

# utiliser la lumière pour les effets sonores

filtre synthétiseur à base de LDR,  
contrôlé en tension, 24 dB/oct



Raymond Schouten (Pays-Bas)

Cet article décrit un circuit de filtre réglable simple qui ne nécessite pas de puces spéciales, juste deux amplis-op alimentés en 5 V. Malgré sa simplicité, ce filtre présente un très faible taux de distorsion harmonique ( $\text{THD} < 0,01\%$ ), une capacité de traitement des grands signaux et une large amplitude dynamique ( $> 90 \text{ dB}$ ).

Le filtre passe-bas audio de 24 dB/oct présenté ici est basé sur quatre résistances dépendant de la lumière, mieux connues sous le nom de LDR, éclairées par une seule LED. La luminosité de la LED contrôle la fréquence de coupure du filtre d'environ 20 Hz à 20 kHz. L'amortissement (c'est-à-dire le facteur Q, ou la résonance) peut être réglé jusqu'à l'oscillation complète, ce qui est une caractéristique intéressante pour les applications de synthétiseur musical. Le circuit est facile à construire, et le coût des composants est d'environ 4 €.

Ce filtre a été conçu pour des synthétiseurs musicaux, mais sa haute qualité de signal permet d'envisager son emploi dans d'autres applications audio. Le circuit a d'abord été simulé avant d'en réaliser un prototype sur une plaque d'essai pour mesurer ses performances. Des exemples de sons et une vidéo de démonstration sont disponibles sur la page du projet Elektor Labs [1].

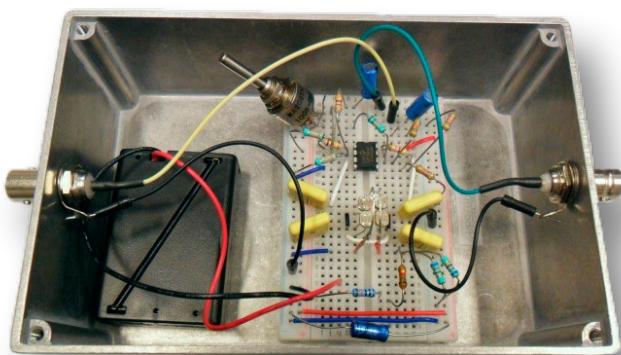


Figure 1. La version à alimentation simple du filtre a été construite sur une plaque d'essai et placée dans une boîte métallique pour vérifier les performances, avec les trois piles AAA qui l'alimentent.

## Deux versions

Deux versions du filtre sont disponibles, la plus simple fonctionnant avec une alimentation double symétrique. En ajoutant quelques résistances et condensateurs, on peut en faire une version fonctionnant avec une alimentation simple. C'est cette deuxième version qui a été construite et mesurée (figure 1).

## Le circuit (alimentation double)

Nous allons expliquer le circuit du filtre à alimentation double car il utilise moins de composants. Il est illustré à la figure 2. La version à alimentation simple (figure 3) fonctionne exactement de la même manière.

Le cœur du filtre est un filtre RC passe-bas de 6 dB/octave dont la résistance fixe R est remplacée par une LDR. Quatre de ces filtres sont mis en série pour obtenir une pente de 24 dB/octave. En contrôlant simultanément la résistance des quatre LDR par une seule LED, on obtient un filtre dont la fréquence de coupure peut être réglée sur une large plage ( $> 1 : 1000$ ).

La mise en série de quatre circuits RC identiques sans tampon à l'air d'une invitation au désastre, résultant en un filtre très médiocre avec une transition grossière à la fréquence de coupure, mais puisque le célèbre filtre en échelle de Moog est lui aussi basé sur ce principe, ça ne peut pas être entièrement mauvais. Robert Moog a trouvé une solution astucieuse, reprise dans notre circuit. Elle est basée sur l'application d'une rétroaction négative globale

qui devient positive à la seule fréquence de coupure. L'encadré « Le contrôle Q du filtre expliqué » présente cela plus en détail.

L'ampli-op U1a tamponne l'entrée et ajoute le signal de rétroaction global via R9 et P1. L'ampli-op U1b est un tampon à haute impédance pour la cascade LDR/C et ajoute un certain gain nécessaire pour compenser la perte près de la fréquence de coupure.

P1 règle le niveau de rétroaction négative globale. Le filtre passe d'une réponse amortie à une oscillation complète en ajustant P1 de  $100\text{ k}\Omega$  à  $0\ \Omega$ . Le remplacement de P1 par une autre combinaison LED-LDR permettrait d'obtenir un facteur Q contrôlé électroniquement. Reportez-vous à l'encadré intitulé « Résultats de la simulation de la réponse du filtre » pour le réglage de la fréquence et les courbes de contrôle du Q.

Une explication détaillée du choix de la LED D1 et du concept de son circuit de résistance se trouve dans l'encadré « La combinaison LED-LDR ».

### Avantages du concept

La plupart des filtres analogiques réglables utilisent des circuits plus complexes limités à de faibles niveaux de signal ( $< 100\text{ mVcc}$ )

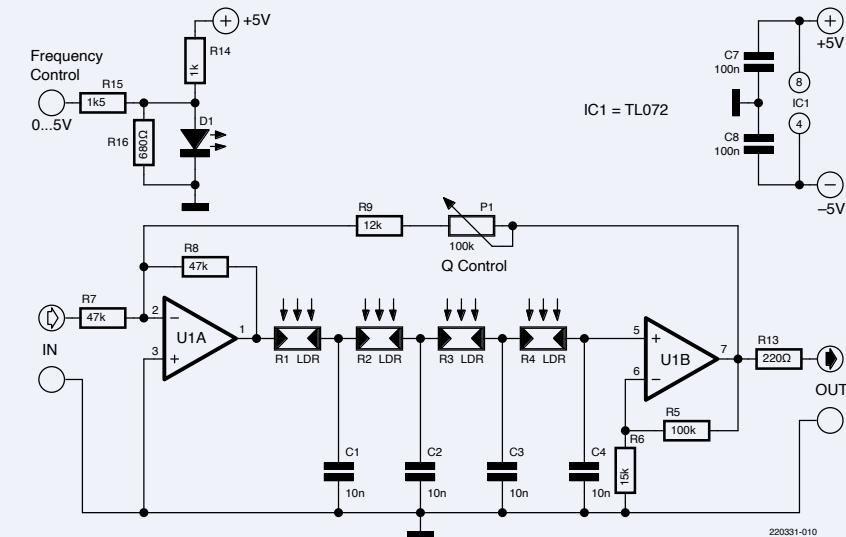


Figure 2. Schéma de circuit pour la version du filtre à alimentation double.

pour maintenir la distorsion à un niveau acceptable. Il y a, par exemple, les filtres basés sur des transistors ou des diodes à polarisation réglable, discrets ou intégrés dans des circuits intégrés spéciaux (amplis-op à transconductance comme le célèbre LM13700). Notre circuit basé sur les LDR accepte des signaux de plusieurs volts d'amplitude avec des valeurs de distorsion très basses. En fait, l'amplitude de la tension est surtout limitée par les amplis-op et la tension d'alimentation, car la plupart des LDR peuvent supporter jusqu'à 100 V ou plus. Vous pourriez même construire ce

filtre avec des tubes électroniques ! Comme le niveau de bruit du circuit est assez faible – il est principalement déterminé par les amplis-op et le bruit de la résistance équivalente des LDR – une large gamme dynamique peut être obtenue.

Un autre avantage du circuit est la fuite de tension de commande extrêmement faible (nulle ?) dans le chemin audio, car il n'y a qu'un couplage optique.

Avec des amplis-op adaptés, il fonctionne à partir d'une seule alimentation basse

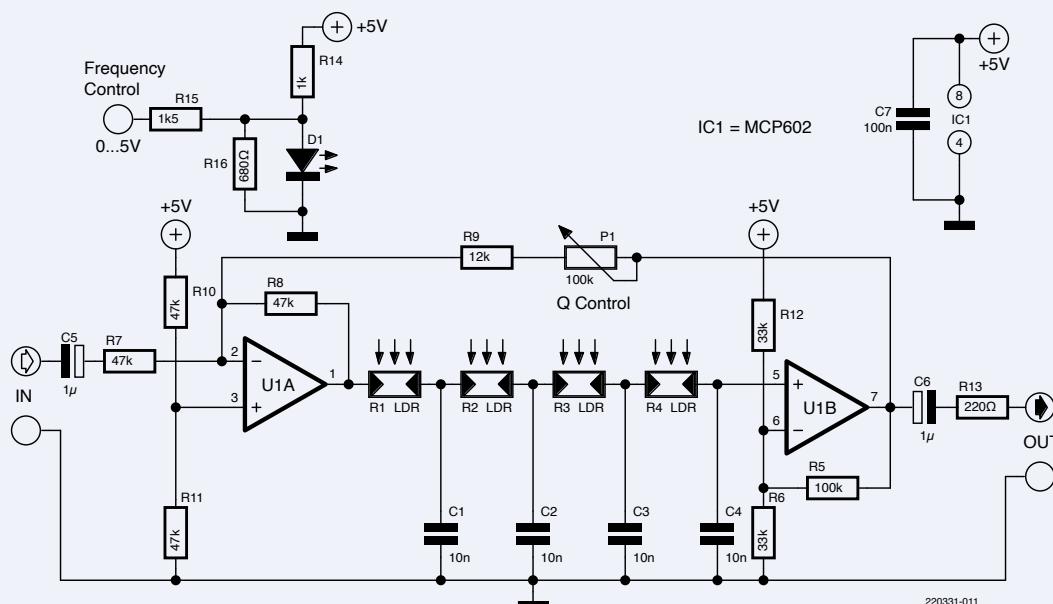


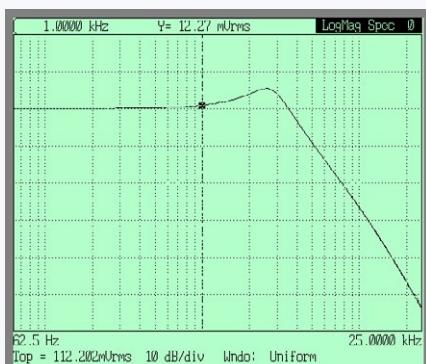
Figure 3. En ajoutant quelques résistances et condensateurs, le filtre à alimentation double peut être transformé en un filtre à alimentation simple.



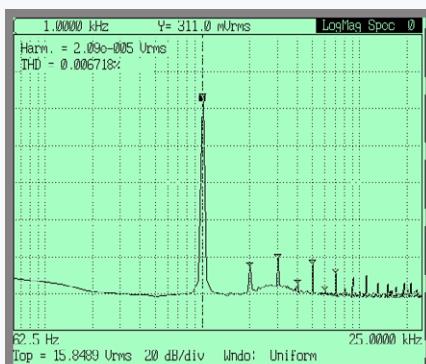
## Mesures de la distortion

Pour ces mesures, un analyseur de spectre FFT Stanford Research SR770 avec source intégrée a été utilisé. Pour éviter les parasites électriques et optiques, le circuit a été placé dans une boîte métallique fermée contenant également les 3 piles AAA de l'alimentation simple (figure 1).

Tout d'abord, l'analyseur a été réglé pour mesurer la courbe de réponse du filtre. Puis il a été réglé pour générer une onde sinusoïdale de 1 kHz et mesurer le spectre de sortie du filtre jusqu'à 25 kHz. À partir de là, il a calculé la distorsion harmonique totale (THD) pour les six premiers harmoniques. Le filtre a été réglé sur une fréquence de coupure de 4 kHz. La raison de ce choix est qu'il y a une rétroaction positive à la fréquence de coupure, ce qui augmente la distorsión : on se trouve dans le pire scénario possible (les deuxième et troisième harmoniques sont en général dominants). On pourrait penser qu'une partie des harmoniques supérieurs est supprimée, mais un test à  $f_c = 13$  kHz a montré un profil harmonique presque identique.



Réponse mesurée du filtre.



Spectre de distorsion du filtre mesuré.

tension (3 V à 5 V), ce qui le rend compatible avec les applications à microprocesseur comme Arduino.

L'utilisation d'un contrôle de tension sur la LED (voir l'encadré « La combinaison LED-LDR ») permet d'obtenir une courbe de contrôle grossière, mais approximativement exponentielle, nécessaire pour les applications de synthétiseur. Pour un contrôle plus précis (mais linéaire), une source de courant ou un signal PWM peut être appliqué à la LED.

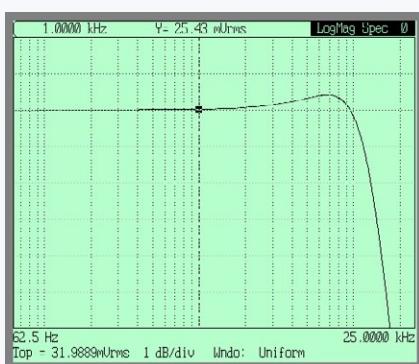
## Limites du concept

Pour être juste, le concept de filtre présenté ici présente également quelques inconvénients par rapport aux autres concepts. Le réglage de la fréquence de coupure n'est pas très précis. C'est suffisant pour un synthétiseur basique, mais pour des applications plus exigeantes, une table d'étalement ou un circuit de contre-réaction supplémentaire pourraient s'avérer nécessaires.

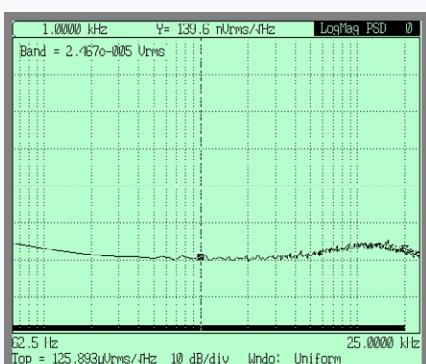
De plus, la vitesse de variation de la fréquence de coupure est limitée par la lenteur relative des LDR. Lorsque l'on augmente la fréquence du filtre, la réponse mesurée reste de l'ordre de la milliseconde mais sa diminution peut prendre jusqu'à 50 ms et même jusqu'à 500 ms pour les fréquences de coupure très basses. Des temps d'« attaque » courts sont donc possibles pour ouvrir le filtre au début d'une note. En musique, le temps d'attaque d'un son est généralement plus court que son temps de déclin, ce qui rend ce filtre adapté aux applications musicales.

## Mesure du bruit et gamme dynamique

Le spectre de bruit de sortie est mesuré avec la source éteinte et il montre au total 25  $\mu$ V effectif dans la bande audio jusqu'à 20 kHz. En combinaison avec la gestion maximale du signal de 4 Vcc (1,4 V effectif), cela conduit à une gamme dynamique de 95 dB. Notez que vous pouvez améliorer ce résultat en utilisant des tensions d'alimentation plus élevées.



Courbe de réponse mesurée du filtre réglé à -3 dB à 13 kHz (1 dB/div).



Spectre mesuré du bruit de sortie du filtre.

## Suggestions et remarques

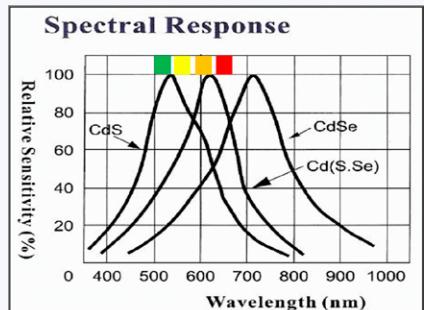
La plage dynamique peut être encore augmentée en utilisant des tensions d'alimentation plus élevées. Comme mentionné précédemment, les LDR peuvent généralement gérer des signaux jusqu'à 100 V.

Pour obtenir un contrôle de fréquence plus précis et plus stable, vous pourriez utiliser cinq LDR au lieu de quatre et en utiliser un dans la boucle de rétroaction d'un ampli-op pilotant la LED. Le filtre ayant été conçu pour des applications de synthétiseur de musique, le gain a été rendu assez dépendant de la valeur de Q pour éviter de fortes

## La combinaison LED-LDR

### Construction

La LED est montée en suspension à environ 5 à 7 mm au-dessus des quatre LDR. Les exigences en matière de précision mécanique sont modestes, les mesures ne montrent aucune différence de réponse significative lorsque la LED est poussée de 1 à 2 mm hors de l'axe. Veillez à protéger correctement le circuit de la lumière ambiante, car elle modulera également le filtre !



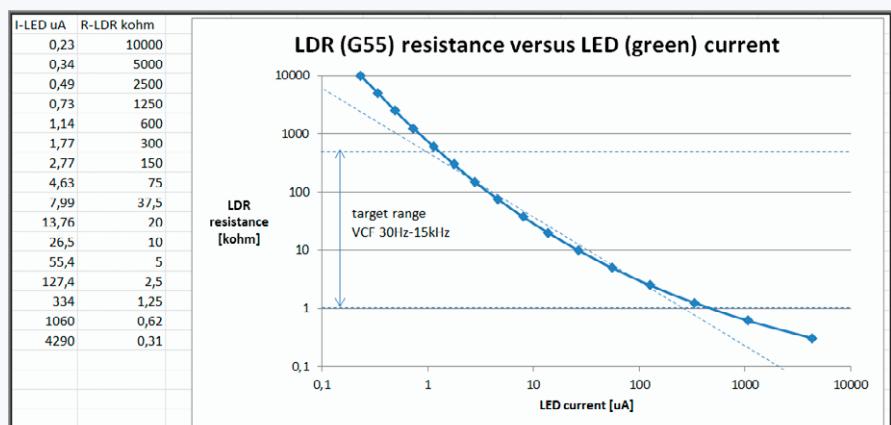
Source : JCLH, fiche technique du LDR GL5537-1

### Choix de la couleur de la LED

J'ai utilisé des LDR à base de CdS, alors le vert ou le jaune fonctionne le mieux comme le montre ce diagramme de réponse spectrale.

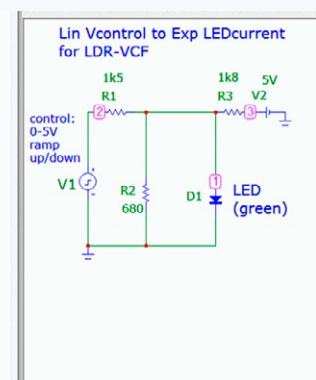
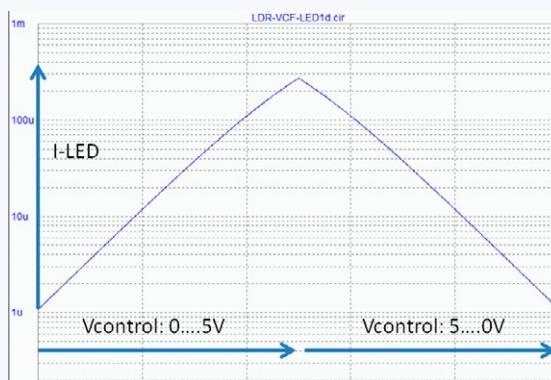
### Sensibilité

Les mesures ont montré que la résistance de la LDR est proche d'une fonction linéaire du courant dans la LED dans la plage de résistance de 500 kΩ à 1 kΩ. Au total, la résistance de la LDR a pu être contrôlée de 10 MΩ à 300 Ω, comme le montre cette courbe mesurée.



Note : Une LED verte à très haute luminosité a été utilisée ici (OVLBG4C7), 0,5 μA était suffisant pour avoir une lumière visible et pour commencer à diminuer la résistance de la LDR.

Il y a un moyen très simple mais approximatif d'obtenir une courbe de contrôle exponentielle sans utiliser de circuits supplémentaires. Le principe est le suivant. Lorsque l'on applique une tension à une diode (ici la LED), le courant résultant est une fonction exponentielle de cette tension. Connecter une source de tension directement à une LED n'est pas une bonne idée, mais ici nous utilisons des valeurs de résistance suffisamment faibles pour nous en approcher. La simulation ci-dessous montre que lorsque la tension appliquée à la LED varie linéairement de 0 à 5 V, le courant varie exponentiellement de 1 μA à 300 μA. Dans la pratique, vous devrez peut-être adapter un peu les valeurs des résistances à votre LED. Comme mentionné, cette méthode est assez imprécise et dépendante de la température mais c'est la façon la plus simple d'approcher le contrôle exponentiel pour les applications de synthétiseur. Les exemples sonores ont été réalisés en utilisant ce contrôle.



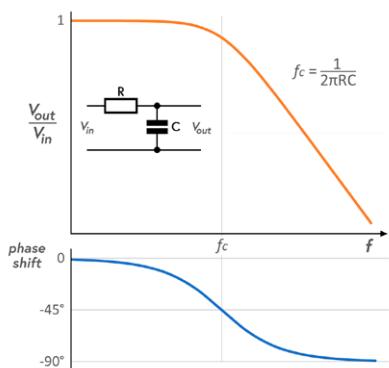
augmentations du signal de sortie. Comme alternative, le signal d'entrée pourrait être appliqué à l'entrée non-inverseuse de U1a au lieu de son entrée inverseuse. Cela limiterait l'influence de la valeur Q sur le gain du filtre et le filtre aurait une fonction de transfert non inverseuse. ↗

(220331-04) – VF : Helmut Müller

## Des questions, des commentaires ?

Envoyez un courriel à l'auteur (rs.elc.projects@gmail.com) ou contactez Elektor (redaction@elektor.fr).

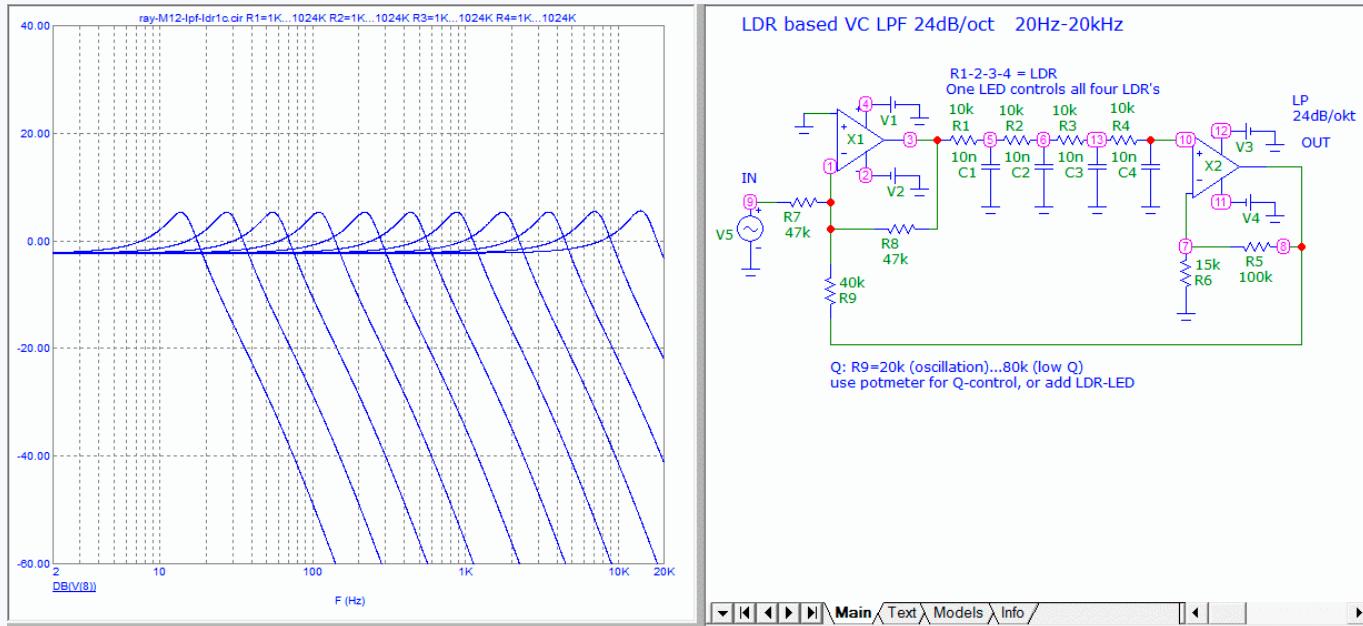
## Le contrôle Q du filtre expliqué



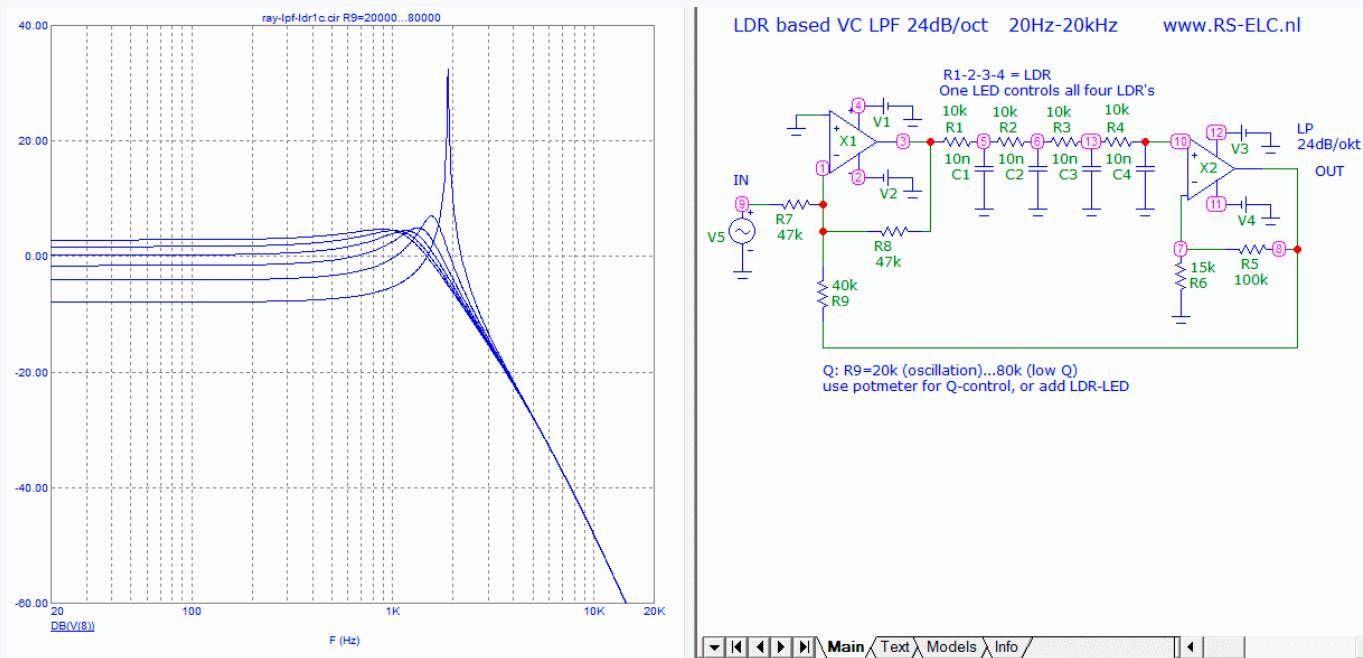
Un filtre passe-bas RC n'est pas seulement un filtre mais aussi un déphaseur dépendant de la fréquence, partant de 0°, passant à -45° à la fréquence de coupure et tendant vers -90° au-delà. Avec quatre de ces filtres RC en série, le déphasage à la fréquence de coupure devient  $4 \times -45 = -180^\circ$ . Cela signifie que le signal change de signe à cette fréquence. Par conséquent, lorsque nous appliquons une rétroaction négative de la sortie vers l'entrée du filtre, il en résulte une rétroaction positive à la fréquence de coupure, ce qui produit un pic de gain à cette fréquence. Cela donne à votre filtre une transition nette à la fréquence de coupure. En ajustant la quantité de rétroaction négative, le pic de gain peut être modifié. À un certain niveau de rétroaction maximale, le filtre peut devenir un oscillateur (sinusoïdal) réglable de 20 Hz à 20 kHz.



## Résultats de la simulation de la réponse du filtre



Dans cette simulation, la fréquence de coupure du filtre est balayée de 20 Hz à 20 kHz tout en maintenant le contrôle Q à une valeur constante.



Ici, le contrôle du Q du filtre (R9) est balayé de 80 kΩ à 20 kΩ tout en gardant le contrôle de la fréquence de coupure à une valeur constante.



## Produits

- Joy-IT ScopeMega50 Oscilloscope USB (SKU 18277) [www.elektor.fr/18277](http://www.elektor.fr/18277)
- Carte d'entrée MIDI - circuit imprimé (SKU 18382) [www.elektor.fr/18382](http://www.elektor.fr/18382)
- Livre en anglais « The LTspice XVII Simulator » (SKU 19741) [www.elektor.fr/19741](http://www.elektor.fr/19741)

## LIENS

- [1] Ce projet à Elektor Labs : [www.elektormagazine.fr/labs/voltage-controlled-24db/oct-synthesizer-filter-using-ldrs](http://www.elektormagazine.fr/labs/voltage-controlled-24db/oct-synthesizer-filter-using-ldrs)