-2 et volume 2, ISBN 978-2-86661-071-5). Ouvrages épuisés chez Elektor, mais disponibles d'occasion.
- [6] 'Active Filters Using Gyrateurs - Characteristics, and Examples', Rod Elliott, ESP : <http://sound.westhost.com/articles/gyrator-filters.htm>
- [7] 'Linear Circuit Design Handbook', Hank Zumbahlen, Analog Devices Newnes, 2008 , ISBN 978-0-7506-8703-4 :
- [8] Chapitre sur les filtres en PDF : www.analog.com/library/analogDialogue/archives/43-09/EDCh%208%20filter.pdf
- [9] Outil en ligne 'Analog Filter Wizard' : www.analog.com/designtools/en/filterwizard/
- [10] Page de l'article : www.elektormagazine.fr/191089-01

Bien sûr, chaque variante a ses inconvénients. À ordre égal, une plus grande ondulation dans la bande passante doit être acceptée pour obtenir une plus grande atténuation dans la bande d'arrêt, et réciproquement. C'est la vie, mais vous, le concepteur, pouvez faire le meilleur choix... Pour vous aider à comprendre les principales caractéristiques de ces variantes, j'ai reproduit sur la **figure 7** leurs réponses caractéristiques. Ces courbes proviennent d'un très bon livre sur le sujet, écrit par Hank Zumbahlen (*Analog Devices*) [7]. Le chapitre *Filtres analogiques* de ce livre est d'ailleurs disponible en pdf [8] sur le site web de ce fabricant (voir les liens ci-dessous), je vous encourage à y jeter un œil.

De beaux outils !

Il y a donc de nombreuses options pour la conception d'un filtre, en particulier pour un filtre actif. Heureusement, d'excellents outils sont là pour vous aider. Certains sont ultra-performants mais financièrement inaccessibles pour l'amateur, mais beaucoup sont gratuits. Plusieurs fournisseurs d'AoP proposent un outil qui vous aidera à concevoir un filtre, en utilisant ses produits maison bien sûr : *Analog Devices (Analog Filter Wizard)* [9], *Texas Instruments (Webbench Filter Designer)*, *Microchip (FilterLab)*, et quelques autres. À titre d'exemple, la **figure 8** vous montre l'interface de l'outil d'*Analog Devices*. On sélectionne le type de filtre (ici un passe-bas), le gain requis dans la bande passante, la fréquence de coupure et l'atténuation souhaitée à une fréquence de coupure donnée. Un curseur permet de visionner plusieurs designs possibles. La fenêtre suivante permet de sélectionner la tolérance souhaitée pour les composants passifs et obtenir le schéma complet du filtre. Enfin, les courbes de réponse sont tracées, y compris leur dispersion possible en tenant compte de la tolérance des composants. D'autres options permettent de calculer la consommation énergétique ou le bruit du circuit. Bien sûr, la beauté d'un tel outil est de vous permettre d'essayer des dizaines de solutions en quelques minutes, et choisir le filtre qui convient le mieux à vos spécifications et à votre budget.

Pour conclure

Nous y voilà. Comme d'habitude je n'ai fait qu'effleurer le sujet mais j'espère que vous avez saisi les concepts de

base. Surtout n'hésitez pas à expérimenter par vous même : posez la revue maintenant, téléchargez l'un des outils de conception de filtre présentés et jouez avec les paramètres. Puis prenez votre fer à souder et essayez. Vous ne risquez rien, et ce sera la meilleure façon de vraiment comprendre ce qu'est un filtre. Amusez-vous bien !

Dans mon prochain article, je vous présenterai une autre technique de réalisation de filtres analogiques : les filtres à capacités commutées. ◀

191089-01

Cet article a été publié dans la revue *Circuit Cellar* (n°307, février 2016).

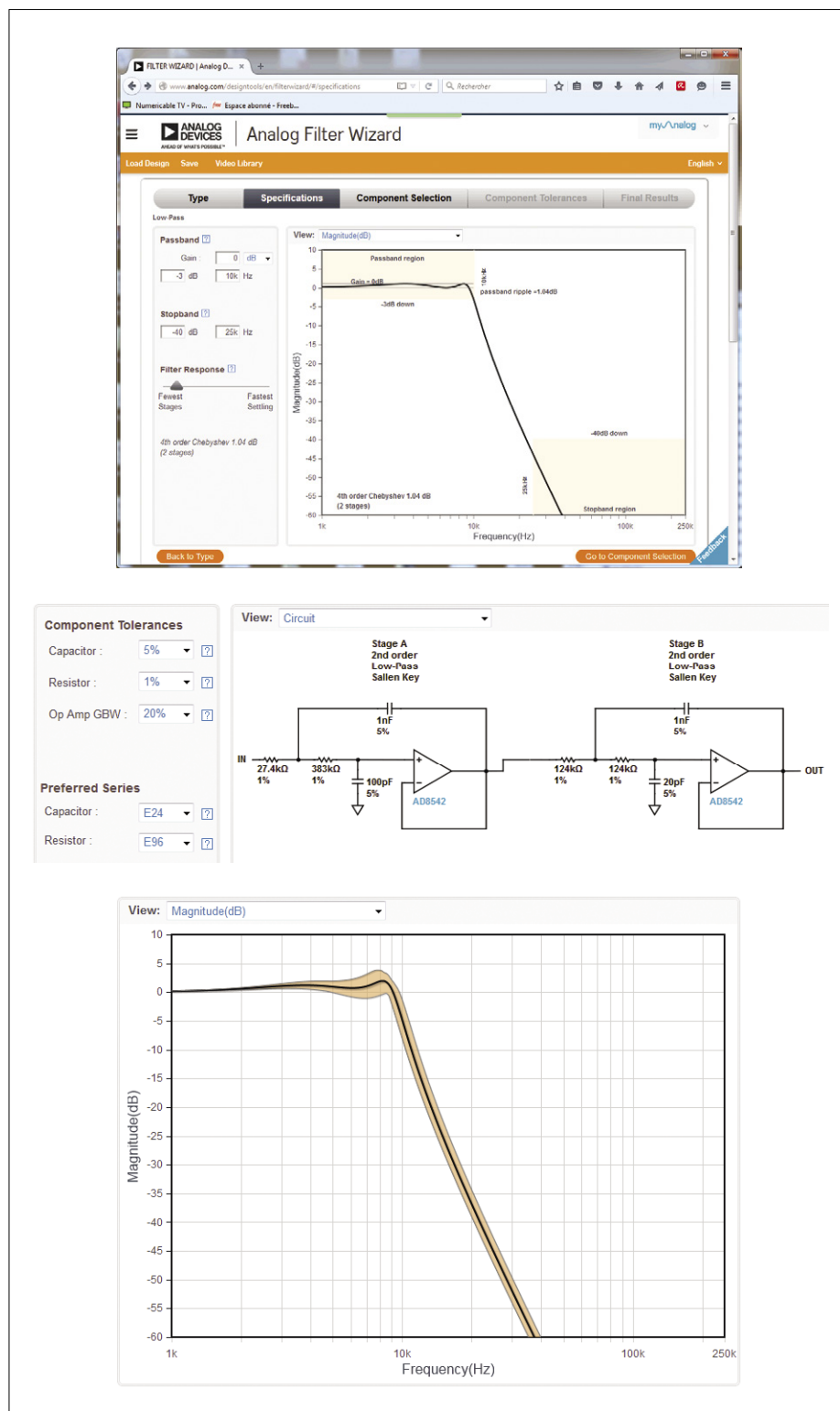


Figure 8. Avec un outil comme *Analog Filter Wizard* (*Analog Devices*), la vie est facile !