

# Le filtrage dans le conditionnement du signal

Bernard Teston

Laboratoire Parole et Langage  
UMR 6057 CNRS Université de Provence

## Le conditionnement du signal

- C'est l'ensemble des opérations appliquées à un signal dans le but d'en extraire l'information la plus efficace possible.
- Le signal est généralement issu d'un capteur avant conversion analogique-numérique.

## Le filtrage

- Le filtrage d'un signal est l'opération qui consiste à séparer les composantes de ce signal selon leurs fréquences. Il représente la plus importante opération de conditionnement du signal après l'amplification.
- On appelle filtre tout circuit qui réalise cette opération.
- Les intervalles de fréquence dans lesquelles les composantes du signal sont transmises sont appelés bandes passantes. Ceux dans lesquelles elles sont supprimées sont appelés bandes coupées.
- La fonction essentielle du filtrage est de séparer différents signaux dans un canal de transmission. Il est utilisé pour extraire la partie utile des signaux en éliminant les bruits et les composantes non pertinentes.

# Les différentes fonctions de filtrage

Il existe deux filtres fondamentaux;

- Les filtres Passe - Bas, qui laisse passer les fréquences d'un signal inférieures à une valeur donnée, la fréquence de coupure ( $F_c$ ).

- Les filtres Passe - Haut, qui laissent passer les fréquences d'un signal supérieures à la fréquence de coupure ( $F_c$ ).

En associant ces deux filtres fondamentaux, il est possible de réaliser:

- Les filtres Passe - Bande qui laissent passer les fréquences comprises entre une fréquence de coupure inférieure ( $F_{cInf}$ ) et une fréquence de coupure supérieure ( $F_{cSup}$ ).

- Les filtres Coupe - Bande qui atténuent les fréquences comprises entre une fréquence de coupure inférieure ( $F_{cInf}$ ) et une fréquence de coupure supérieure ( $F_{cSup}$ ).

A partir d'un filtre Passe - Bas normalisé, il est possible de le transposer en Passe - Bande ou en Passe - Haut, puis en Coupe - Bande.

Enfin, il est possible de réaliser des filtres Passe – Tout qui laissent passer toutes les fréquences mais en les retardant de manière contrôlée.

## Filtre idéal et filtre réel

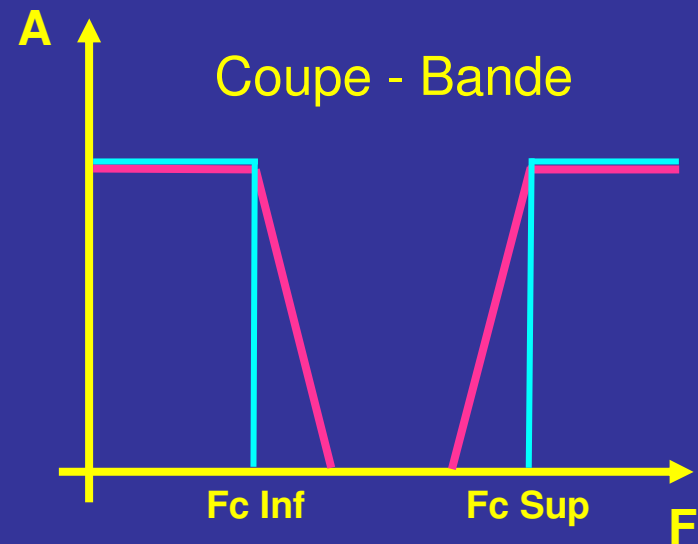
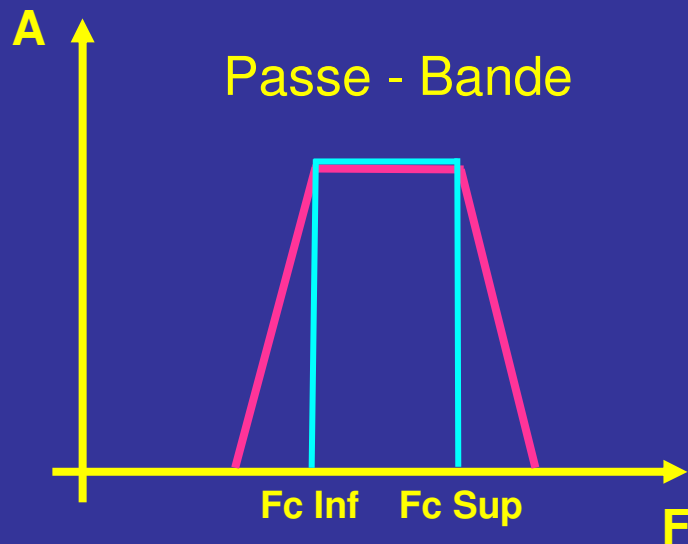
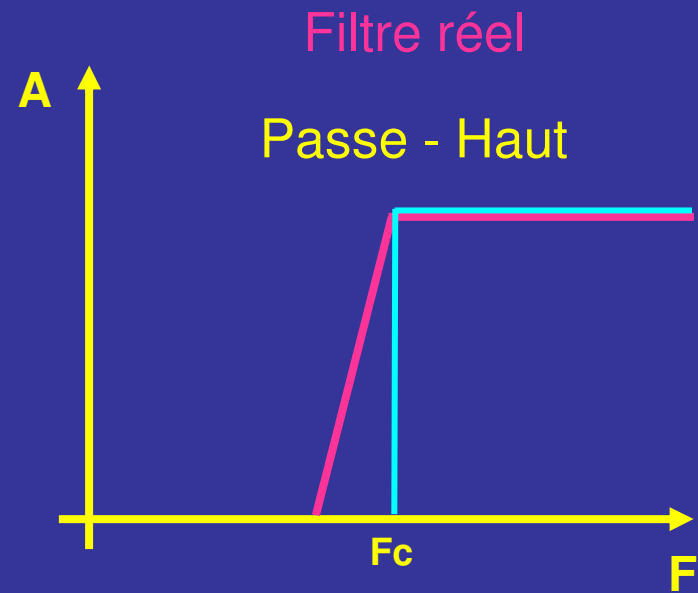
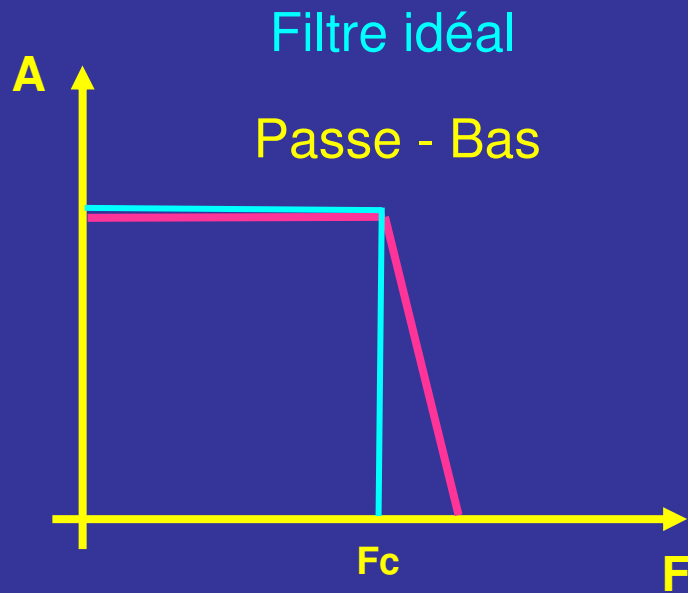
Un filtre idéal est un dispositif qui n'apporte aucune distorsion au signal qui le traverse en dehors de celle prévue par sa fonction spécifique. Il doit également avoir une atténuation nulle en bande passante et infinie en bande coupée. Il doit avoir enfin une largeur de transition nulle entre la bande passante et la bande coupée.

Tout filtre physiquement réalisable ou filtre réel, ne répond pas à tous ces critères. En premier lieu, il a toujours une influence plus ou moins marquée sur le déroulement temporel du signal qui le traverse. Ensuite il n'est pas possible de réaliser un filtre ayant une transition entre bande passante et bande coupée de largeur nulle. Enfin, les composants électroniques utilisés pour la réalisation du filtre ne sont pas parfaits. Ils sont des sources multiples de bruits, ils ont des gains finis, des dérives de caractéristiques et des distorsions propres. Il est pour cela impossible que le filtre réel puisse avoir une atténuation nulle en bande passante et infinie en bande coupée.

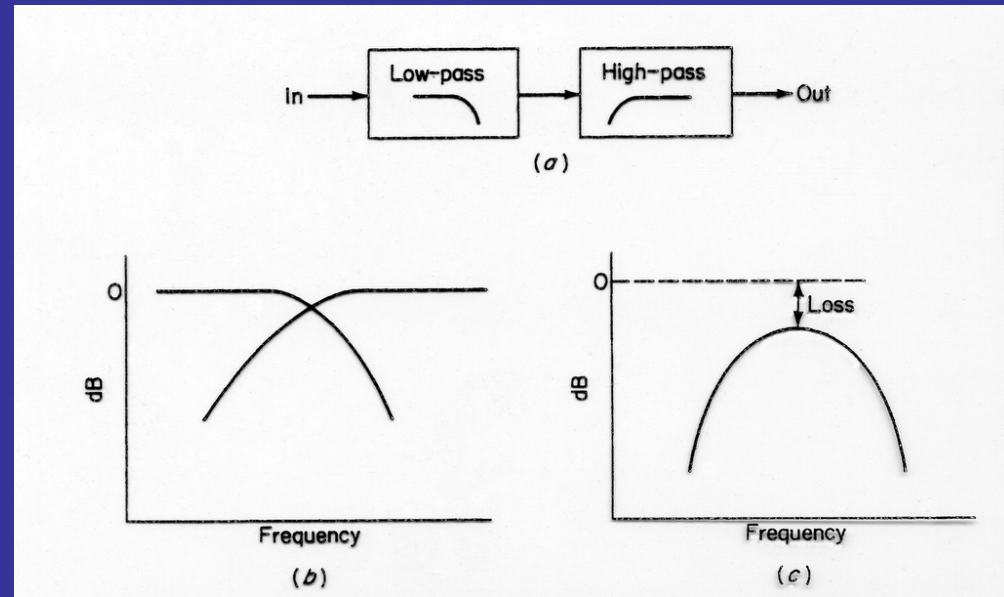
On définit le filtre réel par rapport à son correspondant idéal par les caractéristiques suivantes:

- L'atténuation minimale de la bande passante.
- L'atténuation maximale de la bande coupée.
- La largeur de la bande de transition.

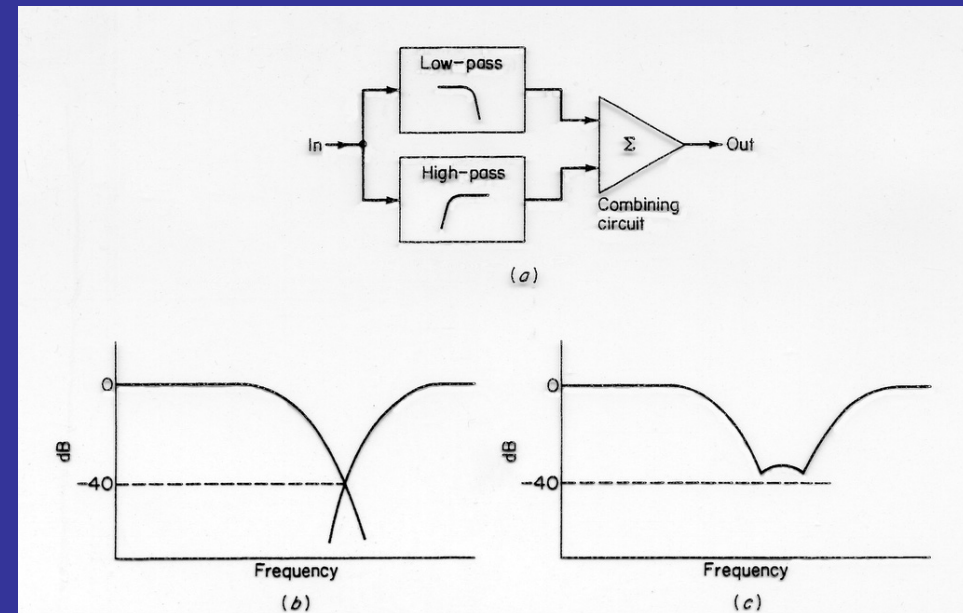
# Les fonctions de filtrage

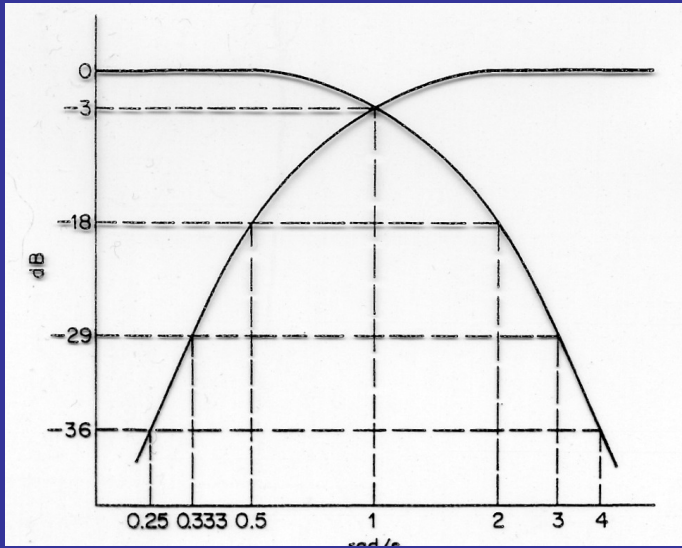


Réalisation d'un filtre Passe-Bande par la mise en série d'un Passe-Haut et d'un Passe-Bas

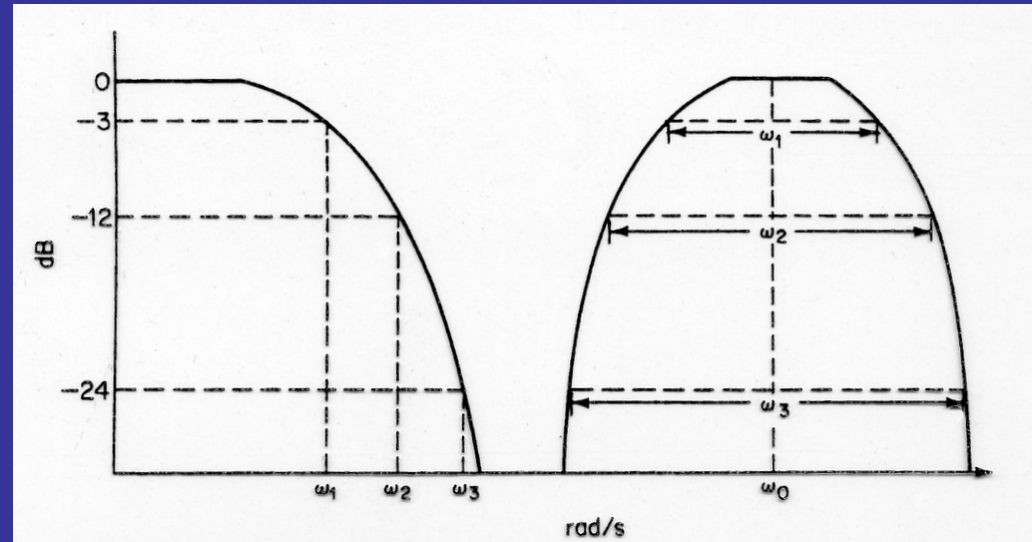


Réalisation d'un filtre Coupe-Bande par association d'un Passe-Haut et d'un Passe-Bas avec un sommateur

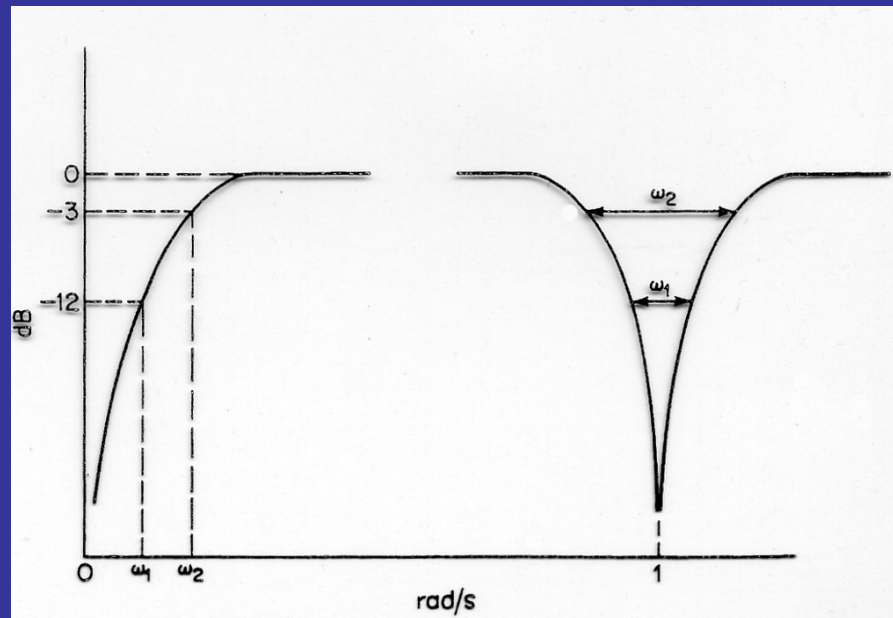




Transposition d'un filtre PB en filtre PH



Transposition d'un filtre PB en filtre PB



Transposition d'un filtre PH en filtre CB

## Les différents types de filtres

Le filtrage moderne s'applique à tous les signaux depuis les TBF jusqu'aux UHF.

Le filtre universel n'existe malheureusement pas et plusieurs principes physiques, électriques ou mécaniques peuvent être appliqués pour réaliser des filtres dont les principaux sont:

- Les filtres électriques passifs à selfs et capacités.
- Les filtres électromécaniques, à résonateurs piézoélectriques, à onde de surface, à transfert de charges.
- Les filtres numériques.
- Les filtres actifs à amplificateurs opérationnels, résistances et capacités ou filtres RC-actifs.**



## Les caractéristiques d'un filtre actif

- La courbe de réponse du filtre, qui définit la forme de l'affaiblissement des composantes fréquentielles du signal filtrées.
- Le comportement dynamique du filtre (temps de propagation, réponse impulsionnelle, phase, etc..).
- Le bruit et la distorsion apportés par le filtre.
- La sensibilité aux tolérances et à la stabilité des composants du filtre.
- Le prix de revient du filtre.

On doit donc adapter ces différentes caractéristiques à la

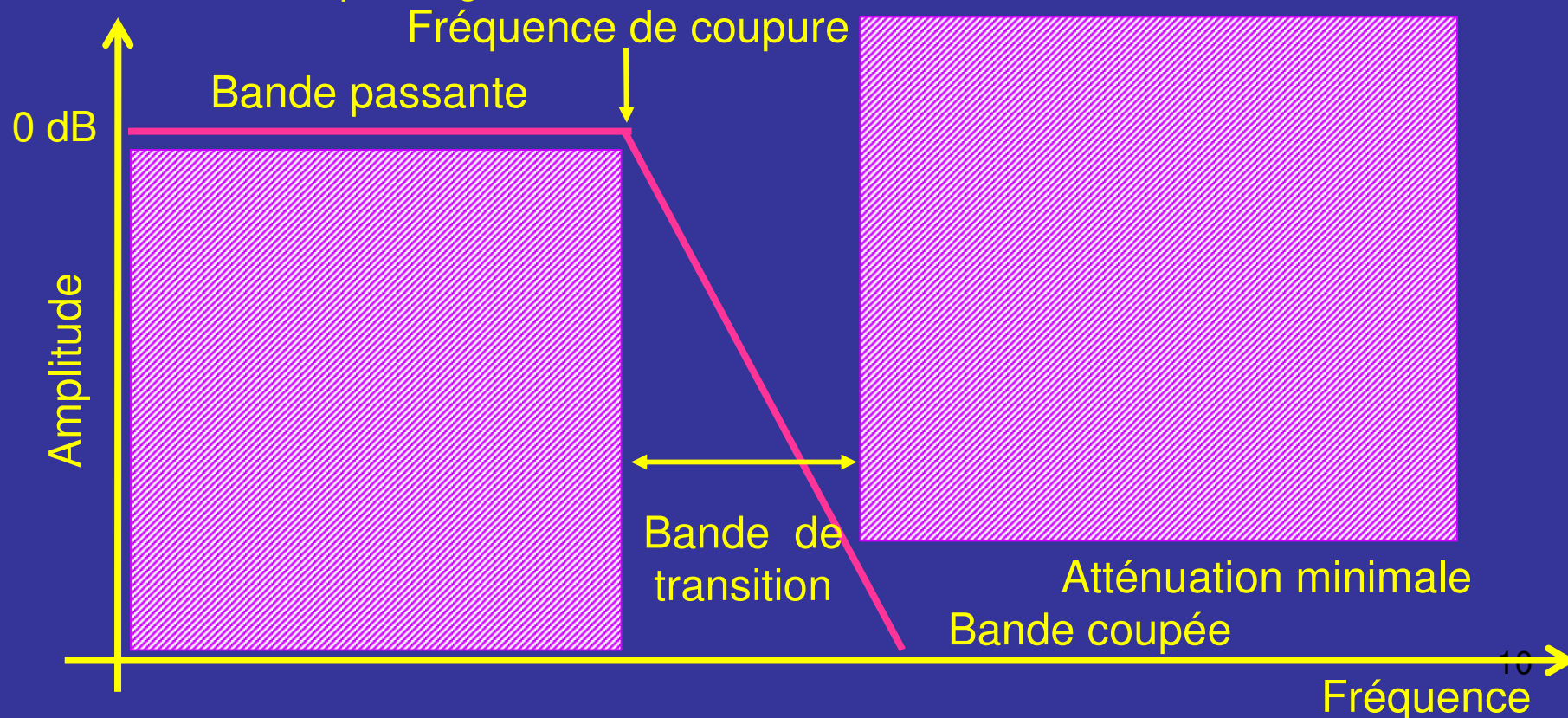
**nature du signal à filtrer**

## Définition du gabarit d'un filtre

La réalisation d'un filtre nécessite tout d'abord de définir son gabarit c'est-à-dire la représentation graphique des conditions limites amplitude-fréquence imposées. Pour cela les paramètres suivants du filtre doivent être précisés :

- Le niveau du signal dans la bande passante (0dB).
- L'atténuation du filtre dans la bande coupée (XdB).
- La ou les fréquences de coupure (Hz).
- La largeur de bande de transition de l'atténuation (Hz).
- Les éventuelles variations de gain dans la bande passante et coupée (dB).

Ci-dessous: exemple du gabarit d'un filtre Passe – Bas.



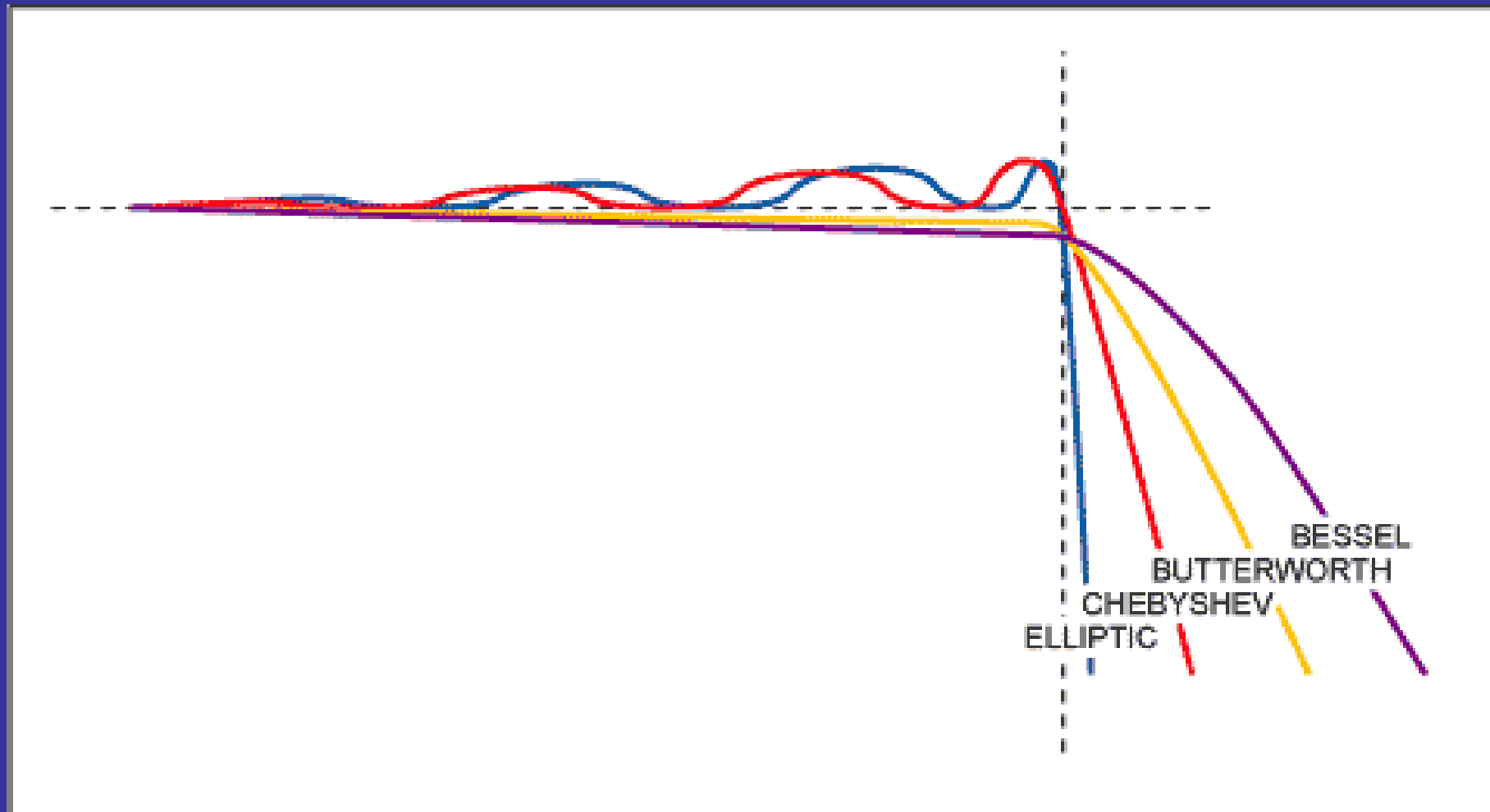
# Approximation de la réponse fréquentielle du filtre et fonction de transfert

A partir du gabarit on va choisir parmi les différentes formes approximées au moyen de divers polynômes ou autres fonctions, celle la mieux adaptée. Ce choix doit également tenir compte du comportement dynamique et de la réponse aux transitoires du polynôme en fonction de la nature du signal.

Les polynômes de Bessel, Butterworth, Chebyshev et Cauer décrivent les formes de réponses les plus couramment utilisées. Lorsque l'on applique une approximation donnée pour réaliser un filtre on parle alors de filtre de Bessel , Butterworth, Cauer etc..

Le polynôme choisi pour coller au plus près du gabarit a une fonction de transfert caractéristique qui décrit le rapport de la tension de sortie du filtre à sa tension d'entrée en fonction de la fréquence représentée par la courbe d'affaiblissement (ou courbe de réponse en fréquence).

Détails des fluctuations d'amplitude de la bande transmise et de la pente d'atténuation à la fréquence de coupure, pour les principales approximations d'un filtre Passe-Bas.



# Caractéristiques de l'atténuation d'un filtre Passe-Bas de Cauer (ou elliptique) en comparaison avec les filtres de Butterworth et de Chebyshev.

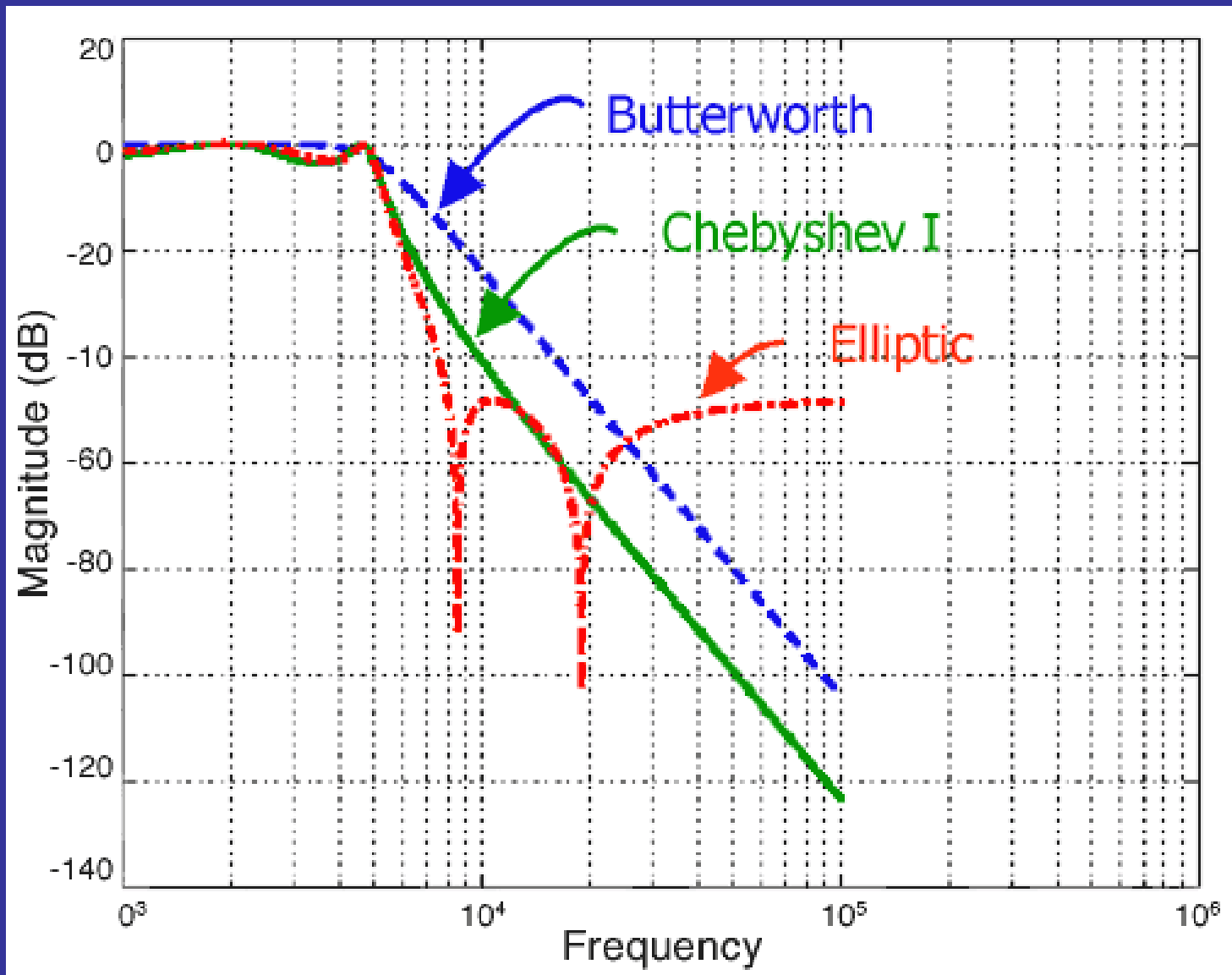
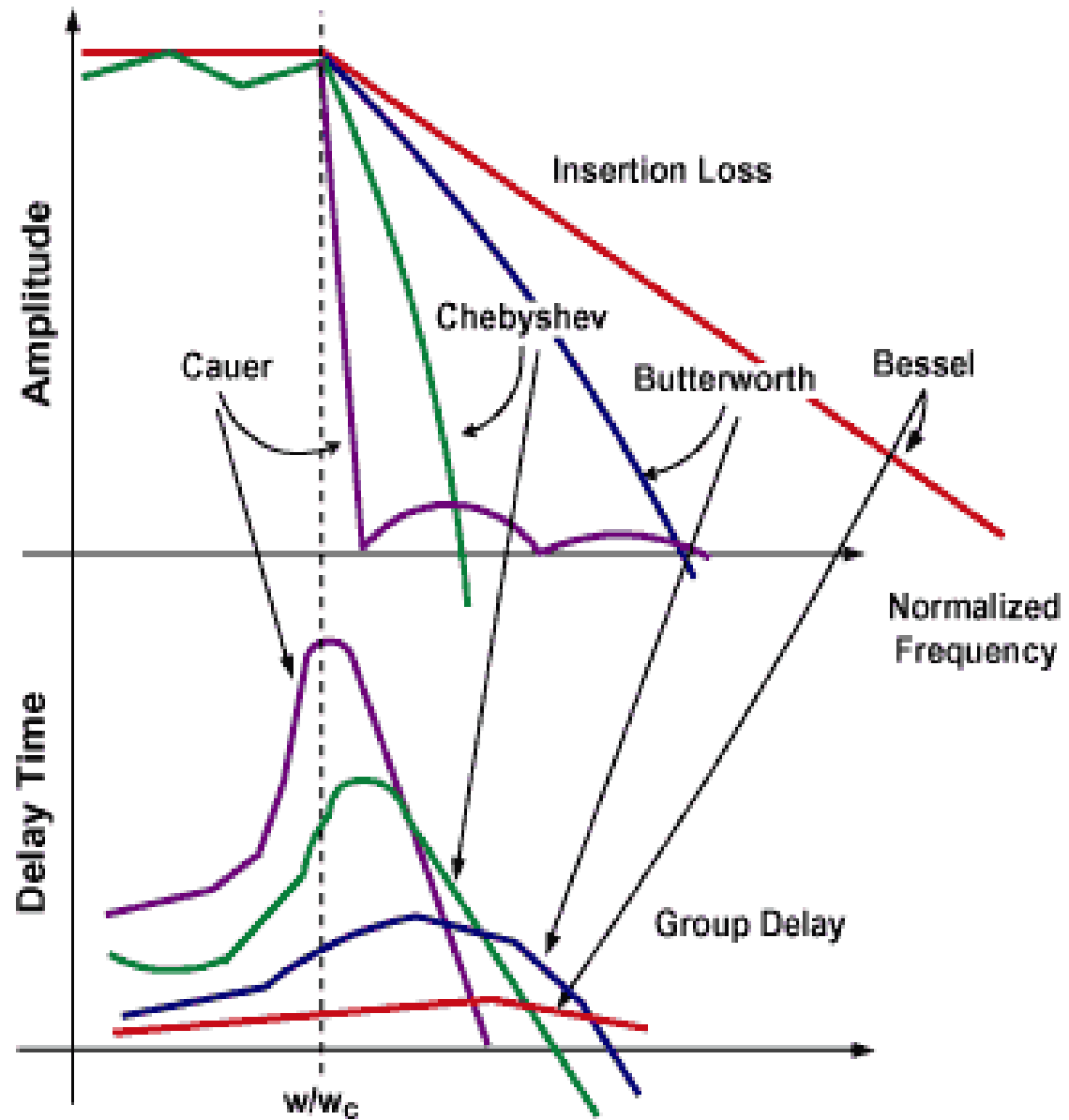


Tableau comparatif de la réponse en fréquence et du temps de propagation de groupe des principales approximations d'un filtre Passe-Bas.

*D'une manière générale plus la pente d'atténuation des fréquences coupées d'un filtre est forte, plus il perturbe le décours temporel du signal.*



# Fonction de transfert

La fonction de transfert se présente sous la forme d'une fraction rationnelle, :  $H(p) = k \text{ Num}(p) / \text{Den}(p)$ , où  $p$  est l'opérateur de Laplace ( $s$  pour les américains). Les valeurs de  $p$  qui annulent le numérateur sont les zéros de la fonction, les valeurs qui annulent le dénominateur en sont les pôles. L'ordre  $N$  d'un filtre est défini par l'exposant le plus élevé de  $p$  au dénominateur de la fonction de transfert.

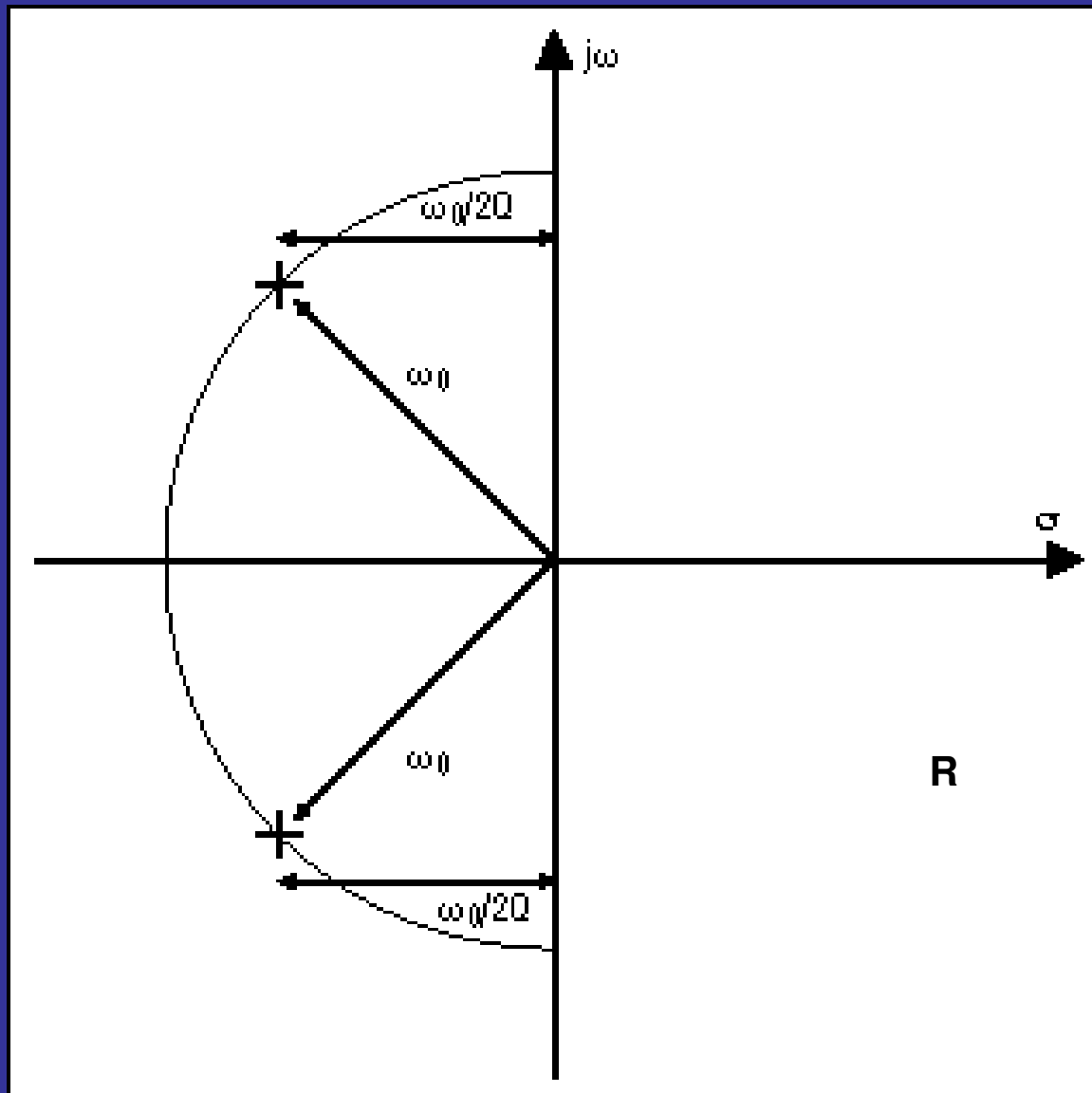
L'opérateur de Laplace est donné par la relation suivante

$$p = Re + j\omega \text{ ou } s = \sigma + j\omega$$

Où  $Re$  ou  $\sigma$  partie réelle représentent la partie transitoire du signal, et  $j\omega$  partie imaginaire, représente le régime harmonique du signal. Les deux axes du plan complexe de Laplace sont définis par la partie réelle (ordonnée) et imaginaire (abscisse) de  $p$ . La répartition des pôles et des zéros de la fonction de transfert du filtre nous permet de prévoir ses caractéristiques.

Quelle que soit la complexité de la fonction de transfert, le calcul des éléments du filtre se fait toujours par l'intermédiaire d'une suite de fonctions élémentaires d'ordre 2 associées à un amplificateur opérationnel. Un circuit du premier ordre est ajouté dans les cas d'un filtre d'ordre impair.

Pour qu'un filtre soit stable, tous ses pôles doivent avoir une partie réelle strictement négative.

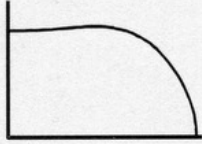
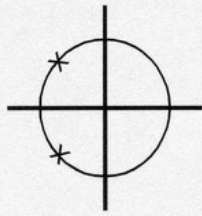
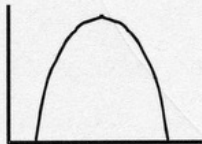
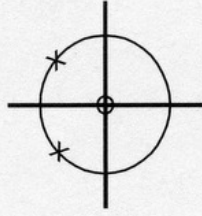

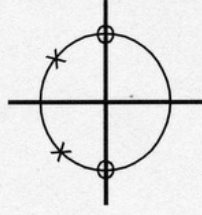
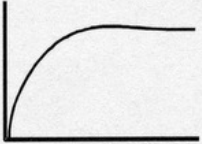
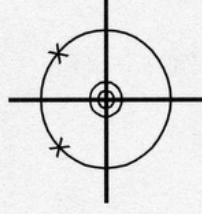
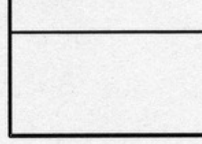
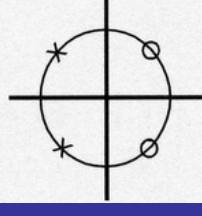


Position des pôles d'une fonction de transfert du 2ème ordre dans le plan complexe de Laplace en fonction de la pulsation  $\omega$  et du facteur de qualité  $Q$ .

Les pôles se trouvent sur le cercle unité et éloignés de l'axe  $j\omega$  en fonction inverse de la valeur de  $Q$ .

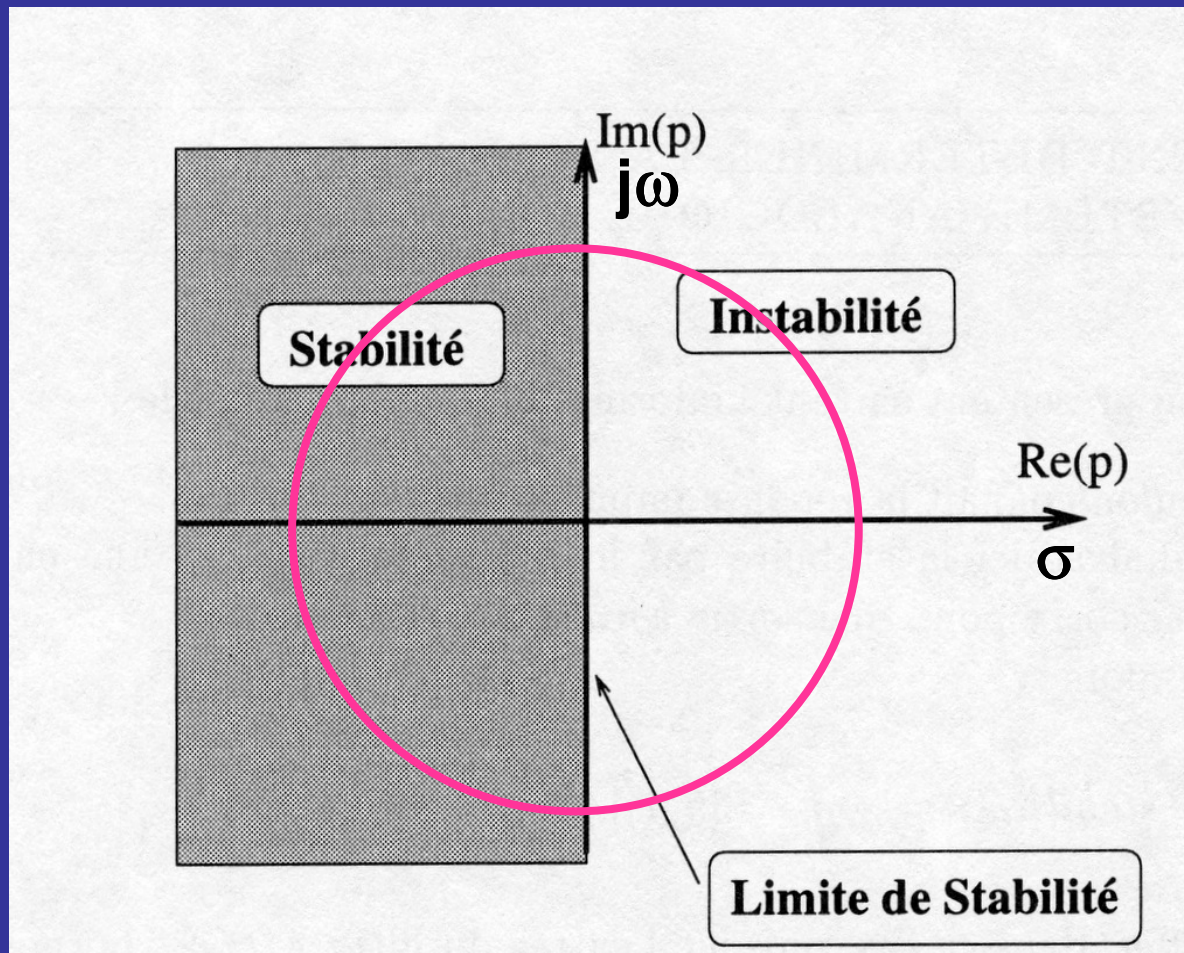


Courbe de réponse, plan complexe de Laplace et fonction de transfert des différentes fonctions de filtrage du 2ème ordre.

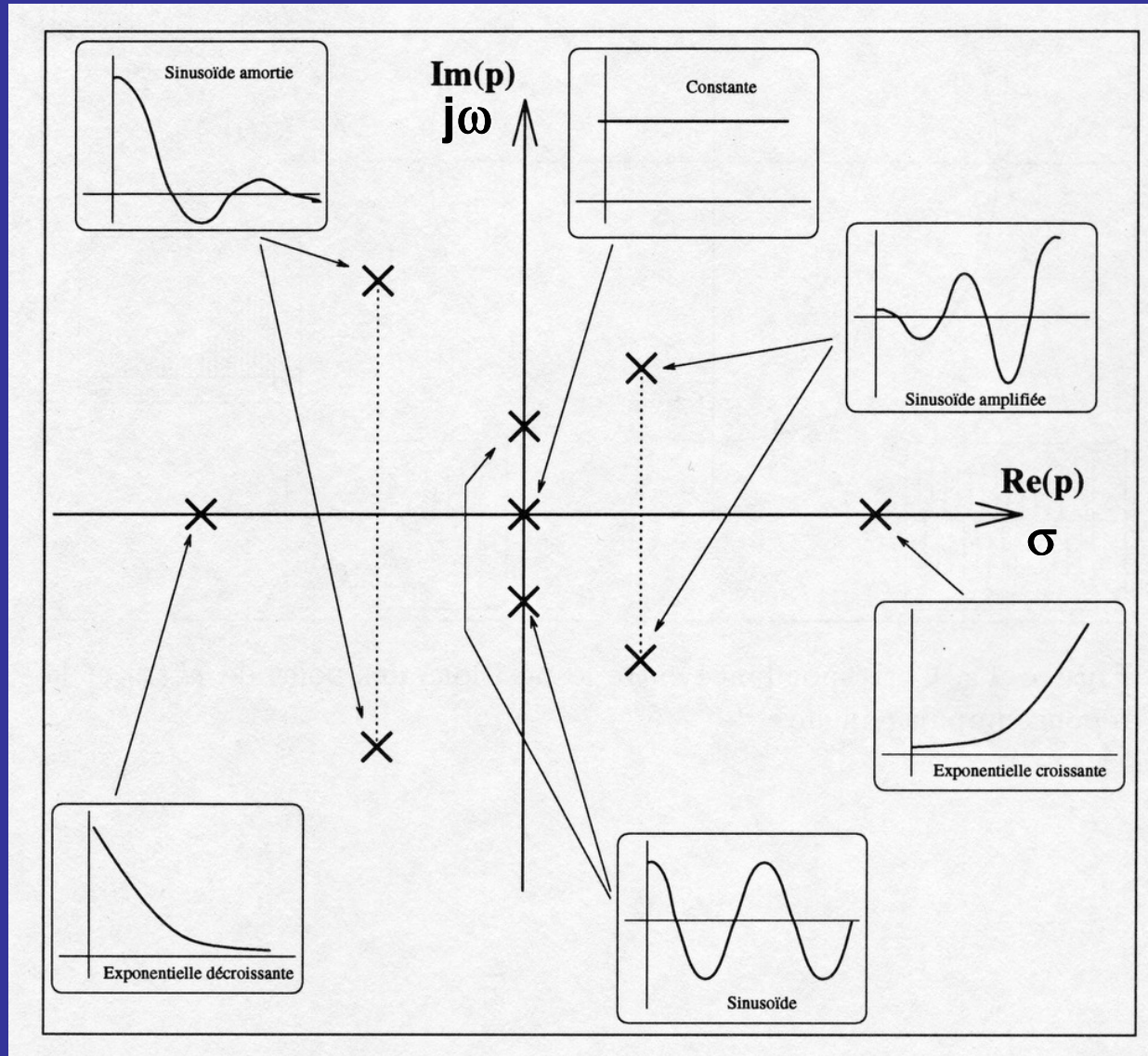
FILTER TYPE	MAGNITUDE	POLE LOCATION	TRANSFER EQUATION
LOW PASS			$\frac{\omega_0^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2}$
BAND PASS			$\frac{\frac{\omega_0^2}{Q}s}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2}$
NOTCH (BANDREJECT)			$\frac{s^2 + \omega_z^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2}$
HIGH PASS			$\frac{s^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2}$
ALL PASS			$\frac{s^2 - \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2}$

## Domaine de stabilité d'un filtre dans le plan de Laplace

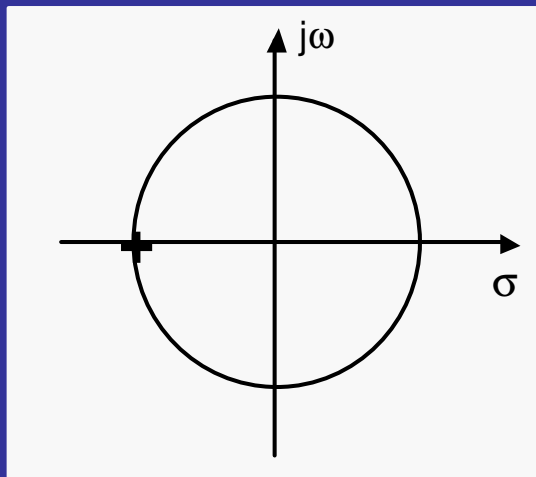
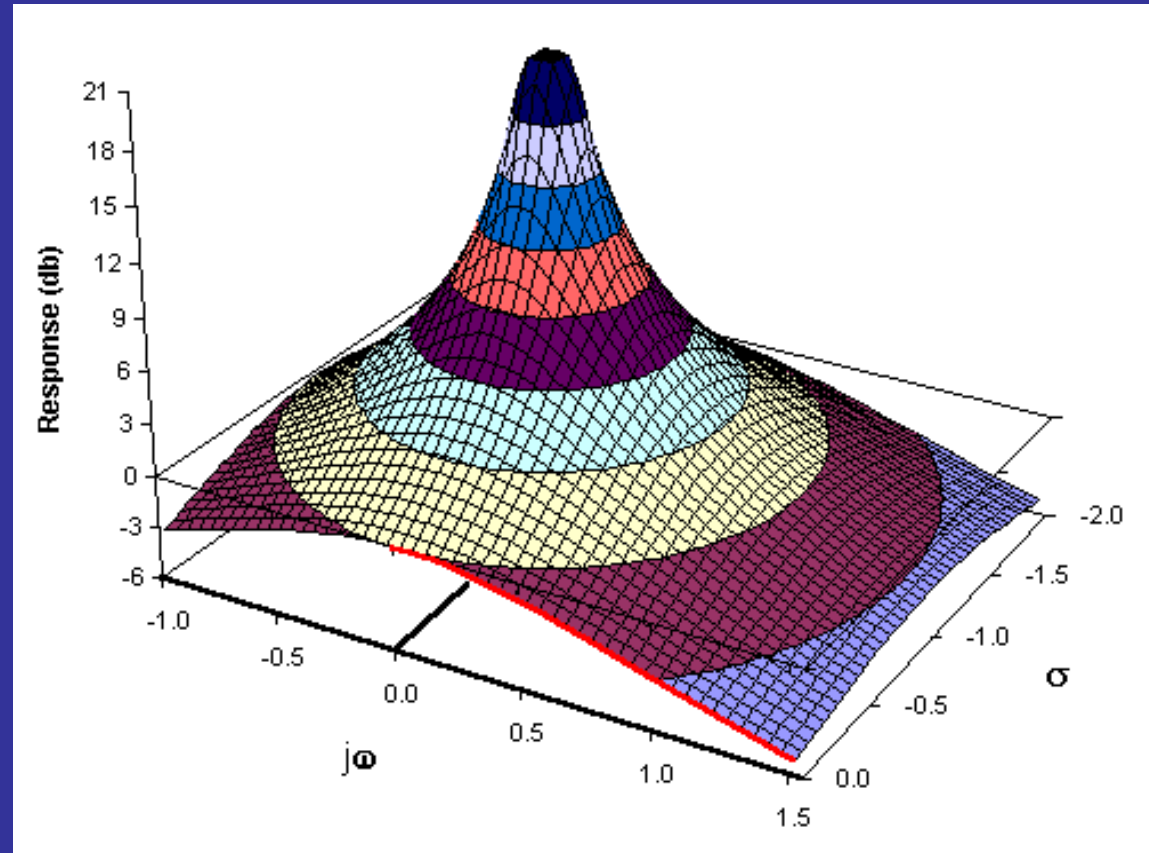
Pour q'un filtre soit stable, tous ses pôles doivent avoir une partie réelle strictement négative



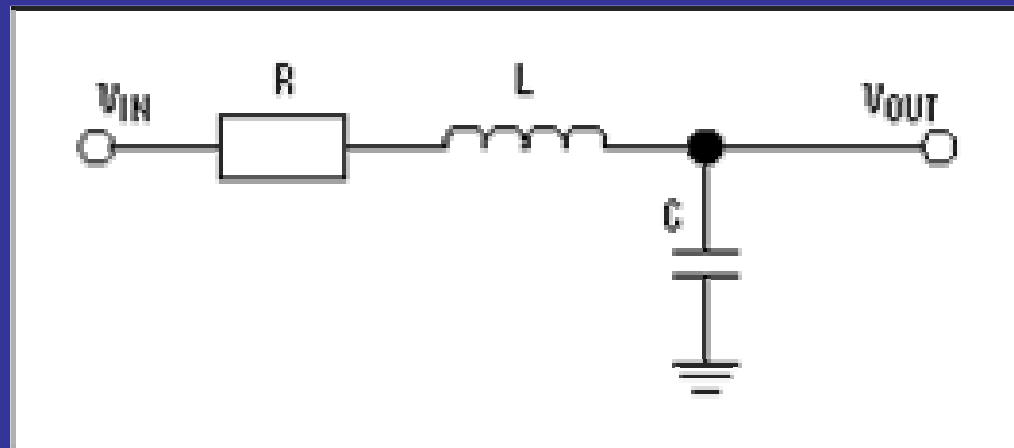
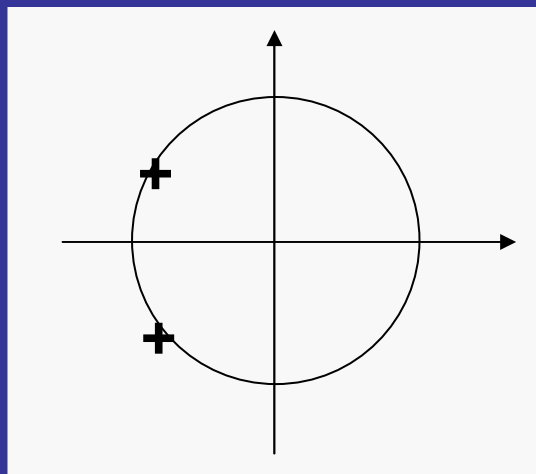
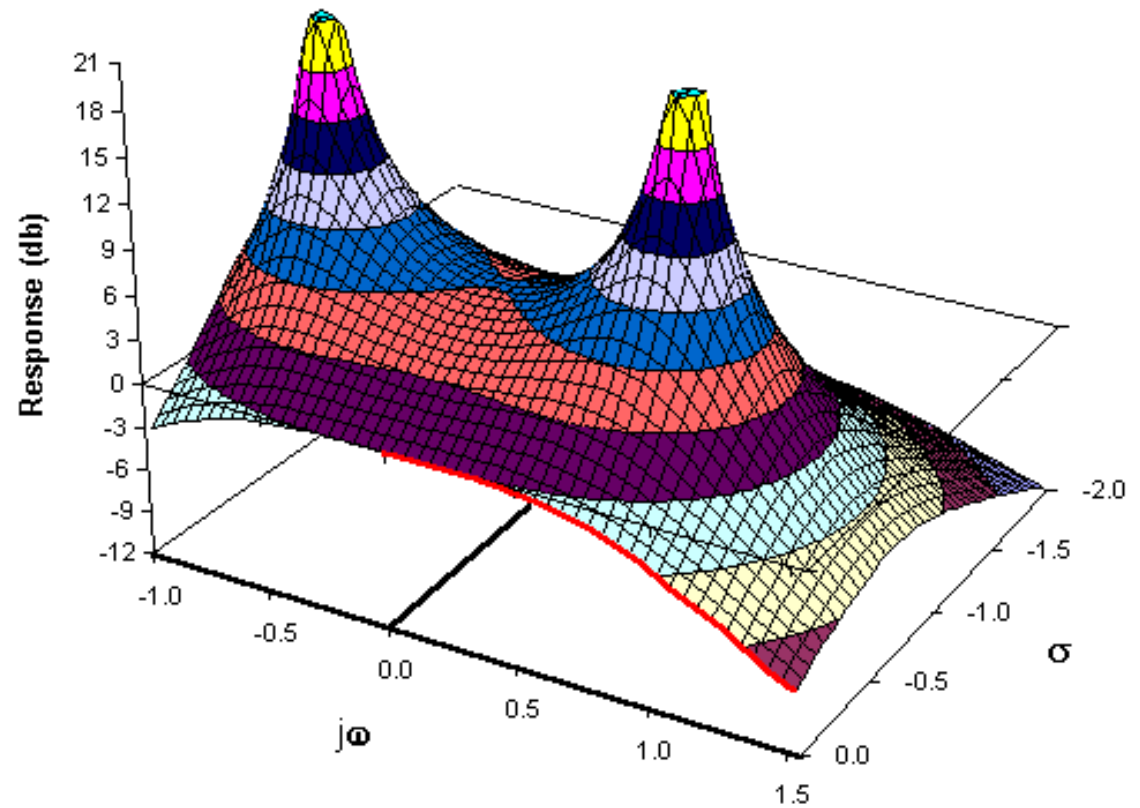
# Comportement d'un filtre à une excitation transitoire en fonction de la position des pôles de sa fonction de transfert dans le plan complexe de Laplace

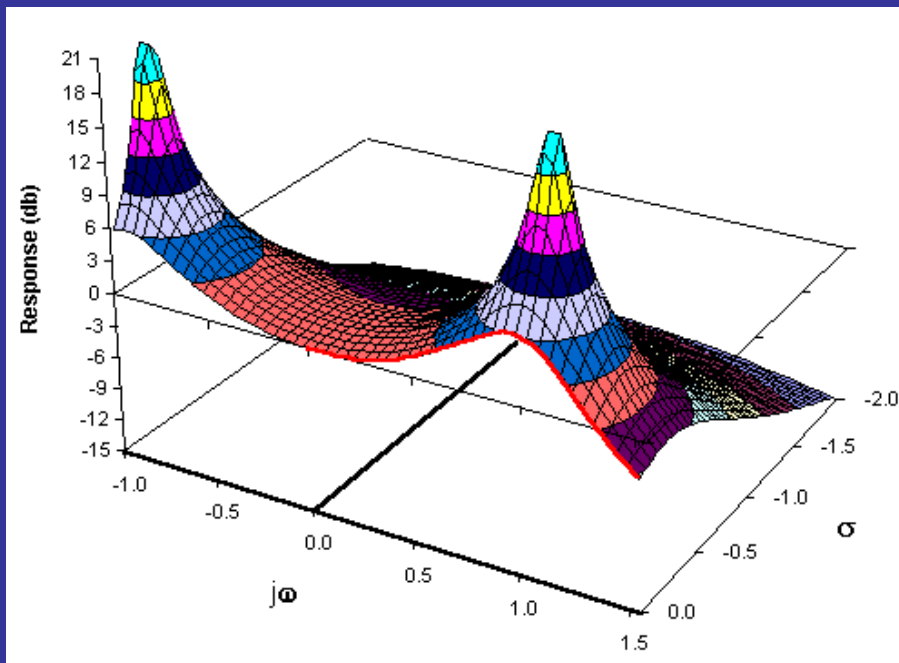


# Plan de Laplace d'un filtre Passe – Bas du 1er ordre

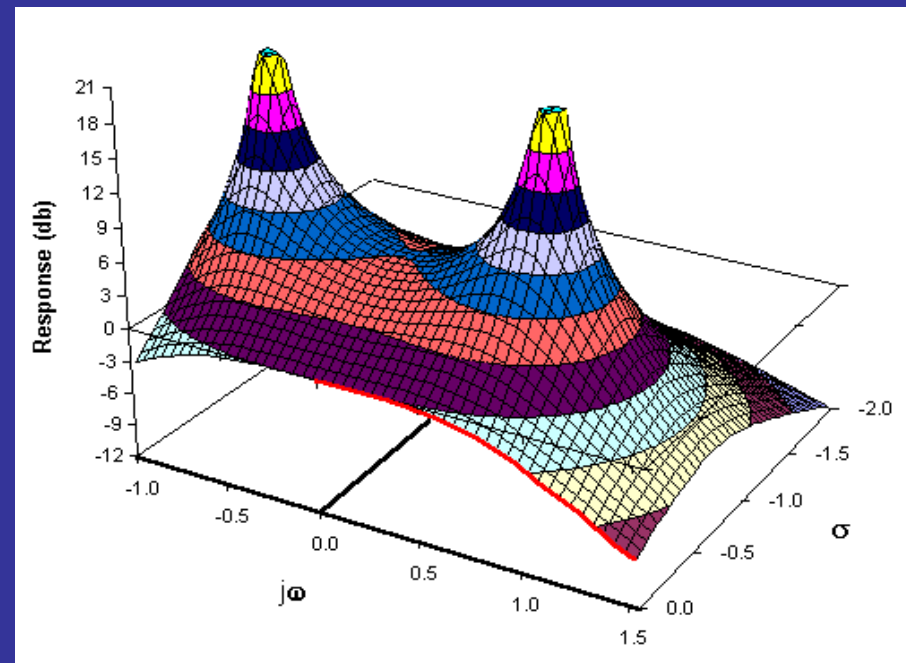


# Plan de Laplace d'un filtre Passe – Bas du 2ème ordre





$$Q = 2$$

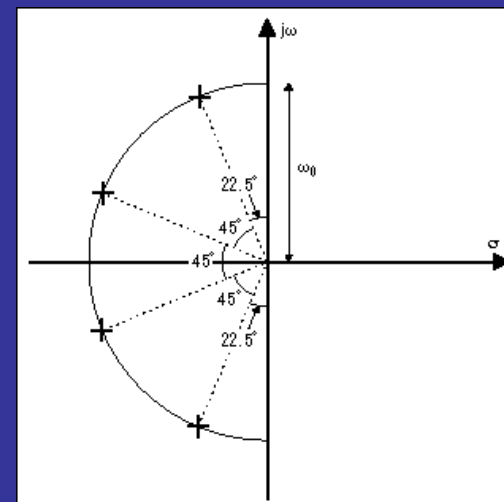
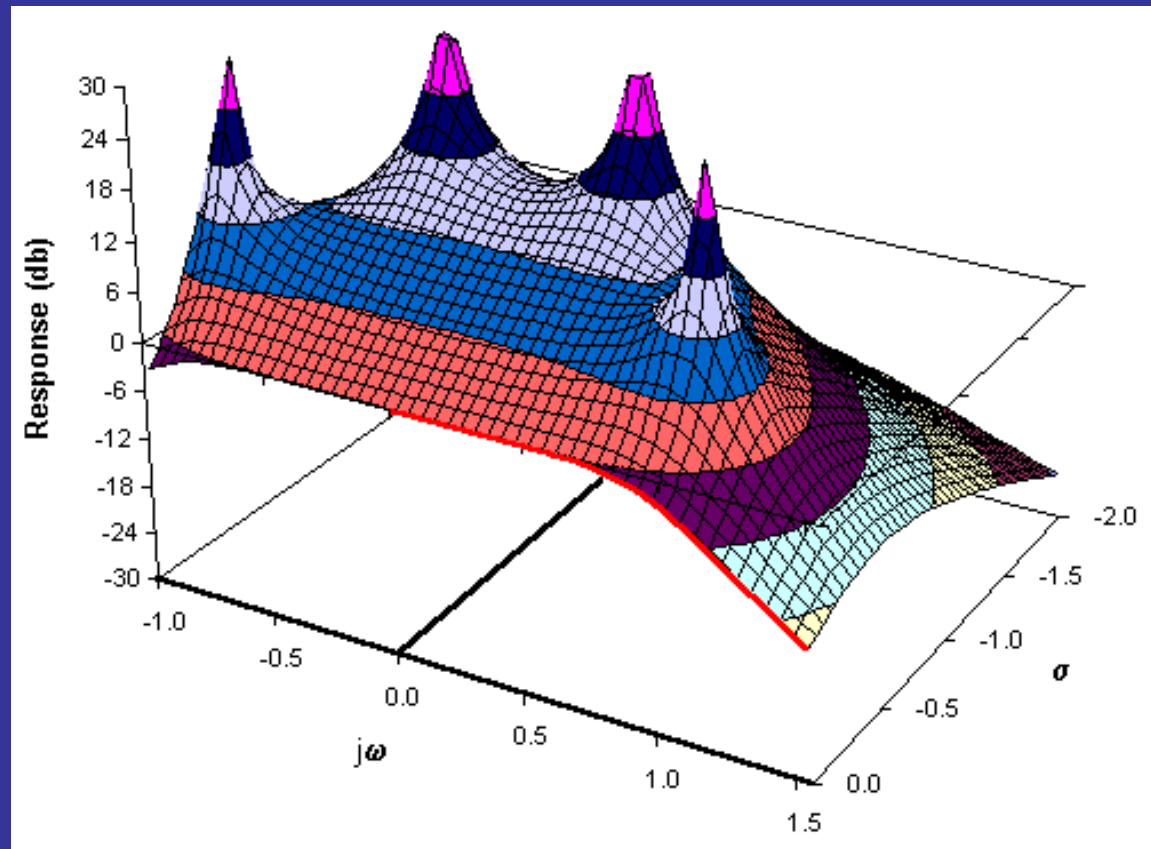


$$Q = 0,707$$

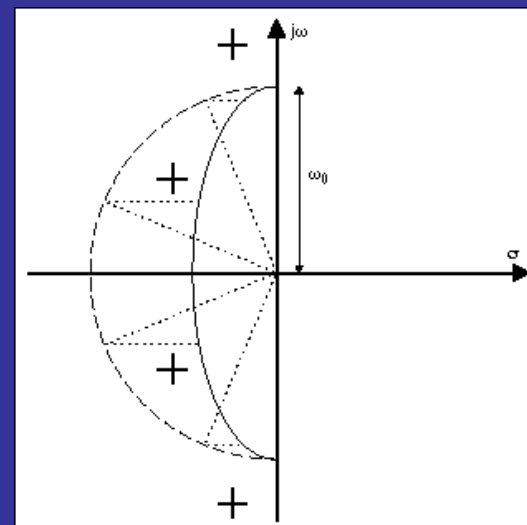
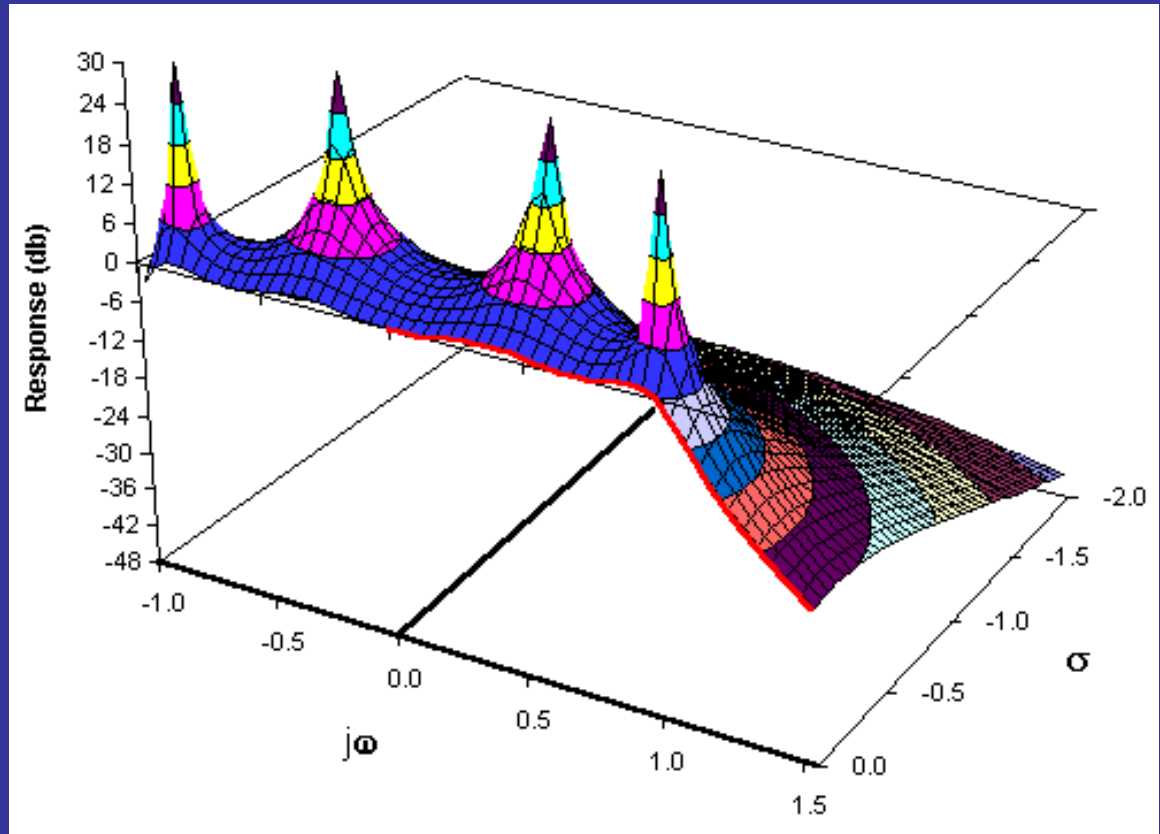
Comparaison de l'effet du coefficient de surtension  $Q$  sur la fonction de transfert du filtre Passe – Bass du 2ème ordre précédent.

En faisant varier  $\omega$  on change la distance des pôles par rapport à l'origine. Si l'on augmente  $Q$  on fait s'écarter les pôles et on les fait se rapprocher de l'axe  $j\omega$ . Réciproquement, si  $Q$  diminue, les pôles se rapprochent en s'éloignant de l'axe  $j\omega$

# Plan de Laplace d'un filtre Passe – Bas de Butterworth du 4ème ordre

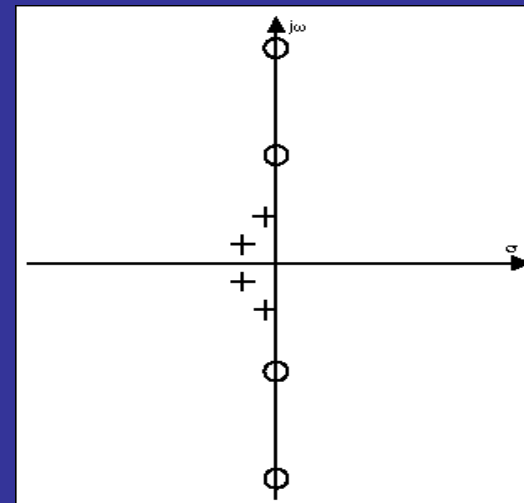
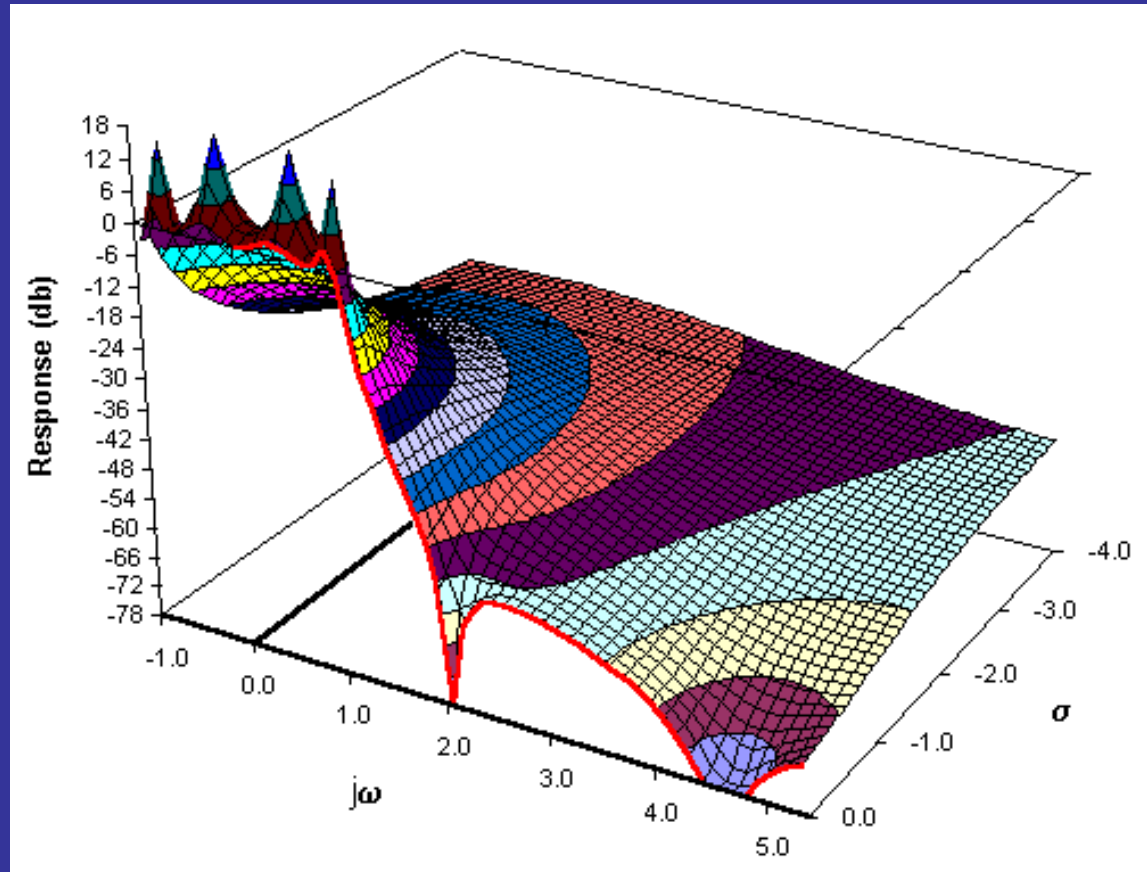


# Plan de Laplace d'un filtre Passe – Bas de Chebychev du 4ème ordre

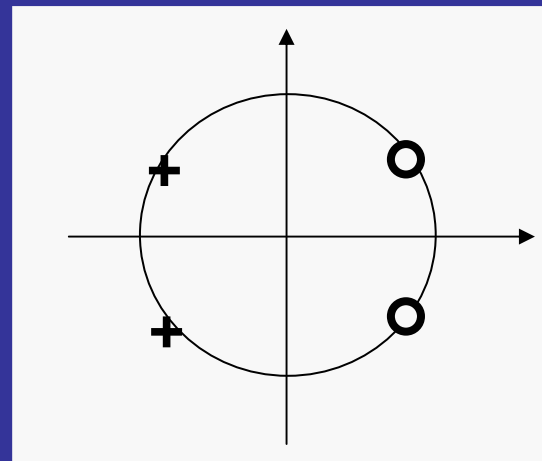
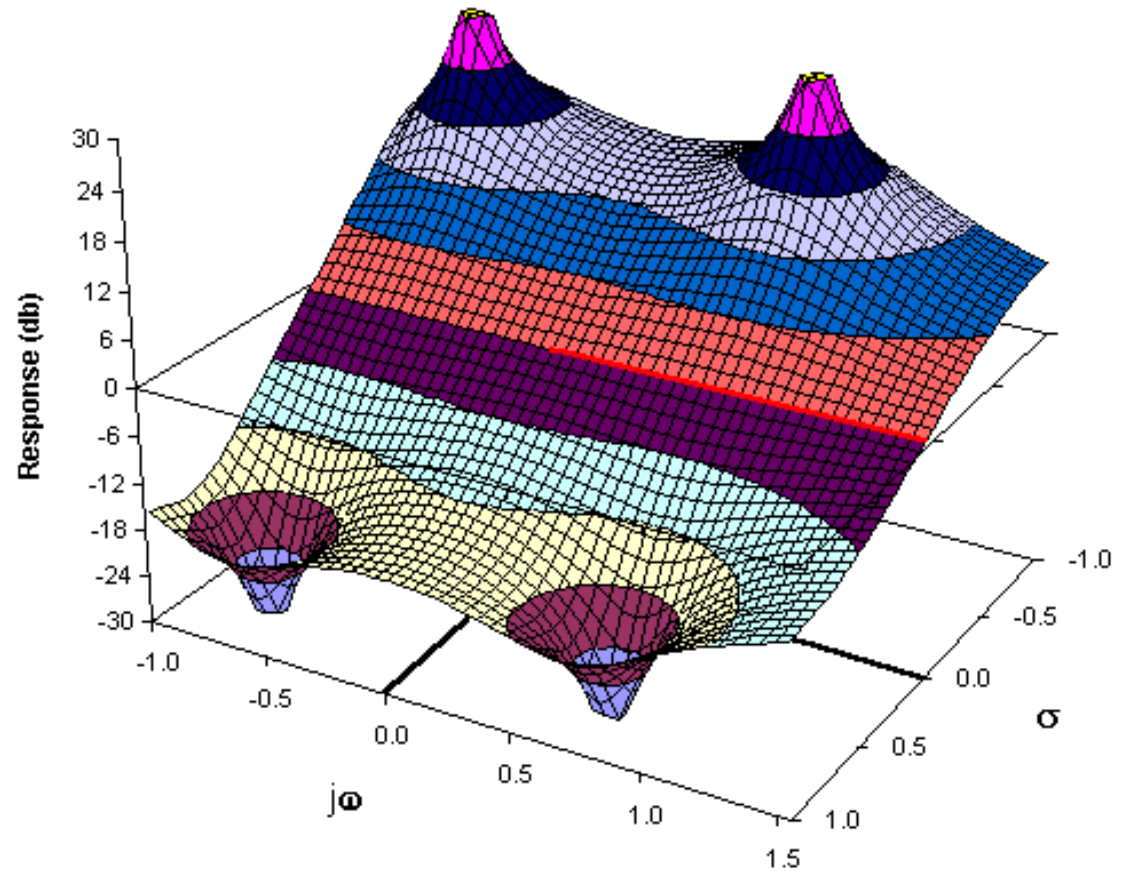




# Plan de Laplace d'un filtre Passe – Bas de Cauer du 4ème ordre.



# Plan de Laplace d'un filtre Passe – Tout du 2ème ordre.



# Les principales fonctions d'approximation du gabarit d'un filtre

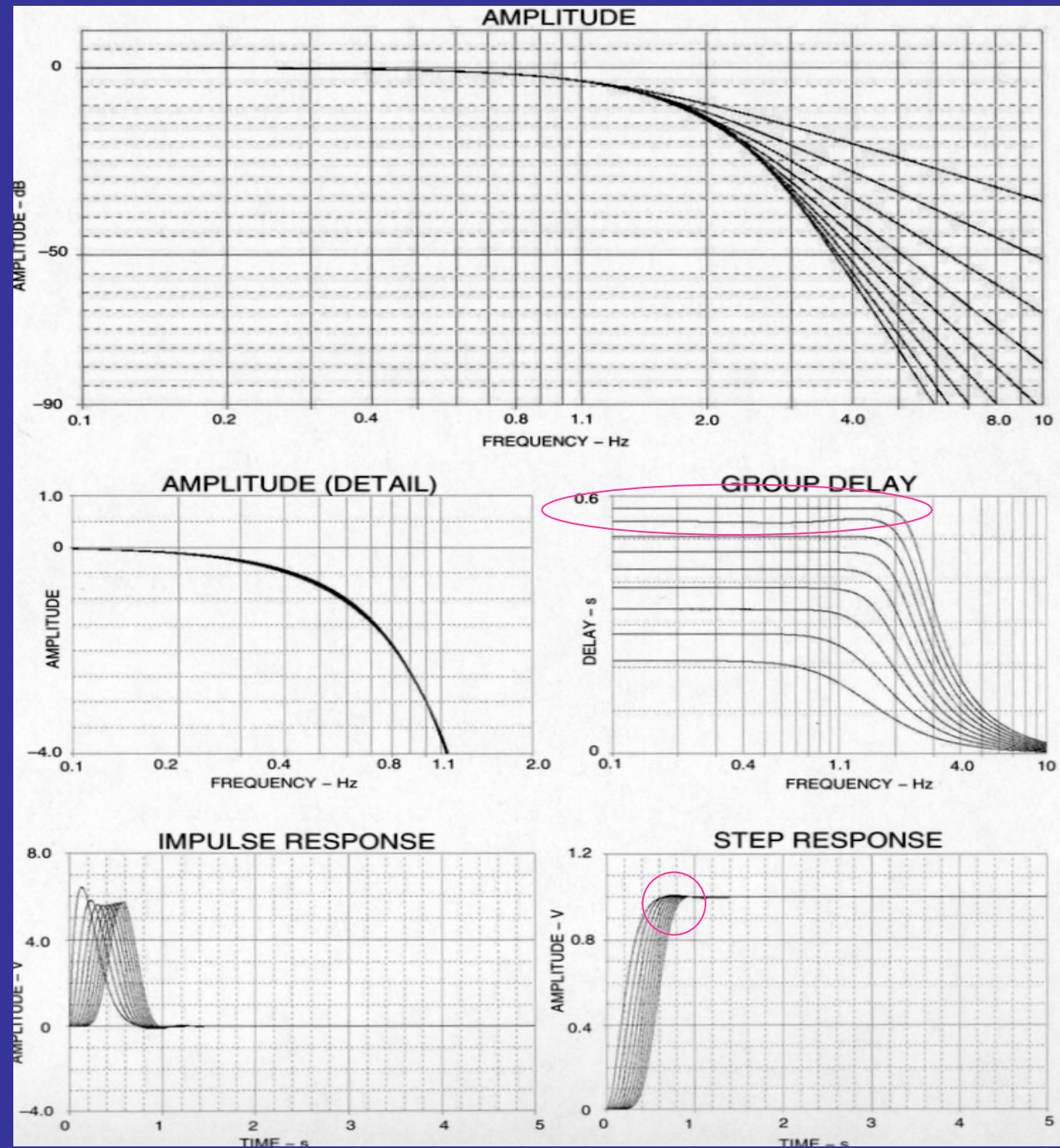
Par ordre croissant de la pente d'atténuation

- De Bessel
- De Gauss (ou transitionnel)
- A phase minimale
- De Butterworth
- De Legendre
- De Chebyshev
- De Cauer (ou elliptique)

# Bessel

Réponses fréquentielle et temporelle d'un filtre de Bessel Passe –Bas d'ordre 2 à 10.

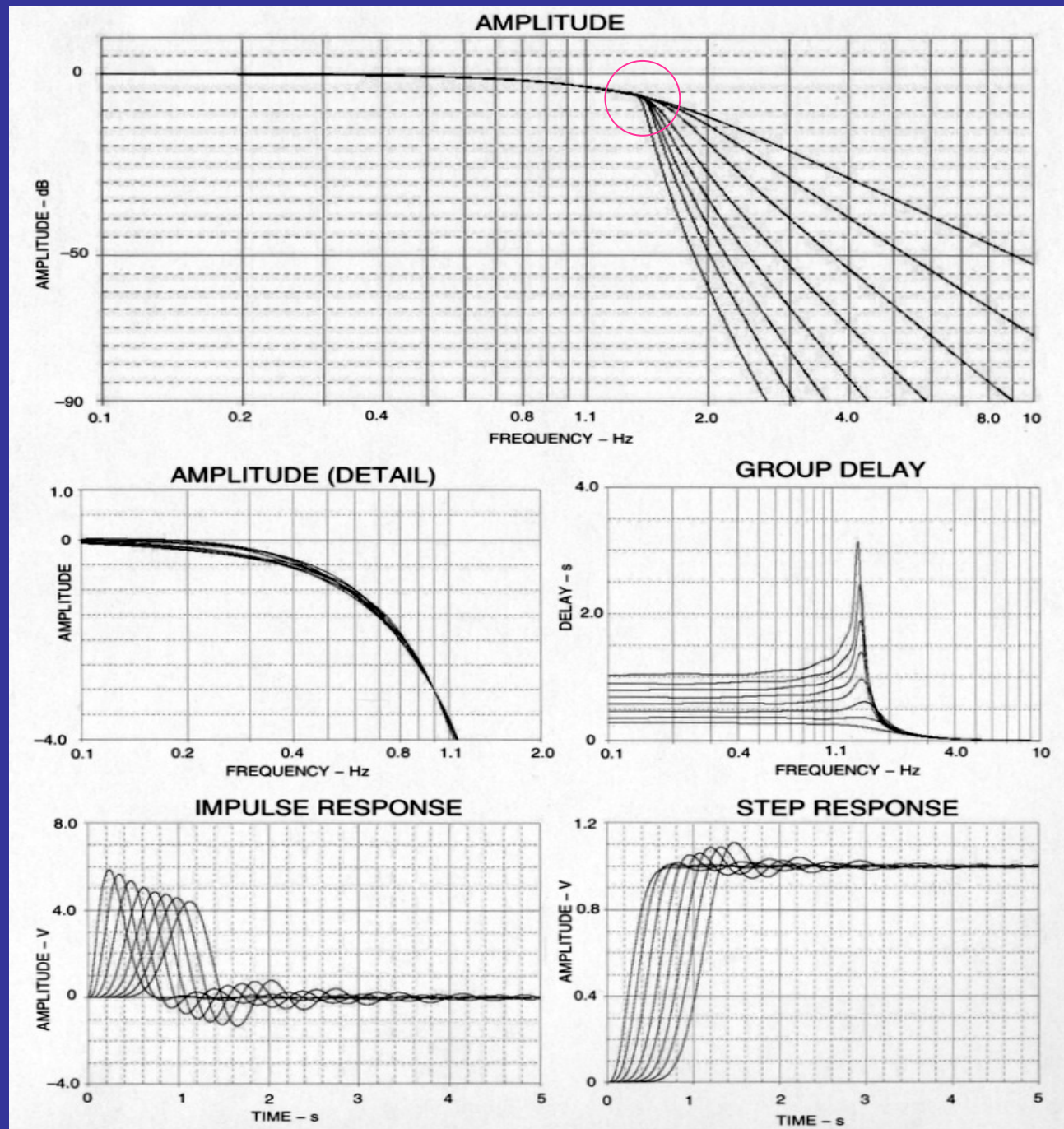
Le filtre de Bessel a des réponses temporelles optimisées en particulier une très bonne régularité de phase et une très bonne réponse impulsionnelle au détriment de la transition d'atténuation de la bande coupée.



# Gaussien 6 dB

Réponses fréquentielle et temporelle d'un filtre Gaussien Passe-Bas d'ordre 2 à 10 avec le point de cassure de l'atténuation à -6 dB.

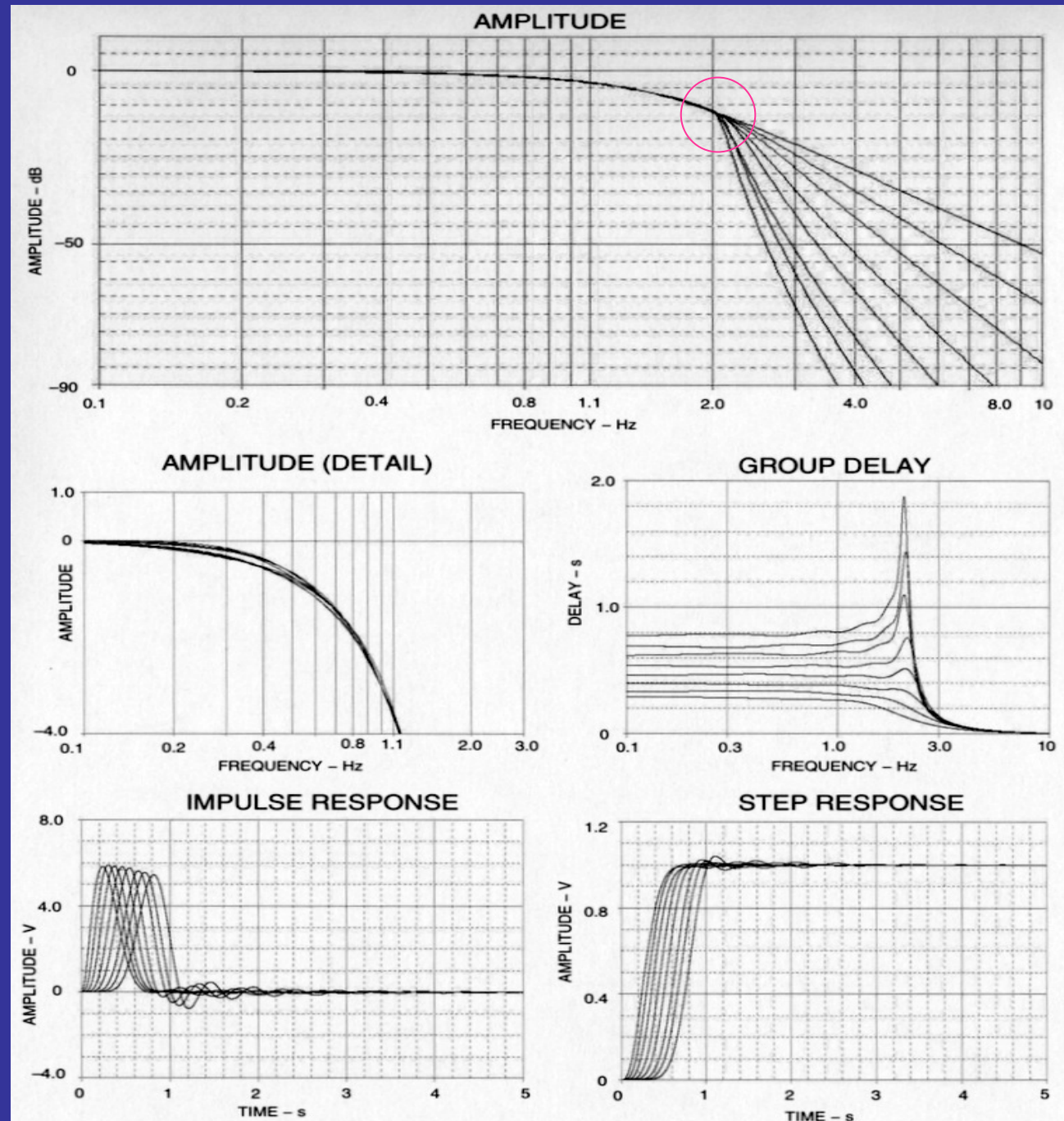
Ce filtre Gaussien a des caractéristiques intermédiaires entre le filtre de Bessel pour ses bonnes réponses temporelles et le filtre de Butterworth pour sa transition d'atténuation au delà de -6 dB.



# Gaussien 12 dB

Réponses fréquentielle et temporelle d'un filtre Gaussien Passe-Bas d'ordre 2 à 10 avec le point de cassure de l'atténuation à -12 dB.

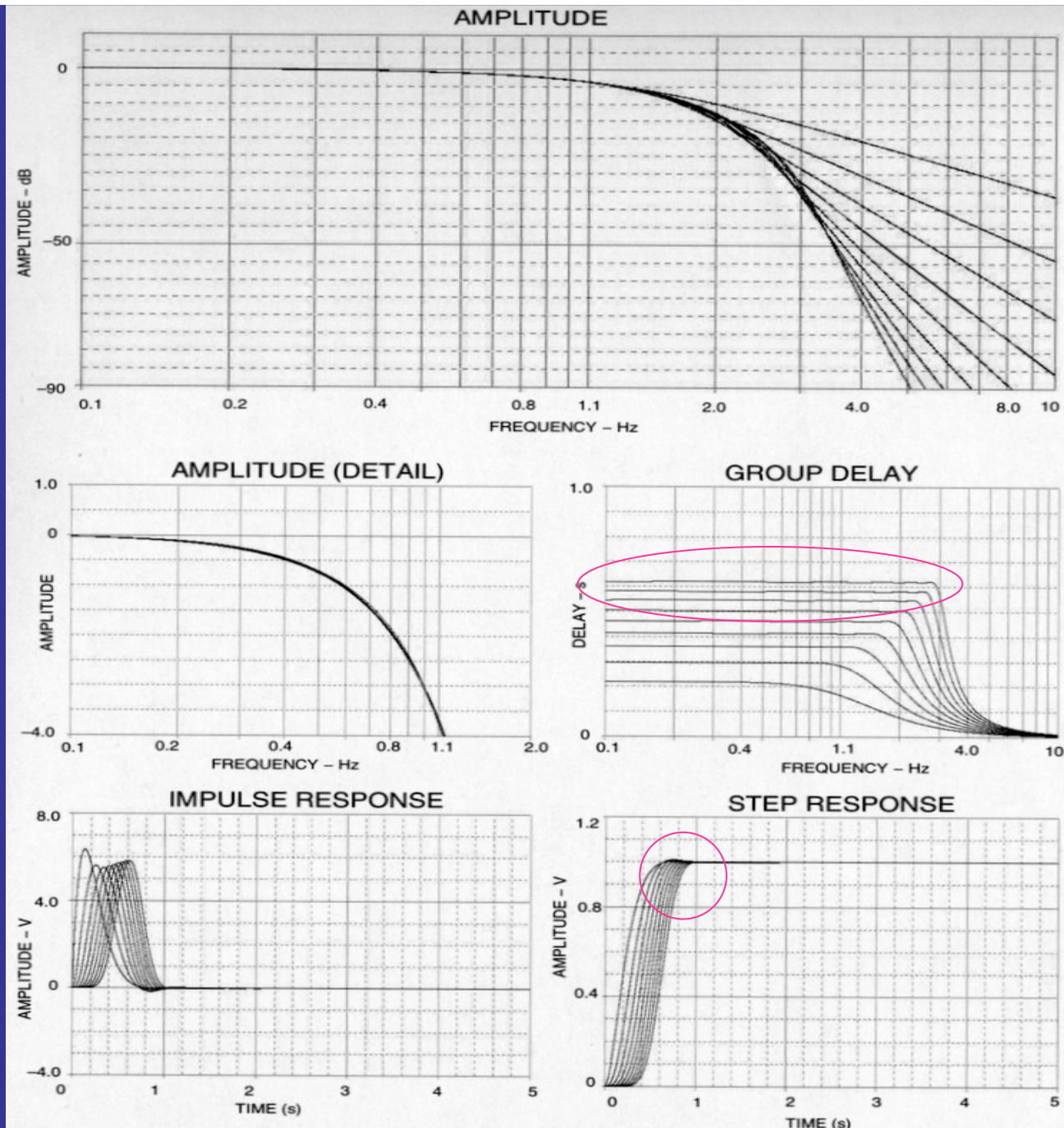
Ce filtre Gaussien a des caractéristiques intermédiaires entre le filtre de Bessel pour ses bonnes réponses temporelles et le filtre de Butterworth pour sa transition d'atténuation au delà de -12 dB.



# Phase linéaire 0.05 degré

Réponses fréquentielle et temporelle d'un filtre Passe-Bas d'ordre 2 à 10 à phase linéaire avec une ondulation maximale de 0.05 degré.

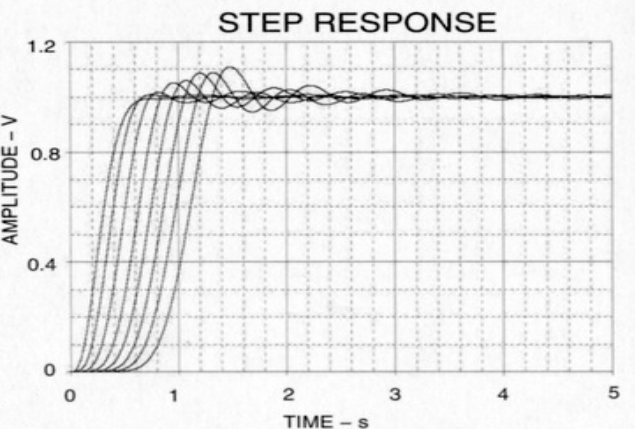
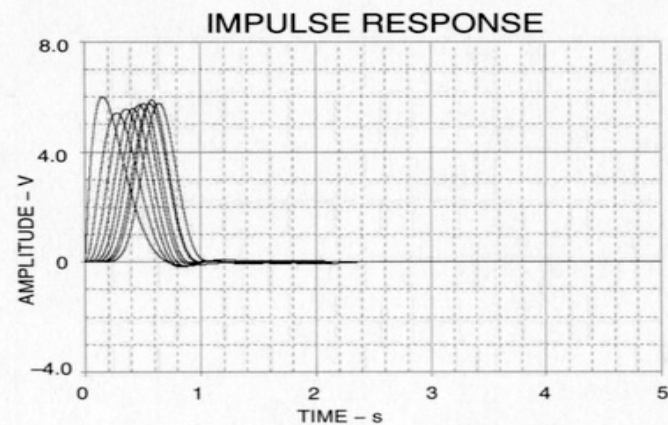
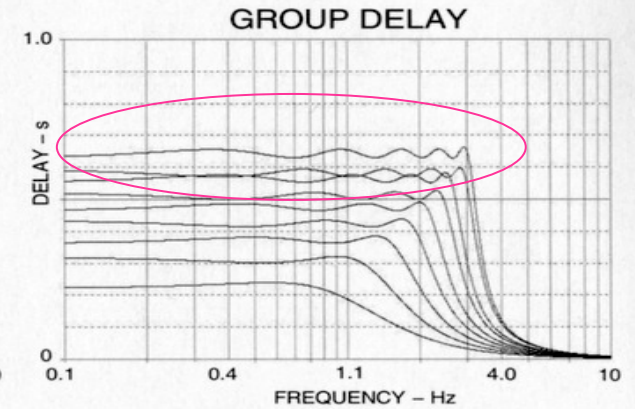
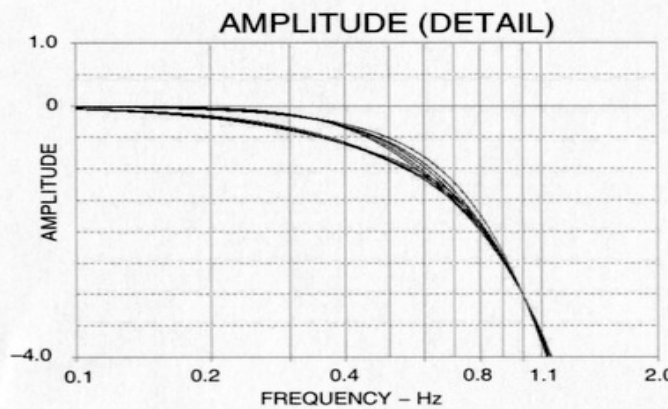
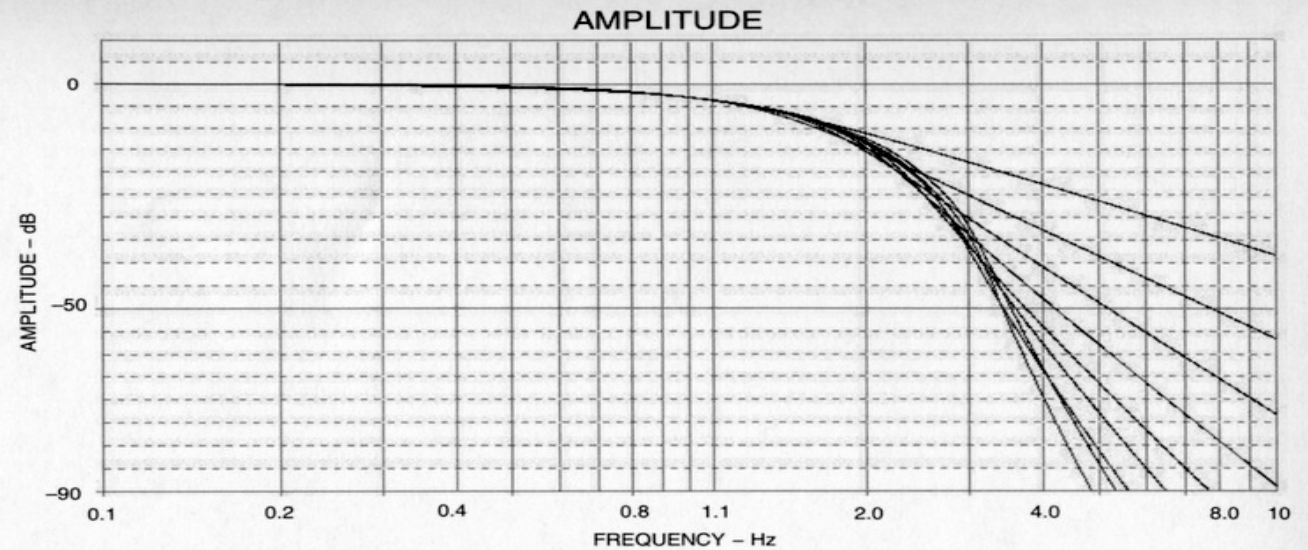
Ce filtre à phase linéaire a une grande régularité de phase dans la bande transmise et une très bonne réponse impulsionnelle au détriment de la transition d'atténuation.



# Phase linéaire 0.5 degré

Réponses fréquentielle et temporelle d'un filtre Passe-Bas d'ordre 2 à 10 à phase linéaire avec une ondulation maximale de 0.5 degré

Ce filtre à phase linéaire a une grande régularité de phase dans la bande transmise et une bonne réponse impulsionnelle au détriment de la transition d'atténuation.

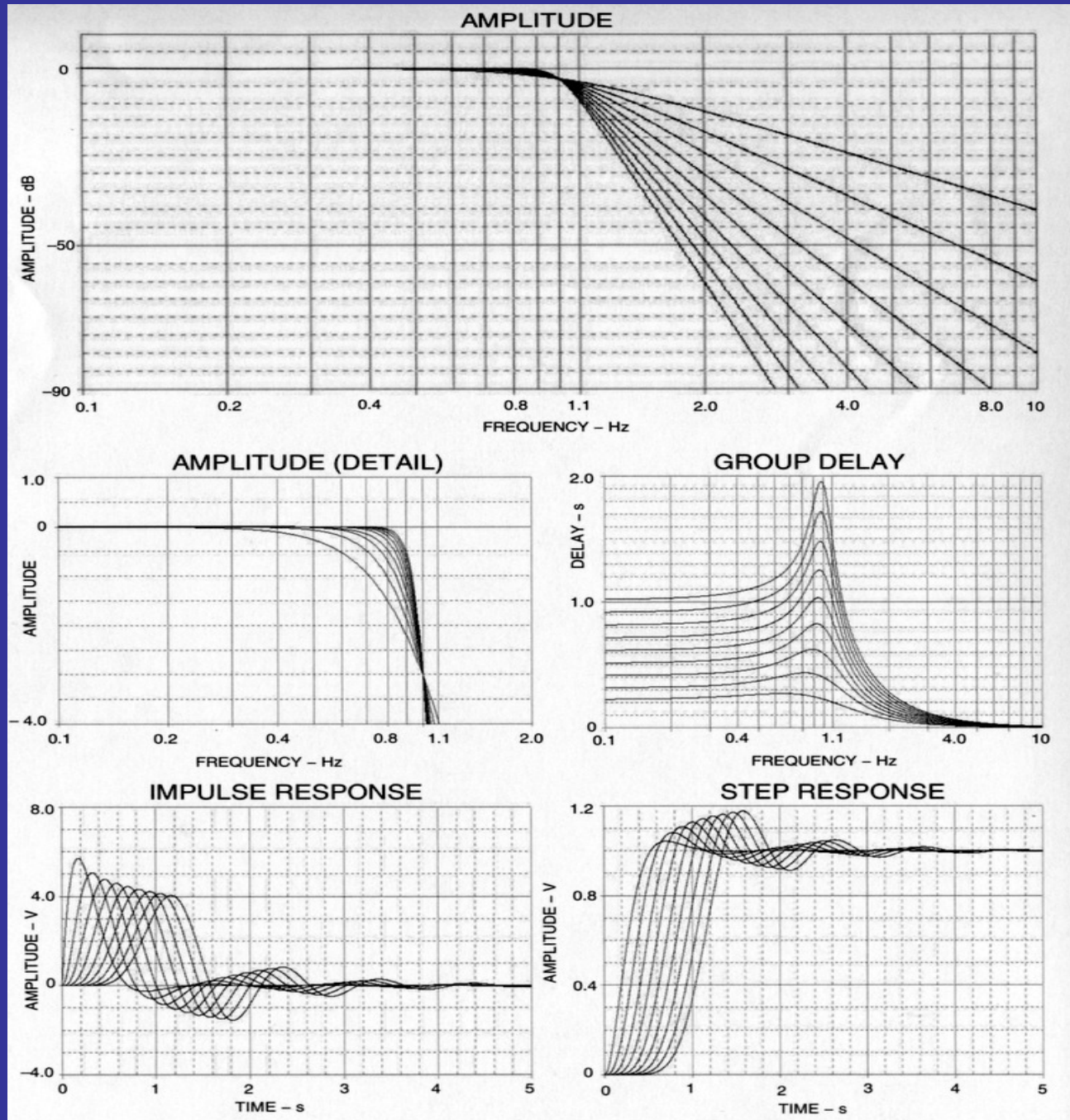




# Butterworth

Réponses fréquentielle et temporelle d'un filtre de Butterworth Passe – Bas d'ordre 2 à 10.

Le filtre de Butterworth a une grande régularité d'amplitude dans la bande transmise et représente le meilleur compromis entre la transition d'atténuation et la réponse temporelle.

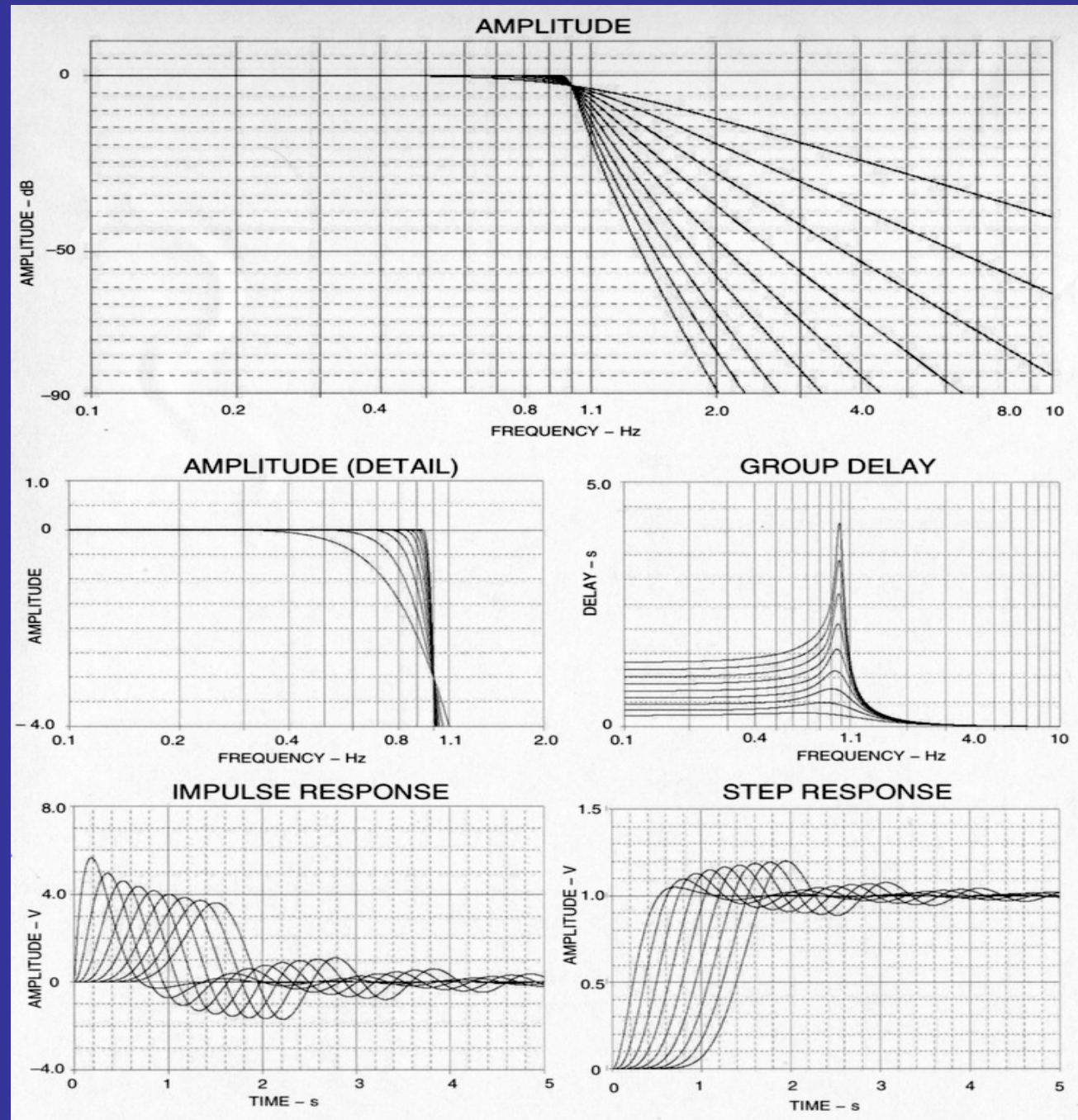


# Chebyshev

0.01 dB

Réponses fréquentielle et temporelle d'un filtre de Chebyshev Passe – Bas d'ordre 2 à 10 avec 0.01 dB d'ondulation dans la bande de fréquences transmises

Le filtre de Chebyshev est optimisée pour avoir une transition d'atténuation de la bande coupée la plus forte au détriment de la réponse temporelle.

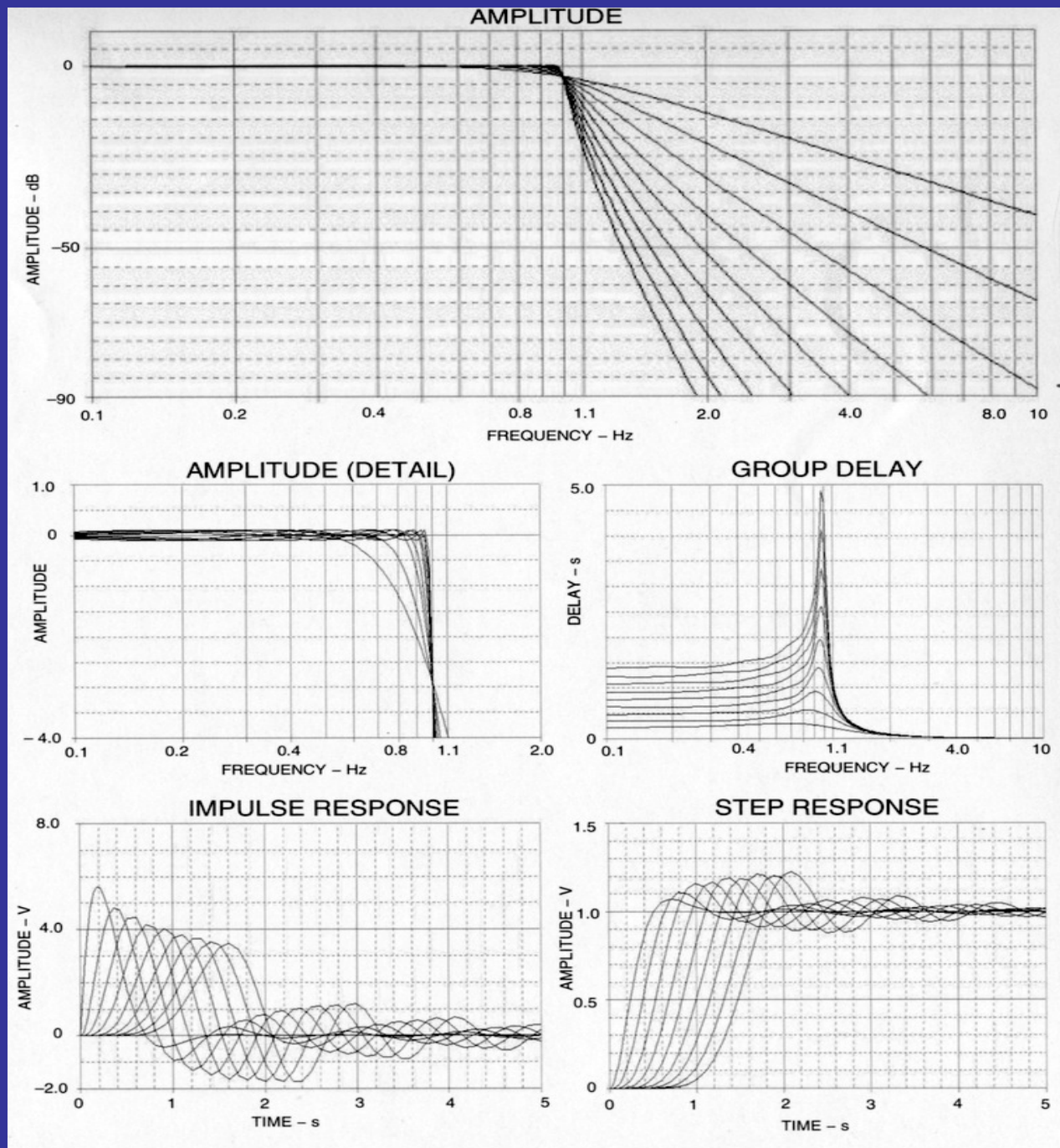


# Chebyshev

0.1 dB

Réponses fréquentielle et temporelle d'un filtre de Chebyshev Passe-Bas d'ordre 2 à 10 avec 0.1 dB d'ondulation dans la bande de fréquences transmises

Le filtre de Chebyshev est optimisée pour avoir une transition d'atténuation la plus forte de la bande coupée au détriment de la réponse temporelle.

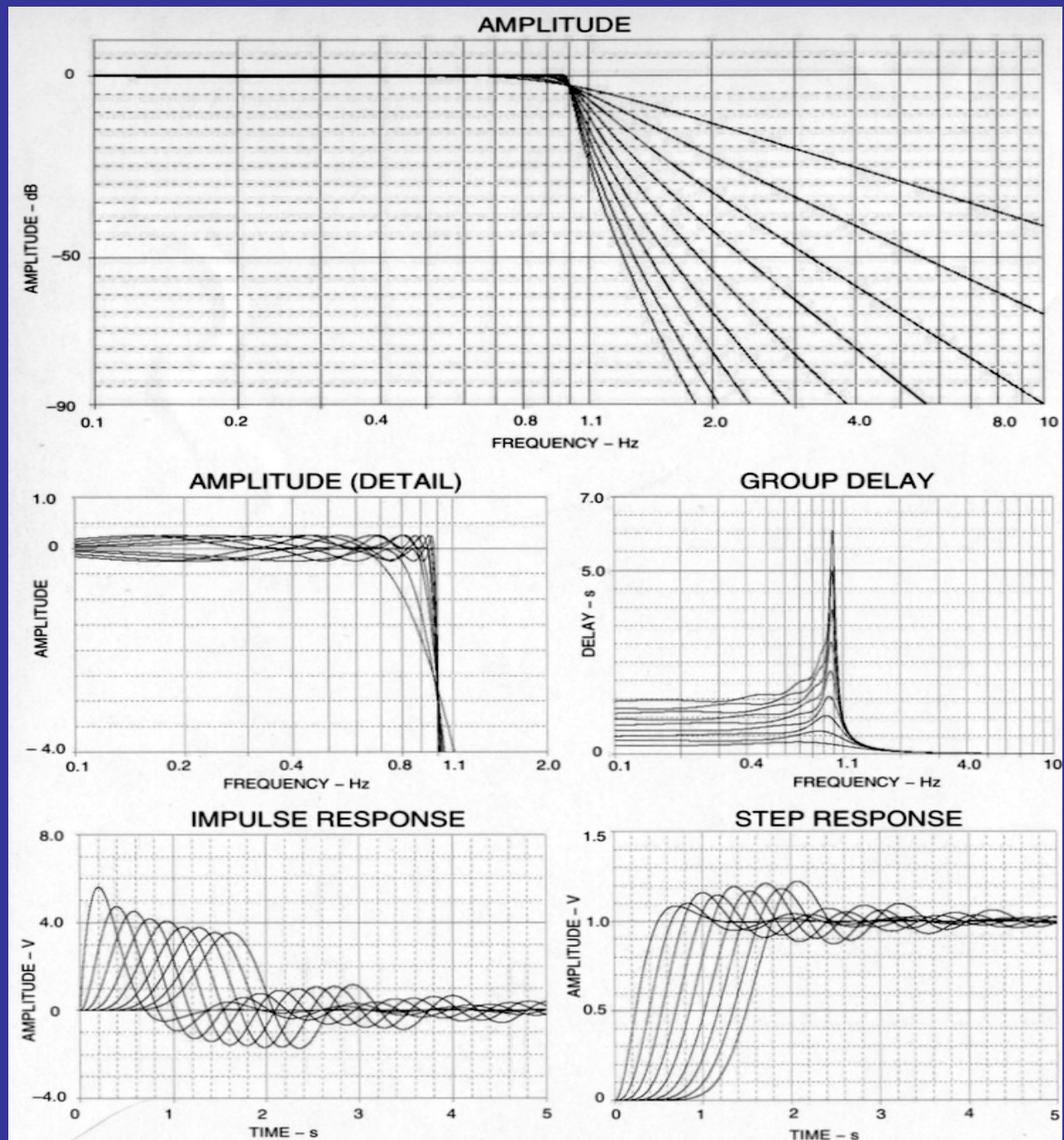


# Chebyshev

0.25 dB

Réponses fréquentielle et temporelle d'un filtre de Chebyshev Passe –Bas d'ordre 2 à 10 avec 0.25 dB d'ondulation dans la bande de fréquences transmises

Le filtre de Chebyshev est optimisé pour avoir une transition d'atténuation la plus forte de la bande coupée au détriment de la réponse temporelle.

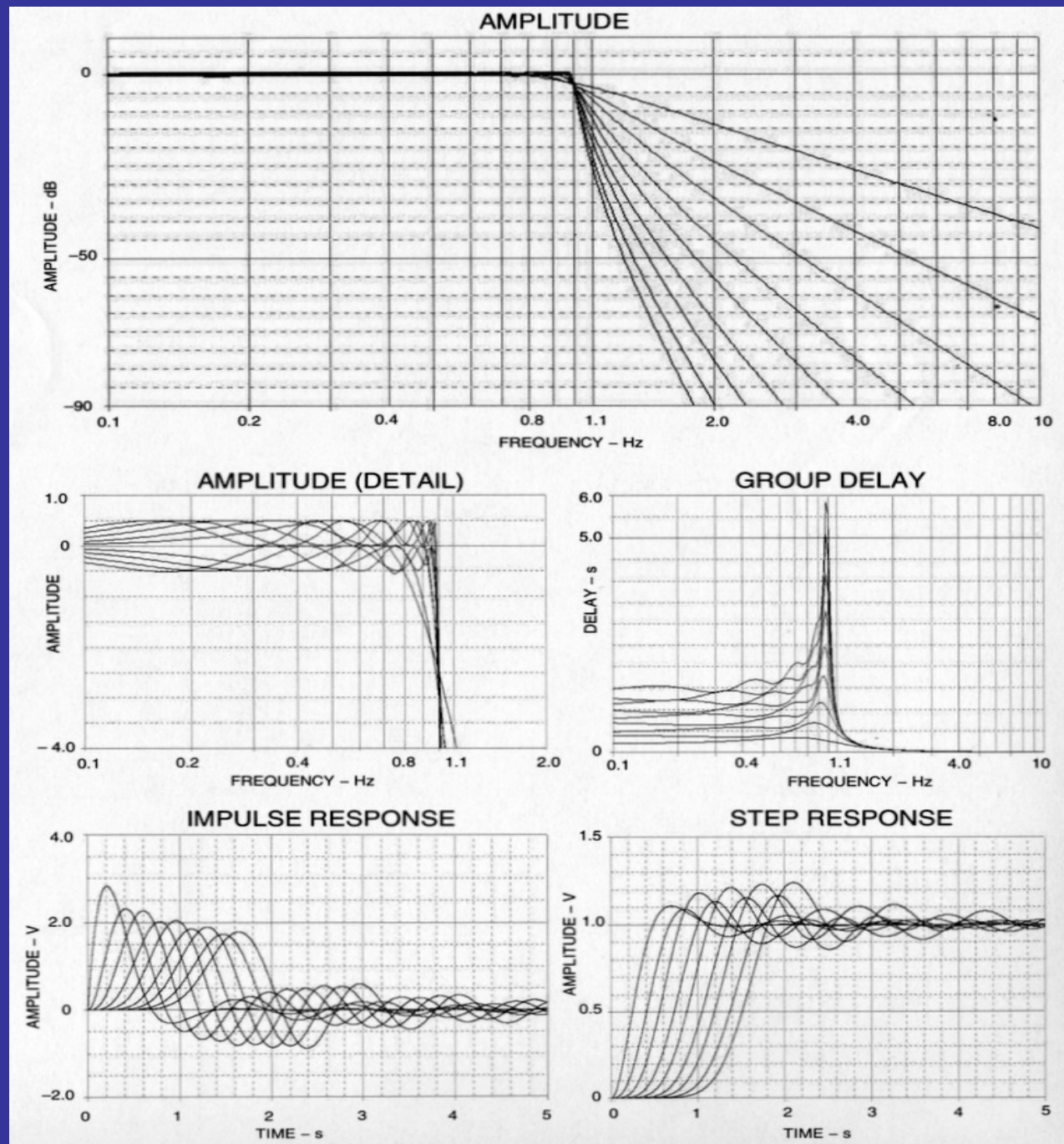


# Chebyshev

0.5 dB

Réponses fréquentielle et temporelle d'un filtre de Chebyshev Passe –Bas d'ordre 2 à 10 avec 0.5 dB d'ondulation dans la bande de fréquences transmises

Le filtre de Chebyshev est optimisé pour avoir une transition d'atténuation la plus forte de la bande coupée au détriment de la réponse temporelle.

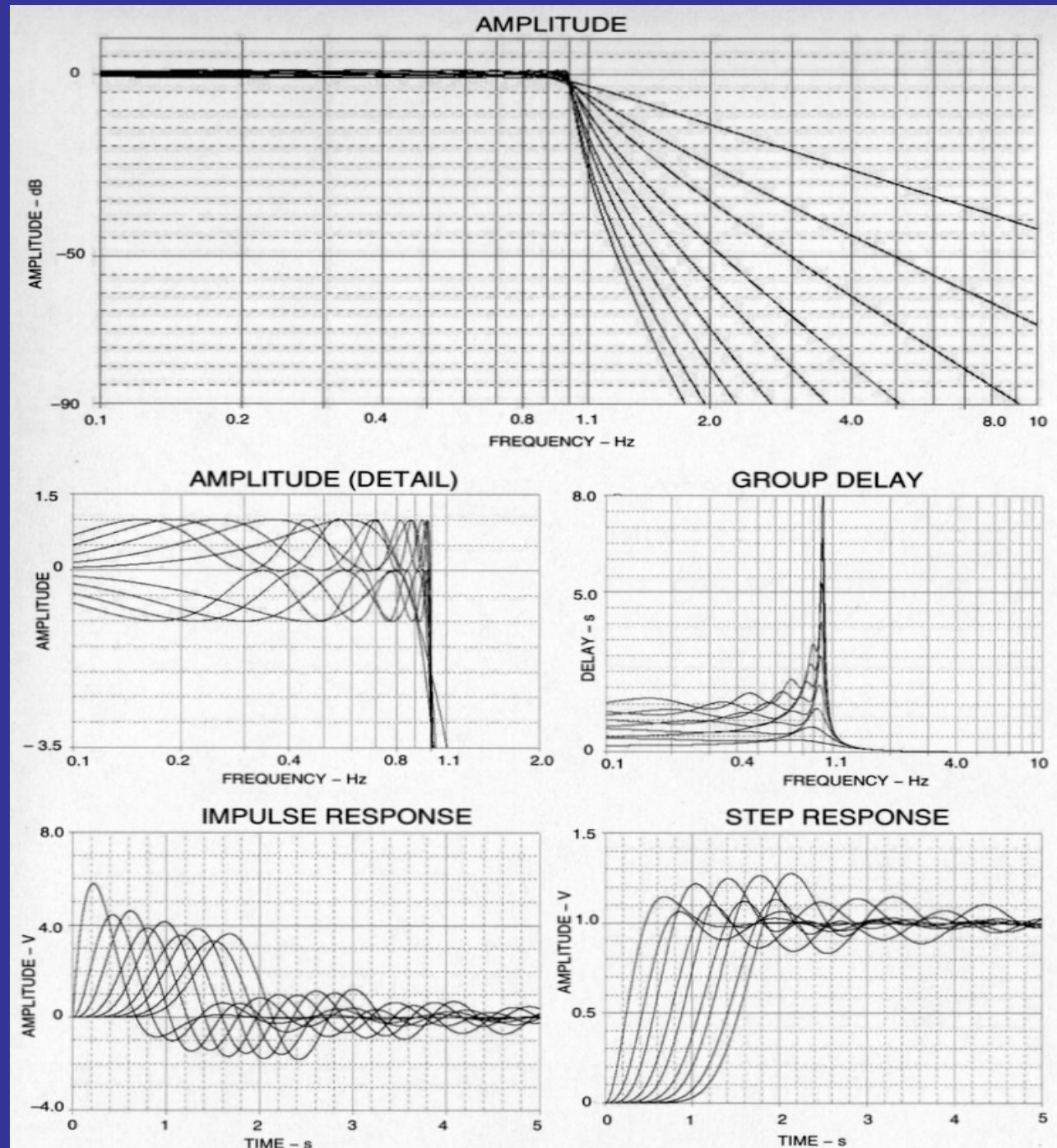


# Chebyshev

1 dB

Réponses fréquentielle et temporelle d'un filtre de Chebyshev Passe – Bas d'ordre 2 à 10 avec 1 dB d'ondulation dans la bande de fréquences transmises

Le filtre de Chebyshev est optimisé pour avoir une transition d'atténuation de la bande coupée la plus forte au détriment de la réponse temporelle.



# Les principales structures de filtres actifs

- Structure à contre réaction simple.
- Structure à sources de tension contrôlées ou de Sallen et Key.
- Structure à contre réactions multiples ou de Rauch.
- Réseau à variable d'état et « biquad ».
- Réseaux à convertisseurs d'impédance négative (NIC).
- Réseaux à gyrateurs.





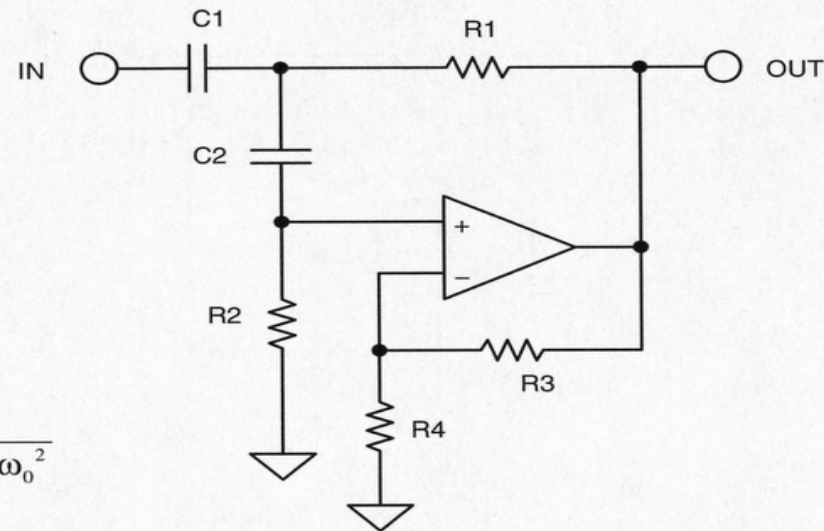
# Structure de Sallen et Key

## Cellule du 2ème ordre Passe – Haut

Chaque cellule du 2ème ordre est bâtie autour d'un amplificateur opérationnel monté en source de tension contrôlée.

Cette structure très simple est un des meilleurs compromis pour la réalisation de filtres RC-actifs elle est pour cela une des plus utilisées.

SALLEN-KEY HIGH PASS



$$\frac{+Hs^2}{s^2 + \alpha \omega_0 s + \omega_0^2}$$

$$\frac{V_o}{V_{IN}} = \frac{H s^2}{s^2 + s \left[ \frac{\frac{C2}{R2} + \frac{C1}{R2} + (1-H)\frac{C2}{R1}}{C1 C2} \right] + \frac{1}{R1 R2 C1 C2}}$$

CHOOSE: C1 R3

THEN:  $k = 2 \pi F_0 C1$   $R4 = \frac{R3}{(H-1)}$

$$C2 = C1$$

$$R1 = \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + (H-1)}}{4k}$$

$$R2 = \frac{4}{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + (H-1)}} * \frac{1}{k}$$

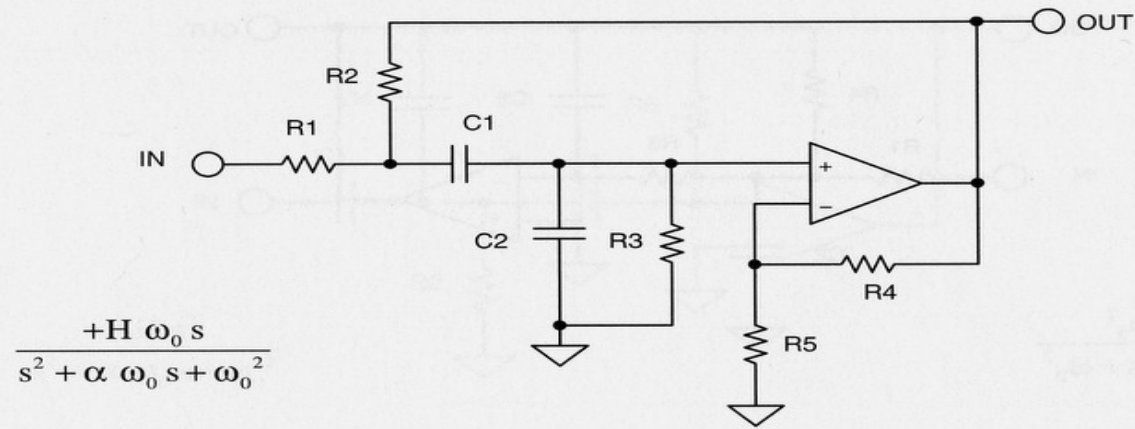
# Structure de Sallen et Key

## Cellule du 2ème ordre Passe – Bande

Chaque cellule du 2ème ordre est bâtie autour d'un amplificateur opérationnel monté en source de tension contrôlée.

Cette structure très simple est un des meilleurs compromis pour la réalisation de filtres RC-actifs elle est pour cela une des plus utilisées.

### SALLEN-KEY BAND PASS



$$\frac{+H \omega_0 s}{s^2 + \alpha \omega_0 s + \omega_0^2}$$

$$\frac{V_o}{V_{IN}} = \frac{Hs \frac{1}{R1C2}}{s^2 + s \left[ \frac{C1}{R3} + \frac{(C1+C2)}{R1} + \frac{C2}{R2} + \frac{C1}{R2} \right] + \frac{1}{R3 C1 C2} \left( \frac{R1+R2}{R1 R2} \right)}$$

CHOOSE: C1 R4

THEN:  $k = 2\pi F_o C1$

$$R5 = \frac{R4}{(H-1)}$$

$$C2 = \frac{1}{2} C1$$

$$R1 = \frac{2}{k}$$

$$R2 = \frac{2}{3k}$$

$$R3 = \frac{4}{k}$$

$$H = \frac{1}{3} \left( 6.5 - \frac{1}{Q} \right)$$

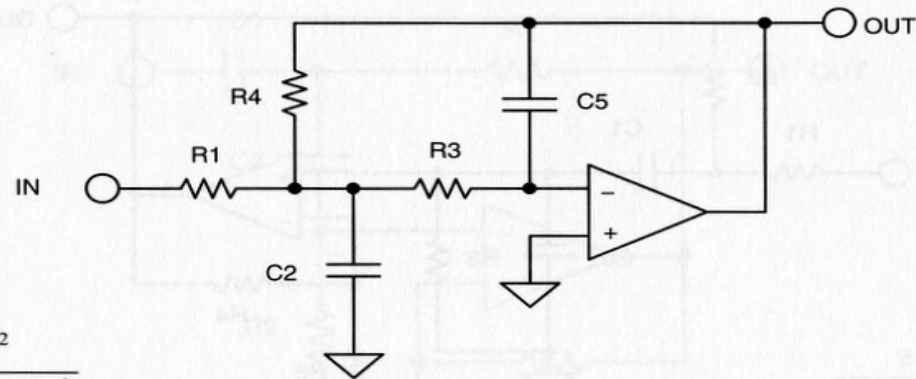
# Structure de Rauch

## Cellule du 2ème ordre Passe – Bas

Chaque cellule du 2ème ordre est bâtie autour d'un amplificateur opérationnel monté en inverseur bouclé par 2 contre réactions.

Cette structure est un peu plus complexe et moins performante en terme de Q que celle de Sallen et Key.

### MULTIPLE FEEDBACK LOW PASS



$$\frac{-H \omega_0^2}{s^2 + \alpha \omega_0 s + \omega_0^2}$$

$$\frac{V_o}{V_{IN}} = \frac{-H \frac{1}{R3 R4 C2 C5}}{s^2 + s \frac{1}{C2} \left( \frac{1}{R1} + \frac{1}{R3} + \frac{1}{R4} \right) + \frac{1}{R3 R4 C2 C5}}$$

CHOOSE: C5

THEN:  $k = 2 \pi F_0 C5$

$$C5 = \frac{4}{\alpha^2} (H+1) C5$$

$$R1 = \frac{\alpha}{2 H k}$$

$$R3 = \frac{\alpha}{2 (H+1) k}$$

$$R4 = \frac{\alpha}{2 k}$$

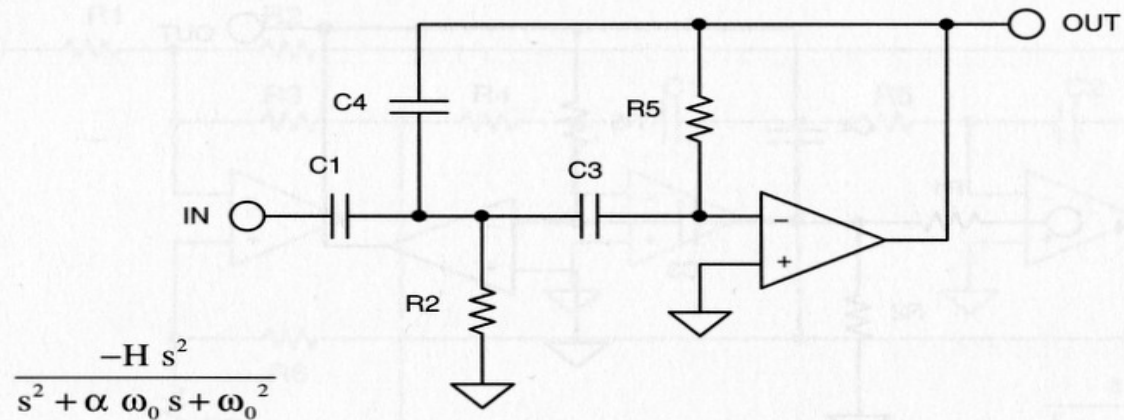
# Structure de Rauch

## Cellule du 2ème ordre Passe – Haut

Chaque cellule du 2ème ordre est bâtie autour d'un amplificateur opérationnel monté en inverseur bouclé par 2 contre réactions.

Cette structure est un peu plus complexe et moins performante en terme de Q que celle de Sallen et Key.

### MULTIPLE FEEDBACK HIGH PASS



$$\frac{V_o}{V_{IN}} = \frac{-s^2 \frac{C1}{C4}}{s^2 + s \frac{(C1 + C3 + C4)}{C3 C4 R5} + \frac{1}{R2 R5 C3 C4}}$$

CHOOSE: C1

THEN:  $k = 2 \pi F_0 C1$

$$C3 = C1$$

$$C4 = \frac{C1}{H}$$

$$R2 = \frac{\alpha}{k \left( 2 + \frac{1}{H} \right)}$$

$$R = \frac{H \left( 2 + \frac{1}{H} \right)}{\alpha k}$$

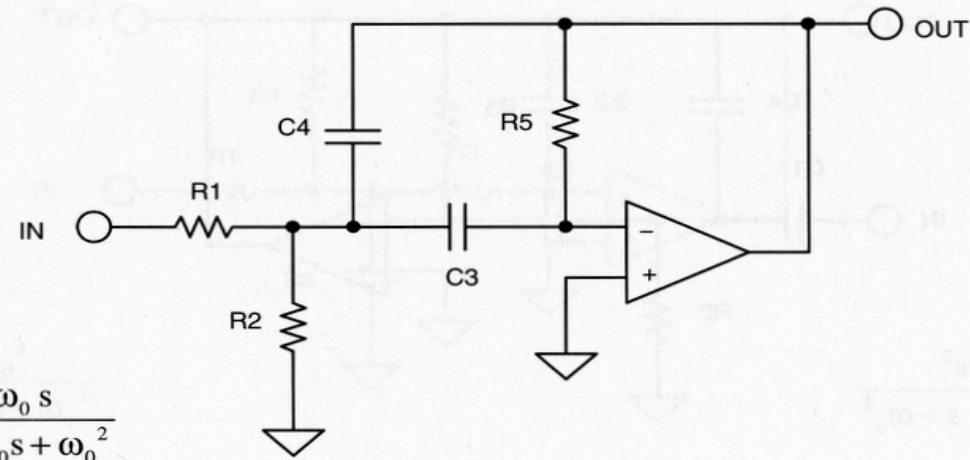
# Structure de Rauch

## Cellule du 2ème ordre Passe – Bande

Chaque cellule du 2ème ordre est bâtie autour d'un amplificateur opérationnel monté en inverseur bouclé par 2 contre réactions.

Cette structure est une des plus utilisées pour la réalisation de filtre passe bande

### MULTIPLE FEEDBACK BAND PASS



$$\frac{-H \omega_0 s}{s^2 + \alpha \omega_0 s + \omega_0^2}$$

$$\frac{V_o}{V_{IN}} = \frac{-s \frac{1}{R1 C4}}{s^2 + s \frac{(C3 + C4)}{C3 C4 R5} + \frac{1}{R5 C3 C4} \left( \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} \right)}$$

CHOOSE: C3

THEN:  $k = 2 \pi F_0 C3$

$$C4 = C3$$

$$R1 = \frac{1}{H k}$$

$$R2 = \frac{1}{(2Q - H)k}$$

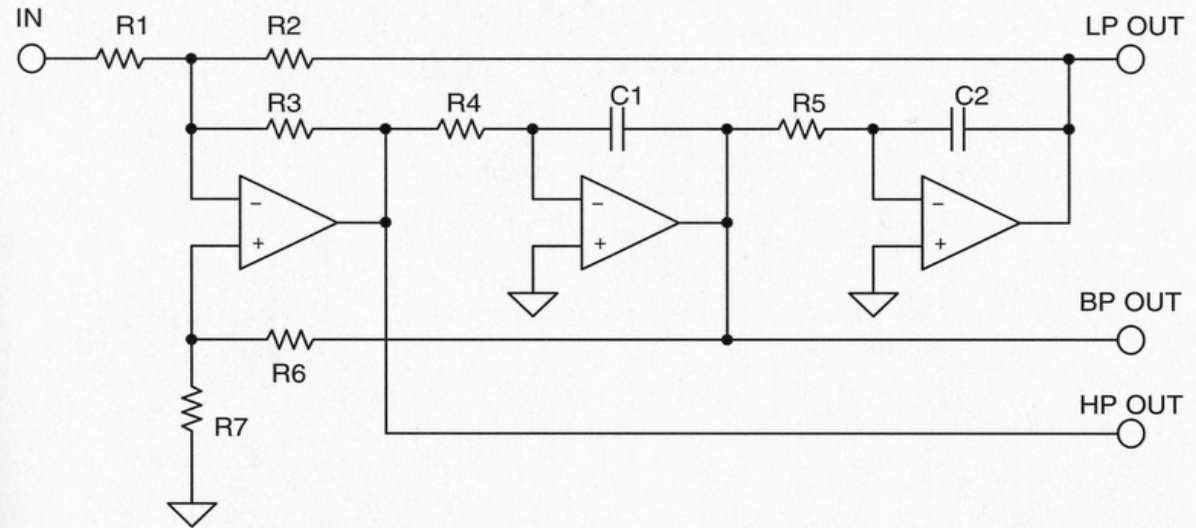
$$R5 = \frac{2Q}{k}$$

# Réseau à variable d'état

Cette structure de synthèse de filtre ne fait appel qu'à des opérations élémentaires; intégration, sommation, inversion, câblées comme un calculateur analogique.

La cellule élémentaire du 2ème ordre a la particularité de réaliser les fonctions passe-bande, passe-haut et passe-bas simultanément. Cette structure est peu sensible à la précision des éléments passifs et très bien adaptée à l'intégration.

STATE VARIABLE (A)



$$A_{LP(s=0)} = -\frac{R2}{R1}$$

$$A_{HP(s=\infty)} = -\frac{R3}{R1}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{R3}{R2 R4 R5 C1 C2}}$$

LET  $R4 = R5 = R, C1 = C2 = C$

$$A_{BP(s=\omega_0)} = \frac{\frac{R6 + R7}{R7}}{R1 \left( \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \frac{1}{R3} \right)}$$

CHOOSE R1:

$$R2 = A_{LP} R1$$

$$R3 = A_{HP} R1$$

CHOOSE C:

$$R = \frac{2\pi F_0}{C} \sqrt{\frac{A_{HP}}{A_{LP}}}$$

CHOOSE R7:

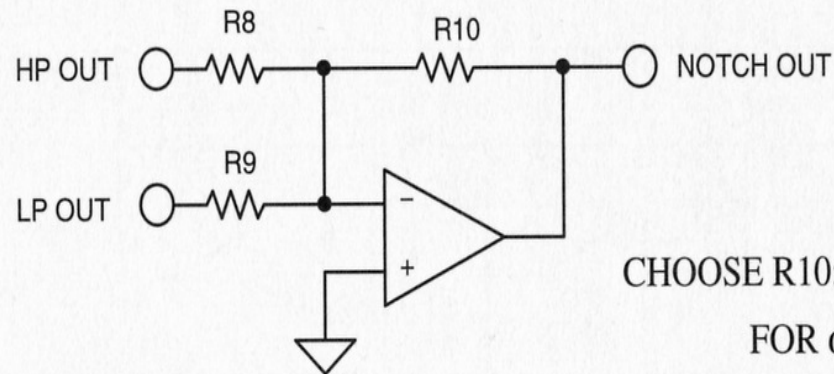
$$R6 = R7 \sqrt{R2 R3} Q \left( \frac{1}{\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \frac{1}{R3}} \right)$$

# Réseau à variable d'état

La cellule élémentaire du 2ème ordre a la particularité de réaliser les fonctions passe-bande, passe-haut et passe-bas simultanément.

Avec un opérateur supplémentaire on peut réaliser également un filtre éjecteur(notch).

## STATE VARIABLE (B)



$$\frac{\omega_z^2}{\omega_0^2} = \frac{R9 R2}{R8 R3}$$

CHOOSE R10:

FOR  $\omega_z = \omega_0$ :  $R8 = R9 = R10$

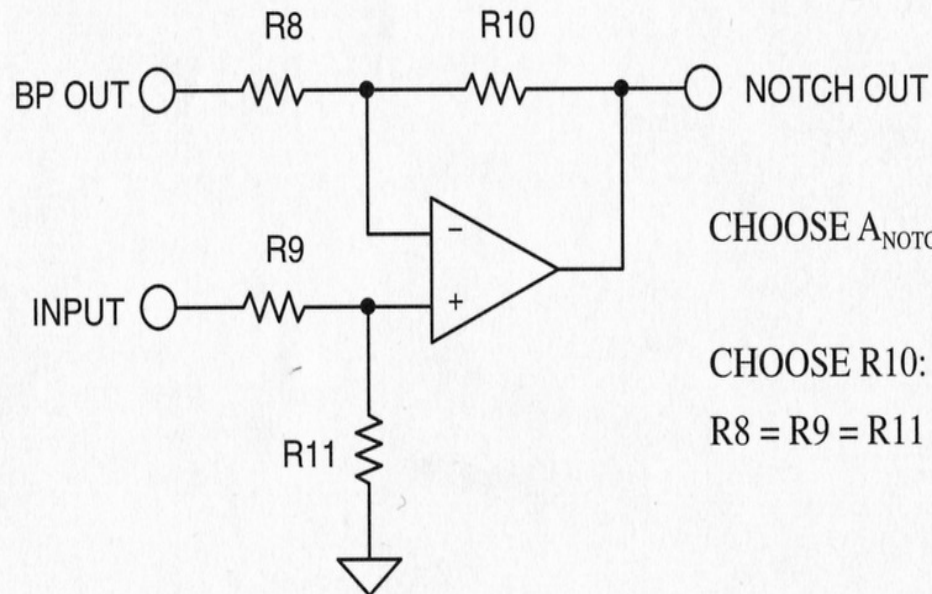
FOR  $\omega_z < \omega_0$ :  $R9 = R10$

$$R8 = \frac{\omega_0^2}{\omega_z^2} R10$$

FOR  $\omega_z > \omega_0$ :  $R8 = R10$

$$R9 = \frac{\omega_z^2}{\omega_0^2} R10$$

CHOOSE  $A_{HP}, A_{LP}, A_{NOTCH} = 1$ :



CHOOSE  $A_{NOTCH} = 1$ :

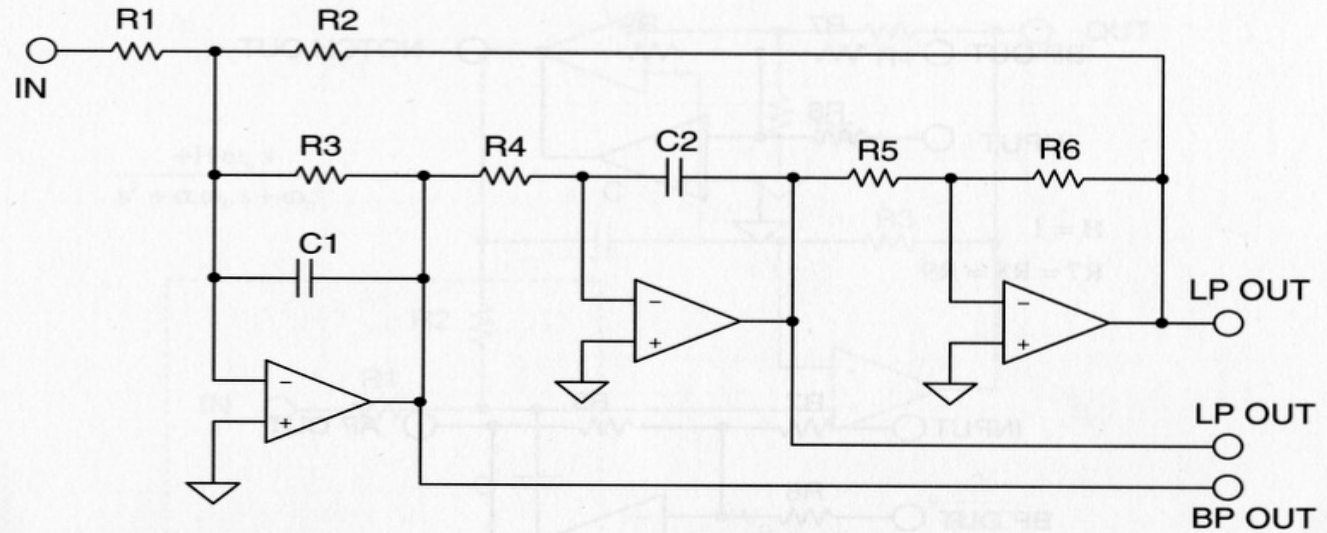
CHOOSE R10:

$$R8 = R9 = R11 = R10$$

# Structure «Biquad »

Elle est très proche de celle du réseau à variable d'état. Le circuit de la cellule du 2ème ordre n'en diffère que par la disposition des intégrateurs ce qui donne une fonction de transfert avec un numérateur et un dénominateur quadratiques, d'où son nom. Elle ne dispose pas d'une sortie Passe – Haut qui nécessite un amplificateur supplémentaire.

BIQUADRATIC (A)



CHOOSE C, R2, R5

$$K = 2\pi f_0 C$$

$$C1 = C2 = C$$

$$R1 = \frac{R2}{H}$$

$$R3 = \frac{1}{k\alpha}$$

$$R4 = \frac{1}{k^2 R2}$$

CHOOSE C, R5, R7

$$K = 2\pi f_0 C$$

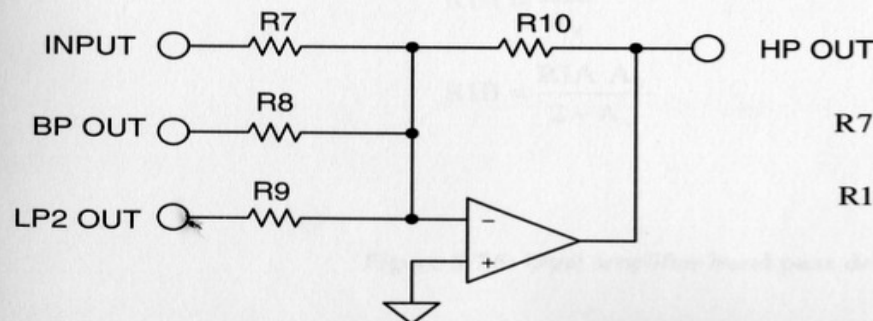
$$C1 = C2 = C$$

$$R1 = R2 = R3 = \frac{1}{k\alpha}$$

$$R4 = \frac{1}{k^2 R2}$$

$$R6 = R5$$

HIGH PASS



$$R7 = R8 = R9 = R$$

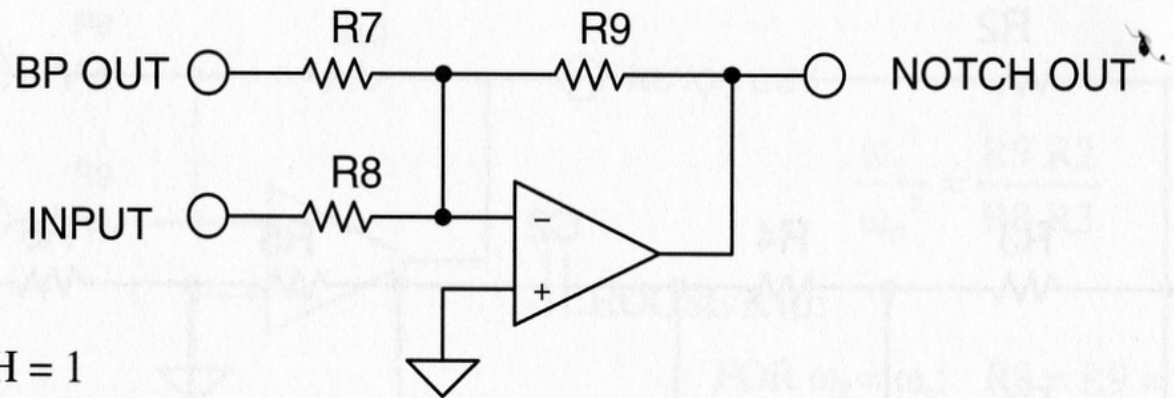
$$R10 = \frac{R}{H}$$



## Structure «Biquad »

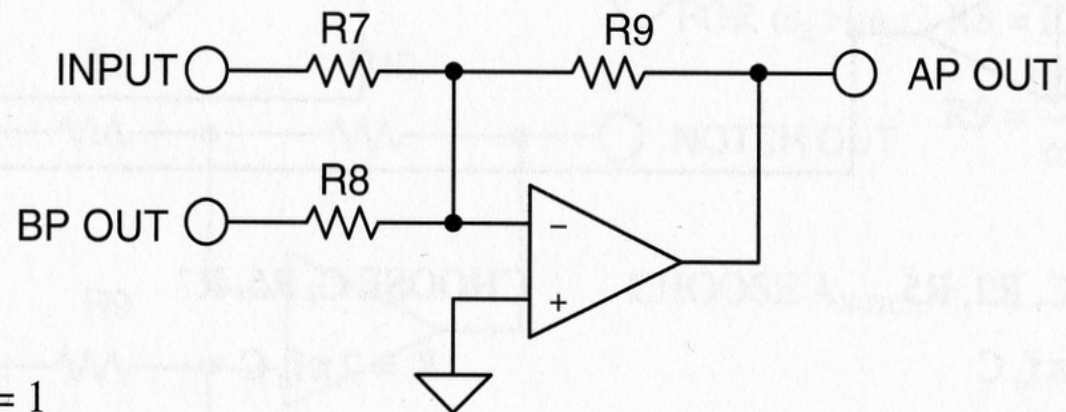
Réalisation au moyen de sommateurs supplémentaires, des filtres Coupe – Bande étroits (réjecteurs ou « Notch ») et Passe – Tout (« All – Pass) à partir d'une structure « Biquad ».

### BIQUADRATIC (B)



$$H = 1$$

$$R7 = R8 = R9$$



$$H = 1$$

$$R7 = R9$$

$$R8 = R7/2$$

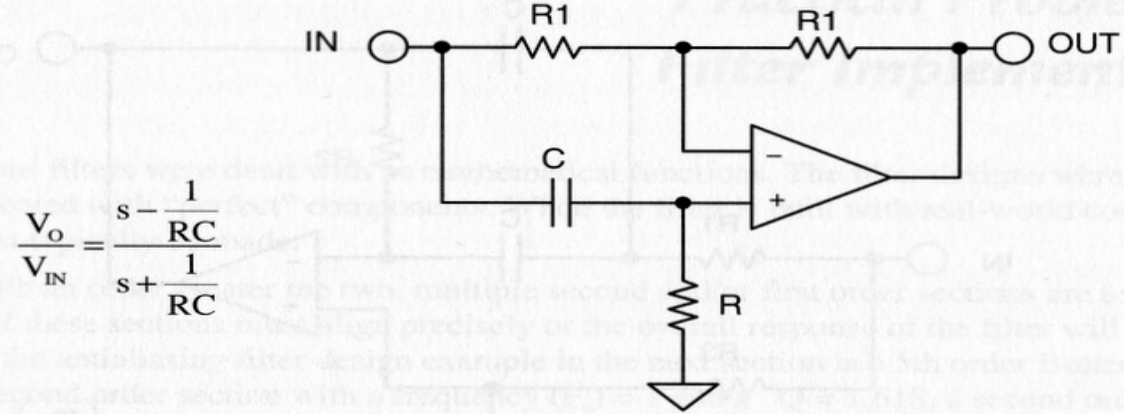
# Filtre Passe – Tout du 1er ordre.

Ce filtre très particulier  
puisque il ne discrimine  
pas de fréquence  
permet de contrôler  
précisément un  
déphasage compris  
entre  $-180^\circ$  à 0Hz et  
 $0^\circ$  à haute fréquence  
avec

$$-90^\circ \text{ à } \omega = 1 / RC$$

R peut varier pour  
ajuster la phase.

## FIRST ORDER ALL PASS



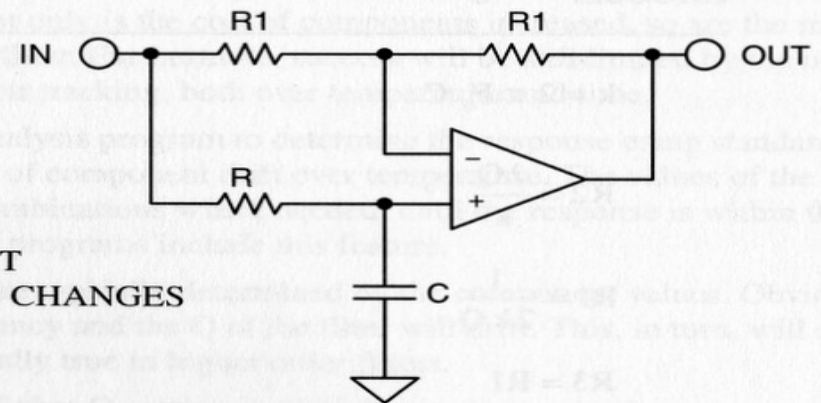
$$\frac{V_o}{V_{IN}} = \frac{s - \frac{1}{RC}}{s + \frac{1}{RC}}$$

$$\text{PHASE SHIFT } (\phi) = -2 \text{ TAN}^{-1} \left( \frac{RC}{2 \pi F} \right)$$

$$\text{GROUP DELAY} = \frac{2 R C}{(2 \pi F R C)^2 + 1}$$

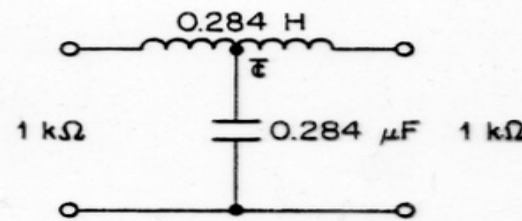
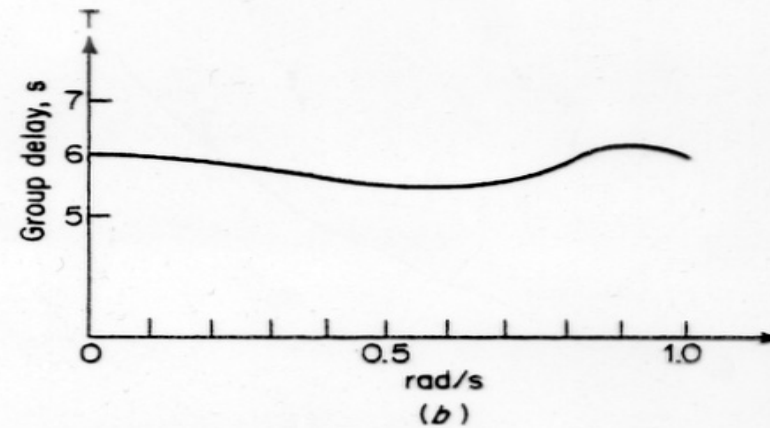
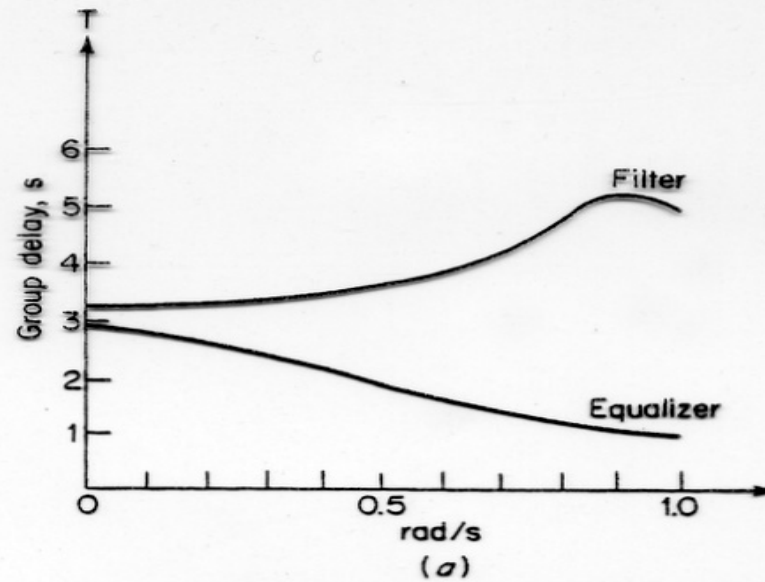
GIVEN A PHASE SHIFT OF  $\phi$  AT A FREQUENCY = F

$$R C = 2 \pi F \text{ TAN} \left( -\frac{\phi}{2} \right)$$

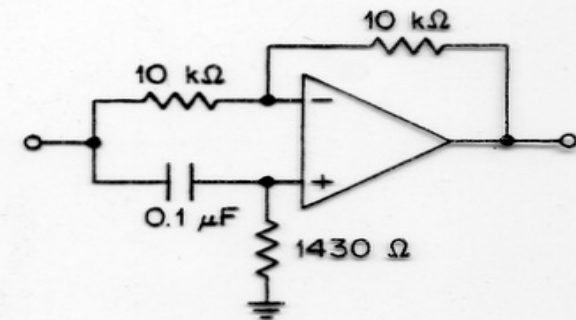


DESIGN AS ABOVE EXCEPT  
THE SIGN OF THE PHASES CHANGES

Exemple d'égalisation du temps de propagation de groupe d'un filtre Passe – Bas de Butterworth du 5ème ordre au moyen d'un filtre Passe – Tout du 1er ordre.



(c)



(d)

## Réalisation particulière aux filtres de Butterworth

La fonction de Butterworth a pour caractéristique particulière d'avoir tous ses pôles, sur le cercle unité du plan de Laplace. Ceci a pour conséquence pratique que, avec une structure Passe – Haut ou Passe – Bas de Sallen et Key, les résistances et les capacités peuvent être égales pour toutes les cellules du filtre qui ne diffèrent alors que par leur gain. Pour une fréquence de coupure donnée et en choisissant une valeur de capacité standard, on calcule simplement les résistances toutes égales par la relation  $F_c = 1 / 2\pi RC$ . Au final, le filtre a d'autant plus de gain que son ordre est élevé.

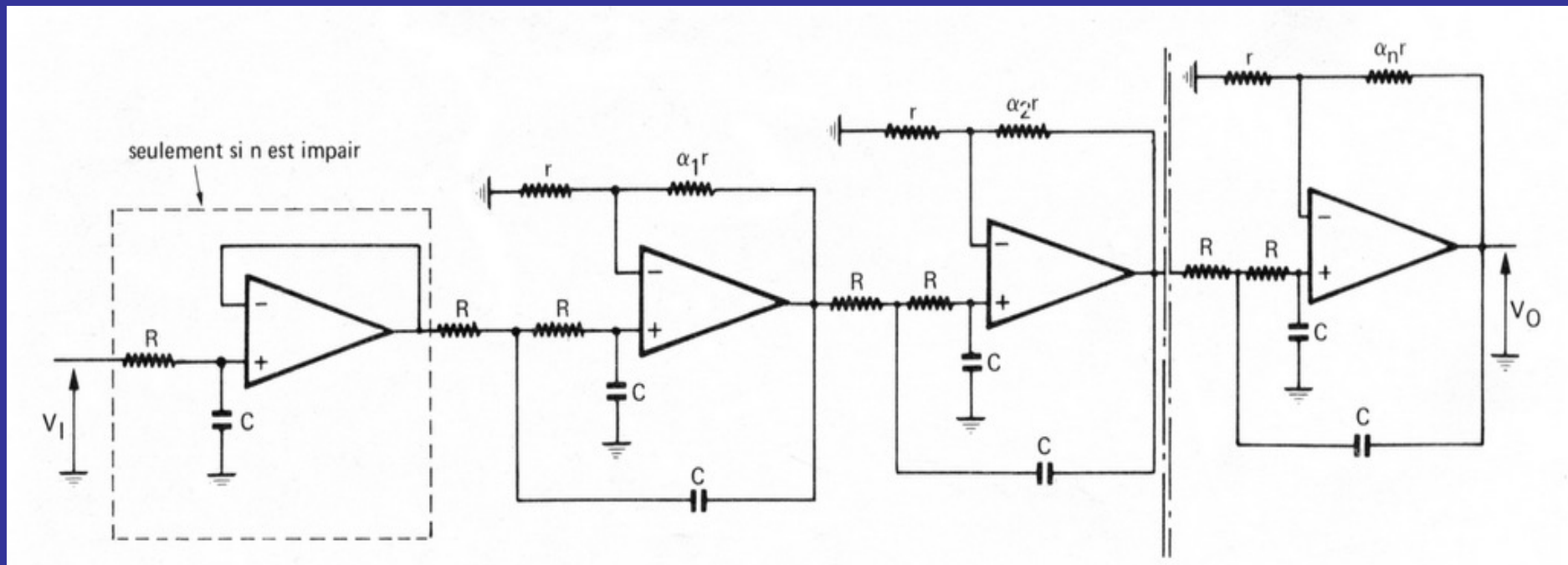
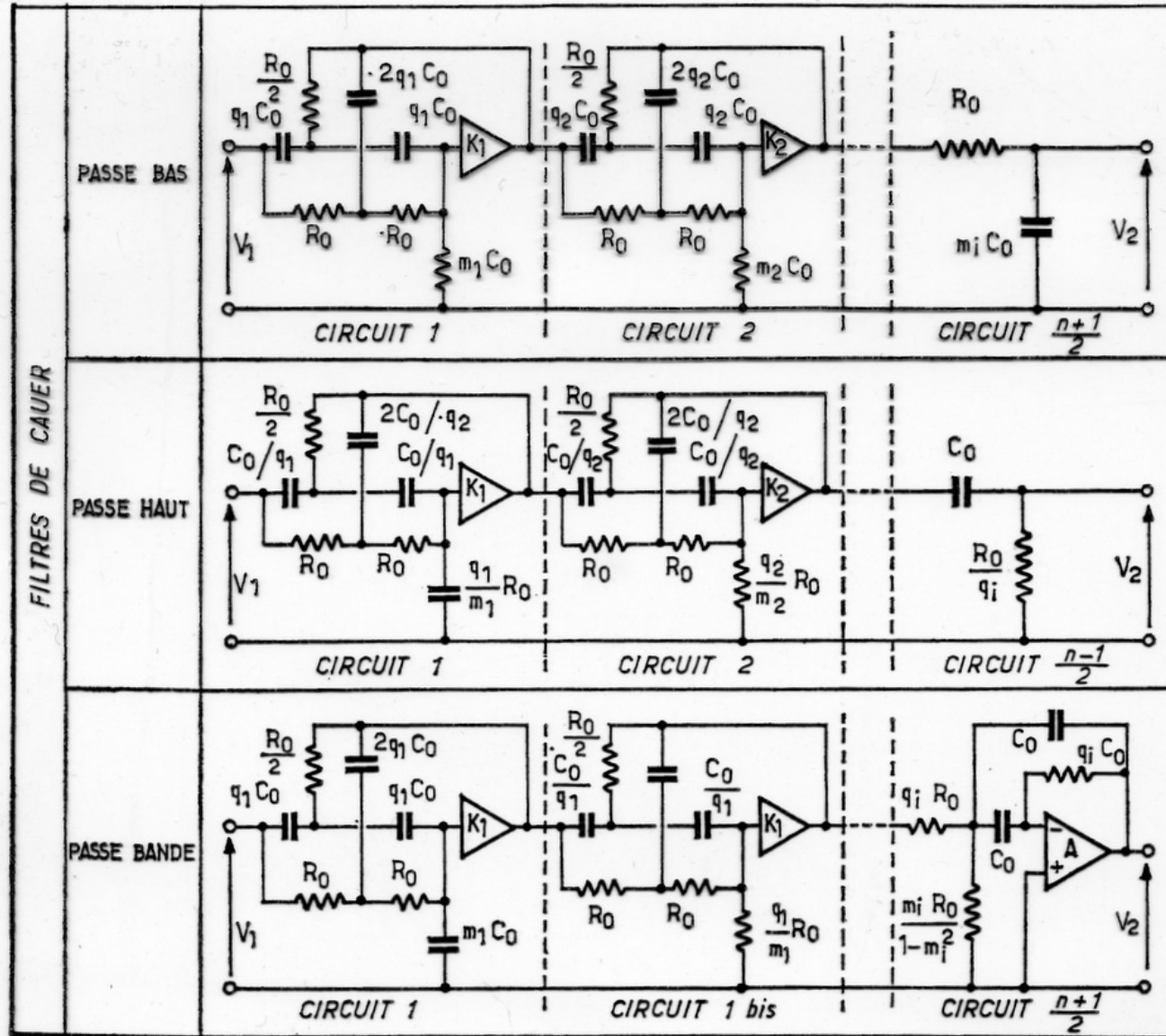


Tableau des coefficients de gain des cellules du filtre de Butterworth précédent jusqu'au 10ème ordre, et le gain total du filtre en fonction de son ordre.

Ordre	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$A_R$ dB
2	0,586	—	—	—	—	4,02
3	1,000	—	—	—	—	6,02
4	0,152	1,235	—	—	—	8,22
5	0,382	1,382	—	—	—	10,36
6	0,068	0,586	1,482	—	—	12,46
7	0,199	0,753	1,555	—	—	14,6
8	0,039	0,336	0,889	1,610	—	16,7
9	0,120	0,469	1,000	1,653	—	18,82
10	0,024	0,218	0,586	1,092	1,687	20,94

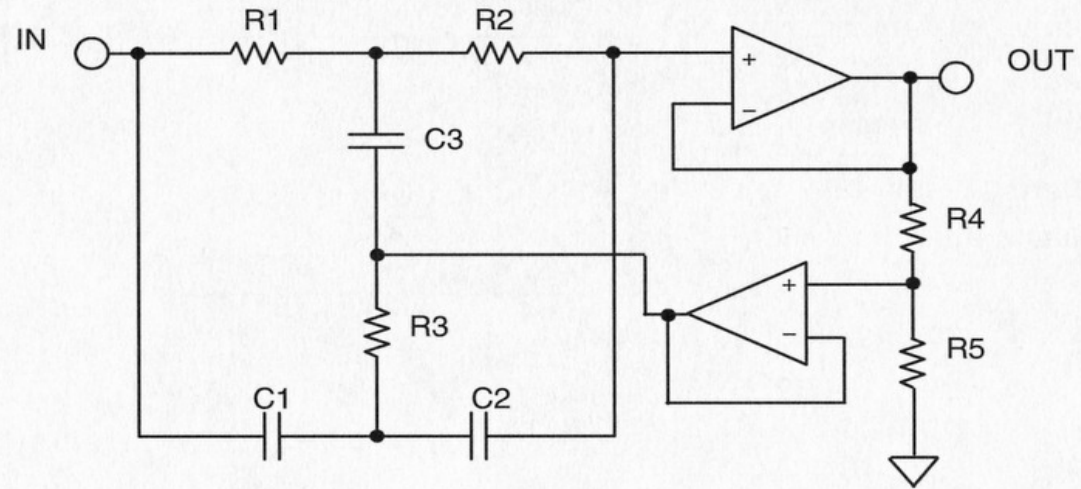
# Filtre de Cauer ou elliptique avec une structure de Sallen et Key à sources de tension contrôlées



# Filtre réjecteur en double T

C'est le filtre réjecteur ou « Notch » le plus classique et le plus utilisé. Si Q est facilement réglable, Fc est plus délicat à ajuster. Avec des composants à 1% , il peut donner 50 dB de réjection à Fc

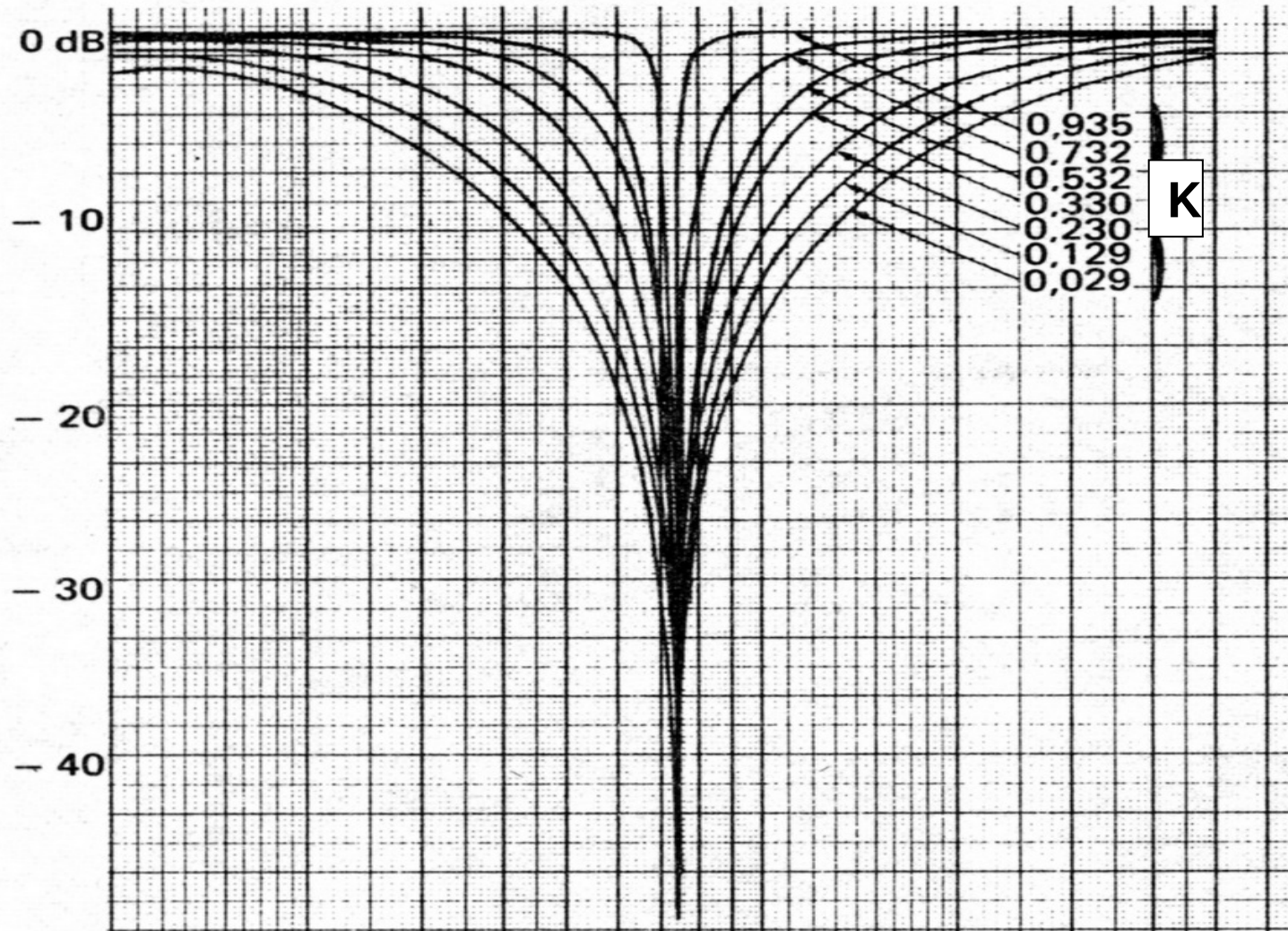
TWIN-T NOTCH



$$\frac{V_o}{V_{IN}} = \frac{s^2 + \frac{1}{RC}}{s^2 + \frac{1}{RC} 4 \left( 1 - \frac{R5}{R4 + R5} \right) s + \frac{1}{RC}} \cdot \frac{s^2 + \omega_0^2}{s^2 + 4\omega_0(1-K)s + \omega_0^2}$$

CHOOSE:	C	R'
	$k = 2 \pi F_0 C$	$R4 = (1 - K) R'$
	$R = \frac{1}{k}$	$R5 = K R'$
	$R = R1 = R2 = 2 R3$	$K = 1 - \frac{1}{4Q}$
	$C = C1 = C2 = \frac{C3}{2}$	for $K = 1$ , eliminate R4 and R5 (i.e., $R5 \rightarrow 0, Q \rightarrow \infty$ )
	$F_0 = \frac{1}{2\pi RC}$	for $R \gg R4$ , eliminate buffer

# Courbe de réponse du filtre réjecteur en double T

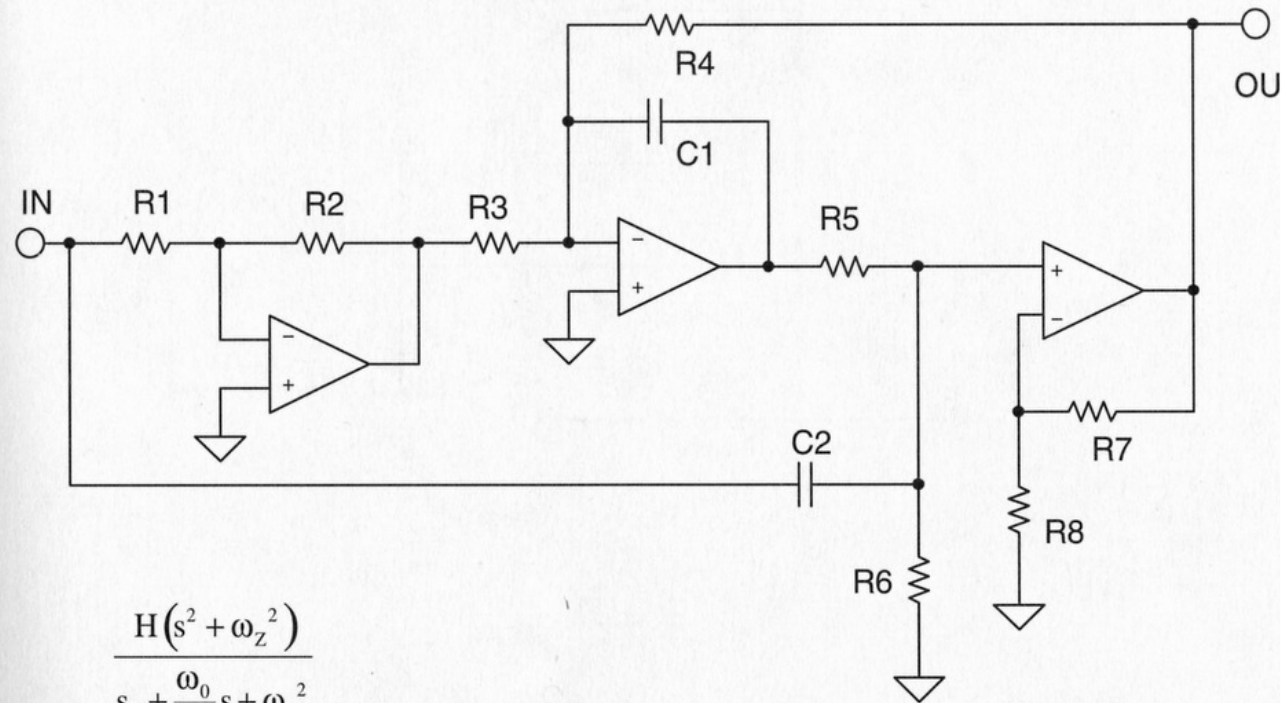




# Filtre réjecteur de Bainter

Ce filtre réjecteur est plus complexe que le précédent. Son principal avantage est d'avoir un Q dépendant uniquement du gain des amplificateurs et insensible aux variations des composants passifs.

BAINTER NOTCH



$$\frac{H(s^2 + \omega_z^2)}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2}$$

CHOOSE C1, R1, R7, K1, K2

$$C2 = C1 = C$$

$$k = 2\pi F_0 C$$

$$R2 = K1 * R1$$

$$Z = \left(\frac{\omega_z}{\omega_0}\right)^2$$

$$R3 = \frac{K1}{2ZQk}$$

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{K2 * \left[ s^2 + \frac{K1}{R3 R5 C1 C2} \right]}{s^2 + \frac{(R5 + R6)}{R5 R6 C2} s + \frac{K2}{R4 R5 C1 C2}}$$

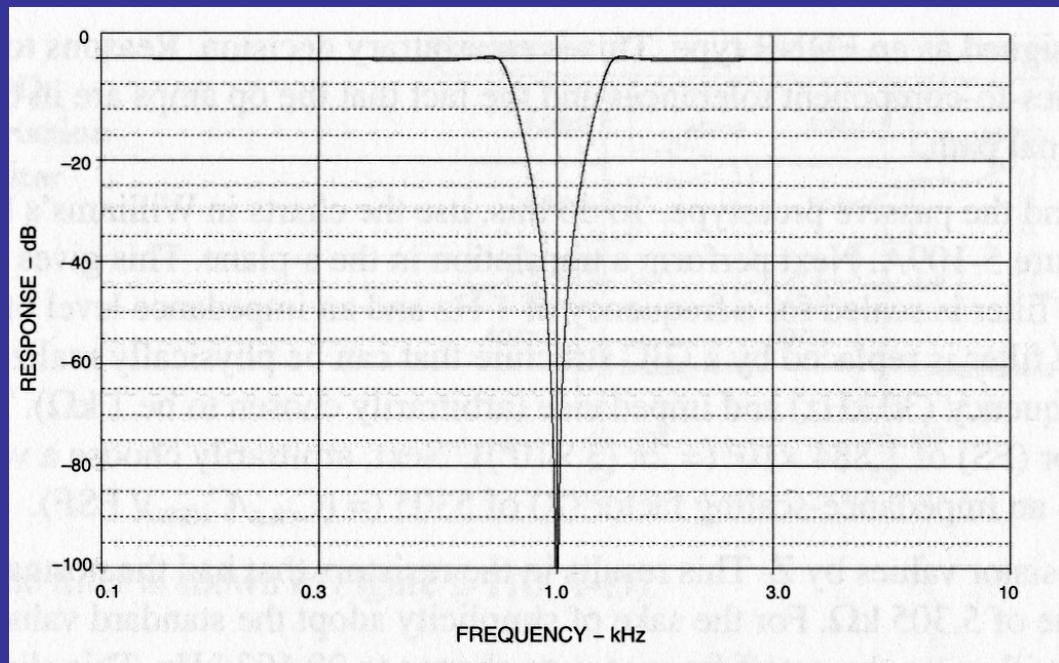
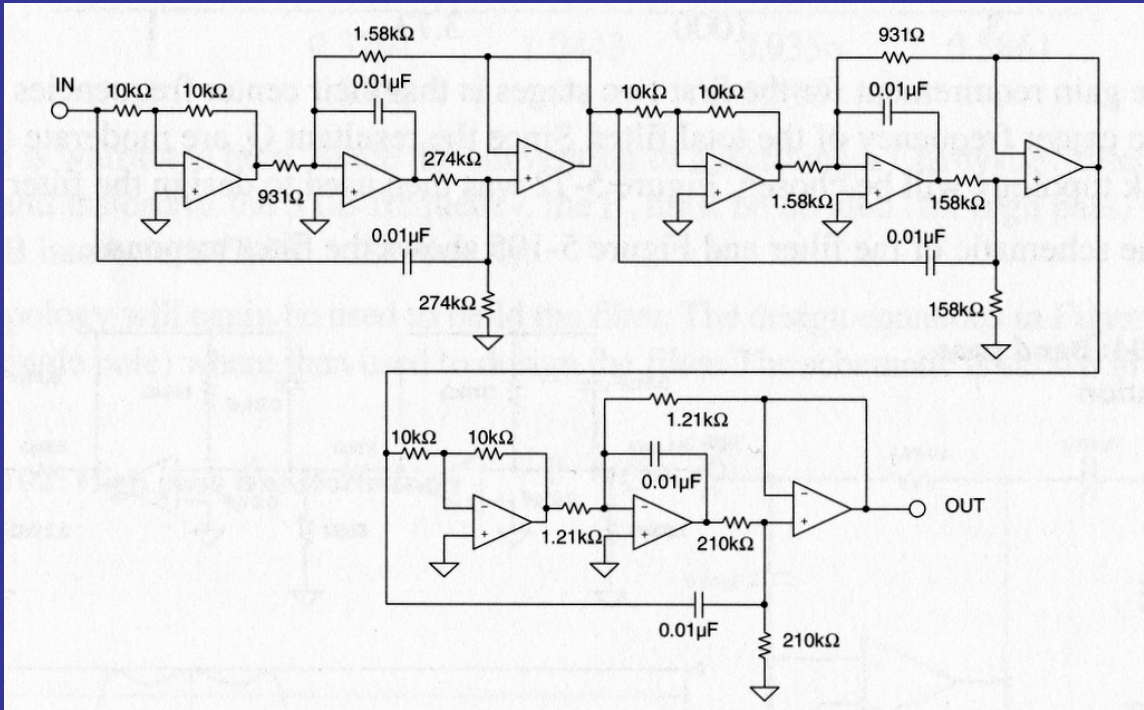
$$R4 = \frac{K2}{2Qk}$$

$$R5 = R6 = \frac{2Q}{k}$$

$$R8 = (K2 - 1) R7$$

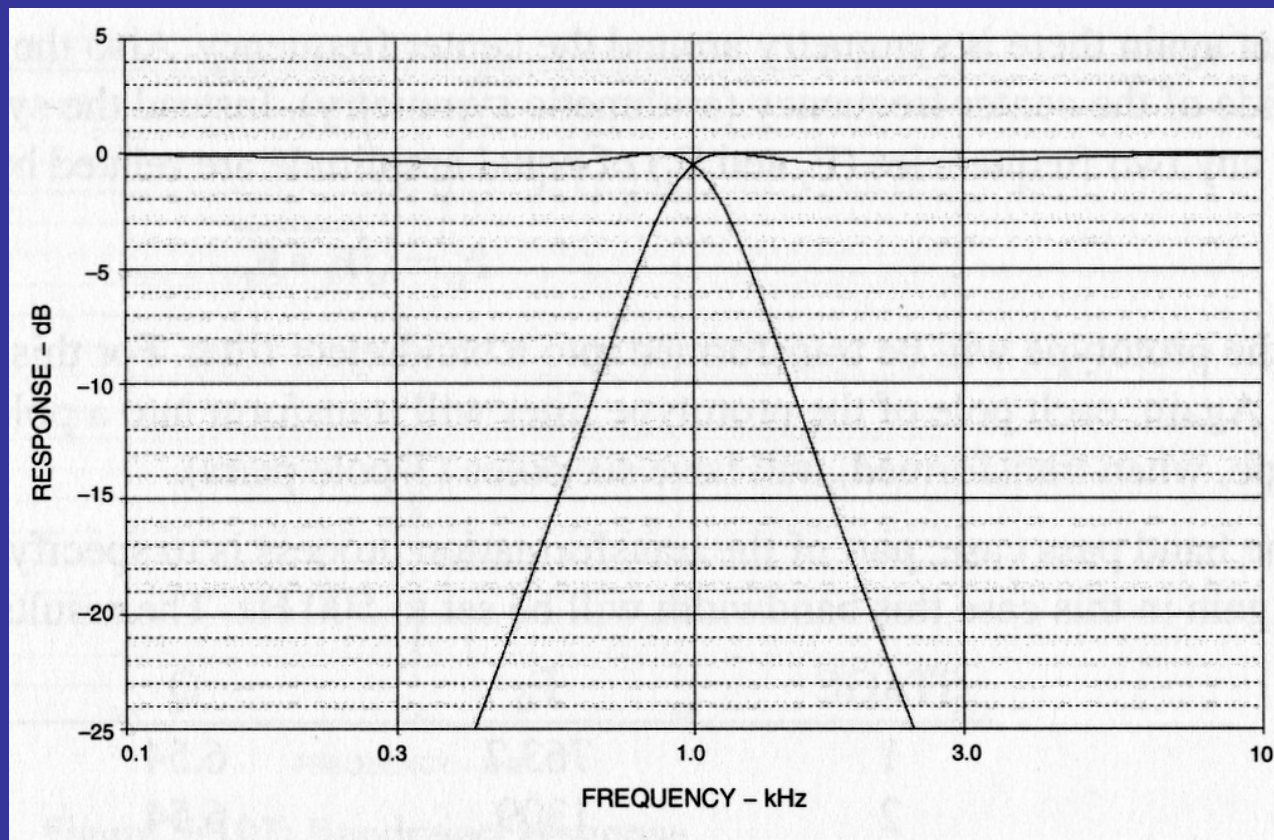
# Filtere réjecteur de Bainter

Mise en série de 3 cellules réjectrices de Bainter du 2ème ordre, pour obtenir 100 dB de réjection à  $F_c$



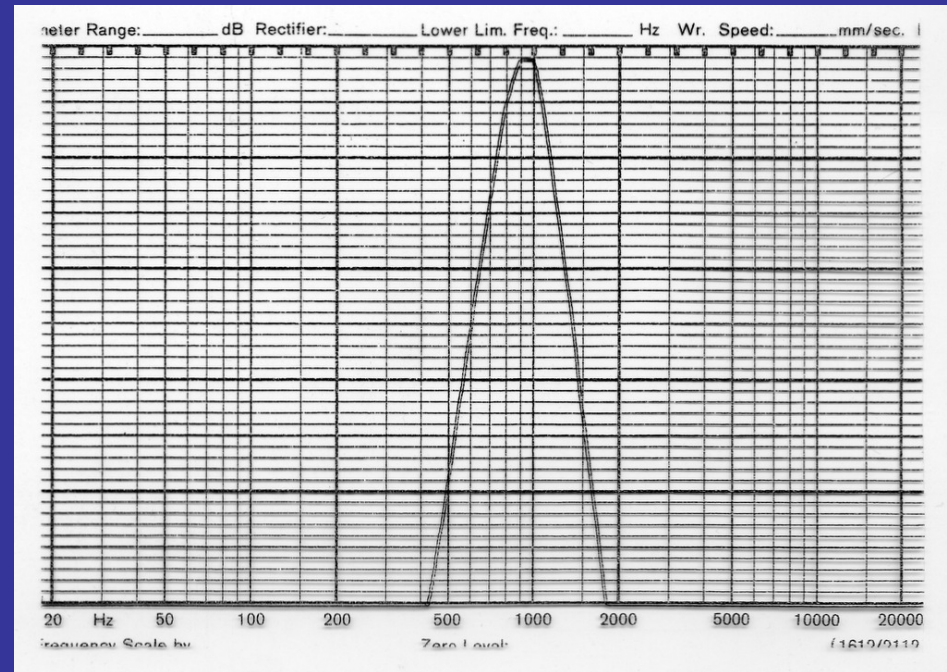
## Les filtres Passe – Bande

Les filtres Passe - Bande sont réalisés soit par l'association de filtres Passe – Bas et Passe – Haut de tout ordres et toute formes, soit par la mise en série de plusieurs cellules Passe-Bande du 2ème ordre avec des Fréquences de coupure décalées

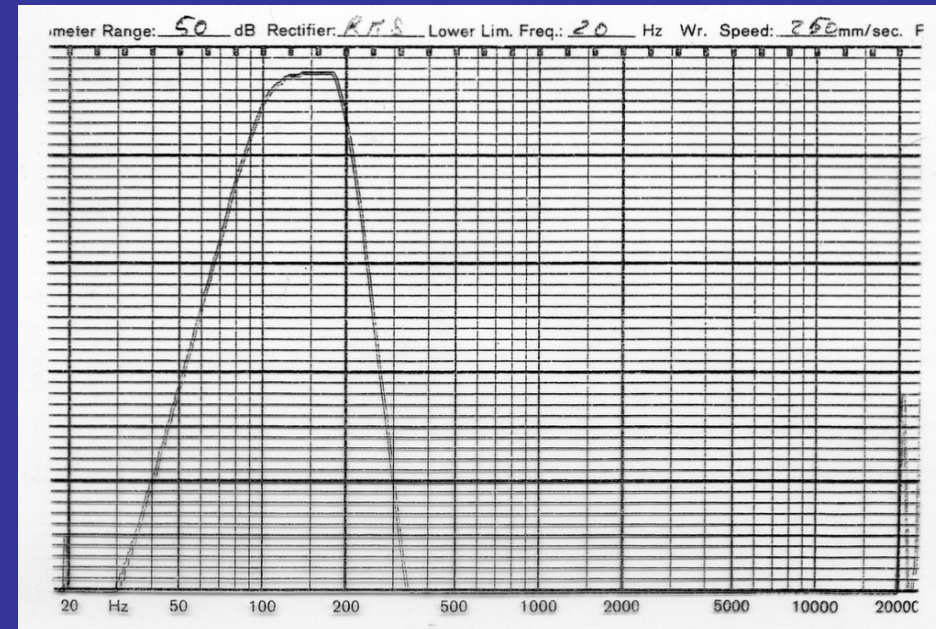


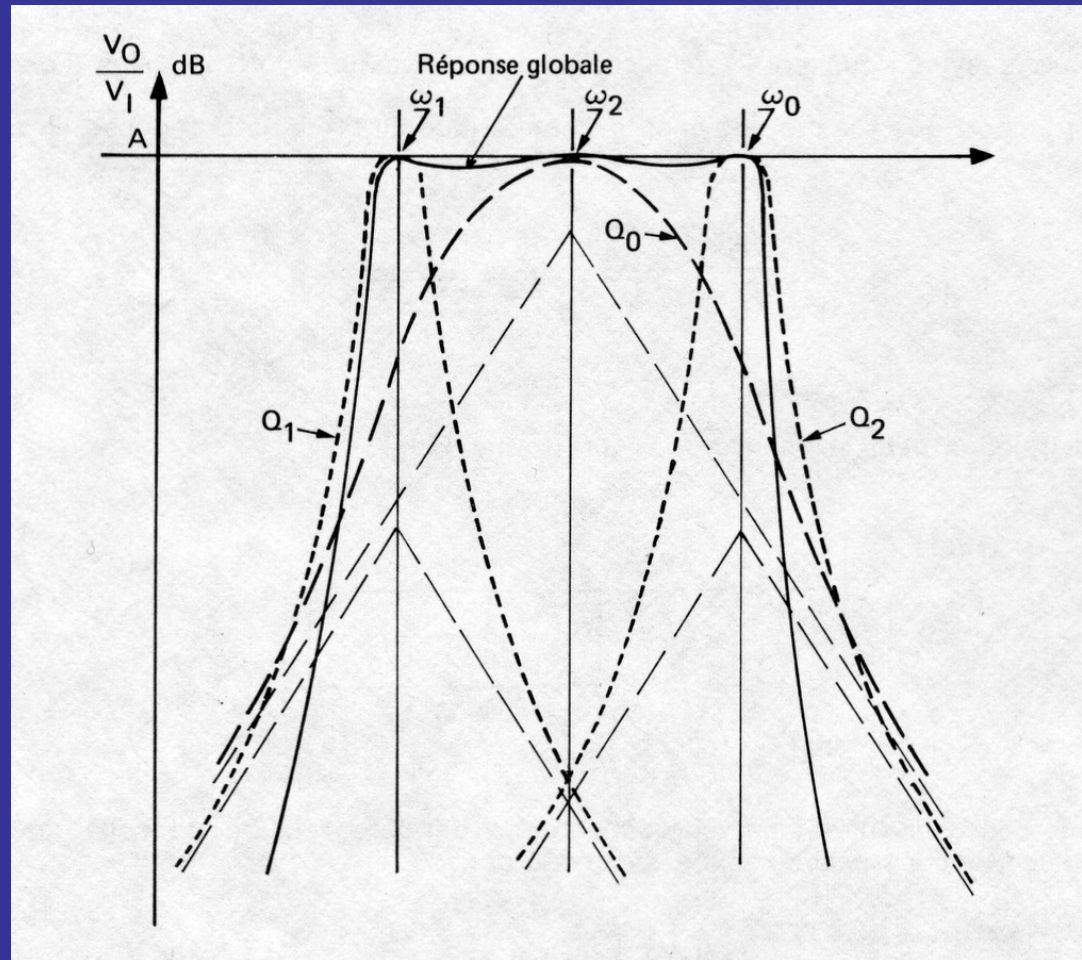
Courbe de réponse d'un filtre Passe – Bande symétrique constitué par l'association d'un Passe – Bas et un Passe – Haut de Chebishev

Courbe de réponse d'un filtre Passe – Bande réalisé par l'association d'un Passe – Haut et un Passe – Bas de Butterworth d'ordre 10. La largeur de bande à -3 dB est de 200 Hz. Les pentes d'atténuation sont de 60 dB par octave

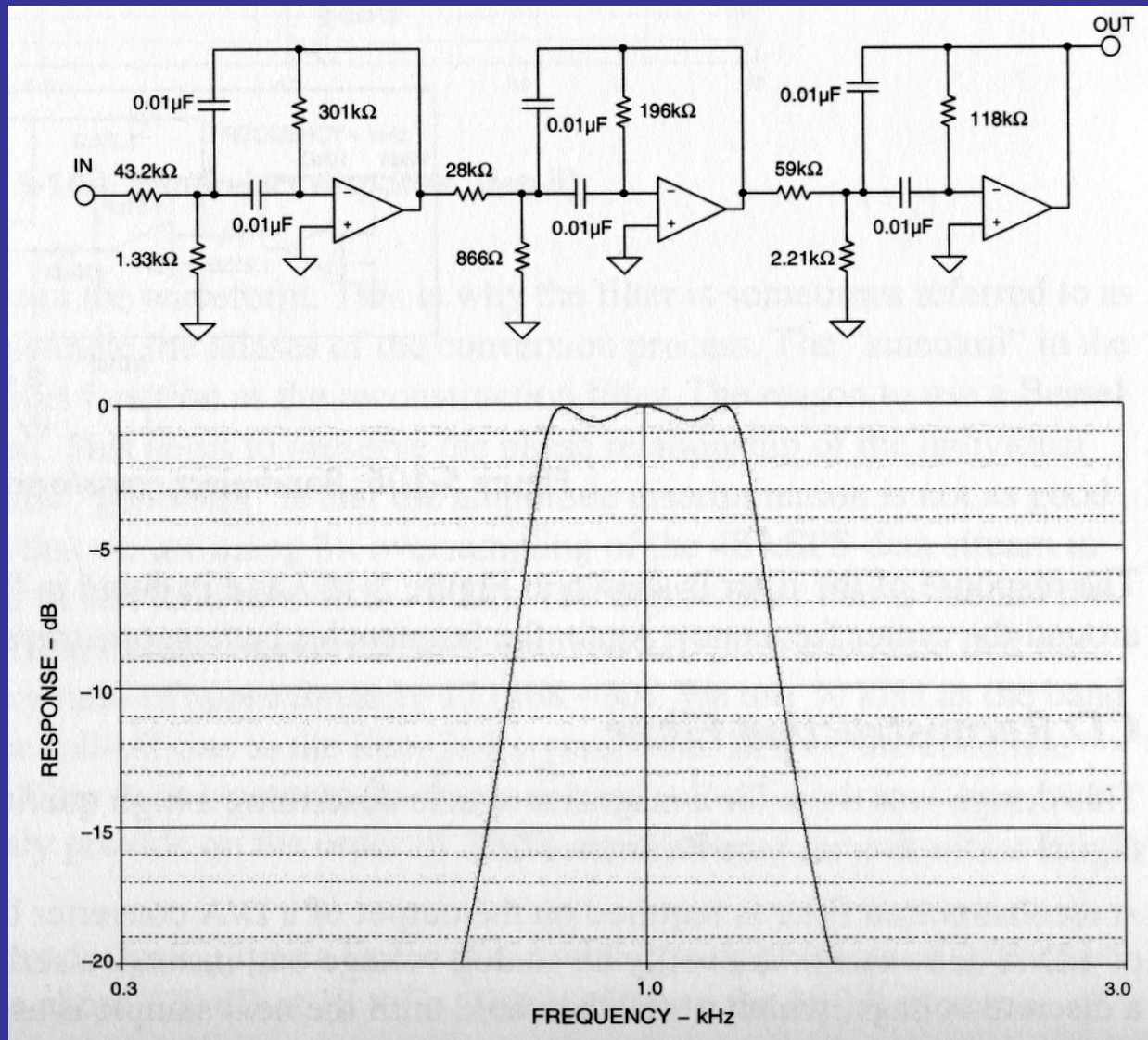


Courbe de réponse d'un filtre Passe – Bande dissymétrique réalisé par l'association d'un Passe – Haut de Butterworth d'ordre 6 et un Passe – Bas de Butterworth d'ordre 10. La structure de Sallen et Key s'avère la plus performante pour réaliser des filtre de gabarit complexes et précis





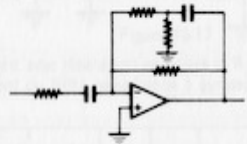
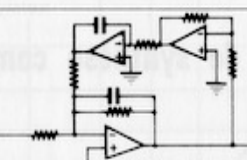
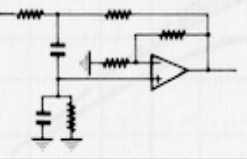
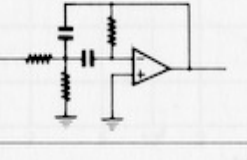
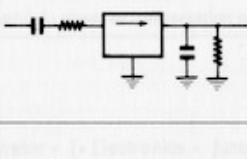

Décomposition de la courbe de réponse d'un filtre Passe – Bande constitué par la mise en série de 3 cellules du 2ème ordre de fréquences centrales décalées.



Exemple de réalisation d'un filtre Passe – Bande sélectif par la mise en série de 3 cellules de Rauch du 2ème ordre avec des fréquences décalées. Ce circuit est le plus utilisé pour réaliser des filtres Passe – Bande étroits et à forte pente d'atténuation.

# Tableau comparatif des différentes structures de filtres actifs

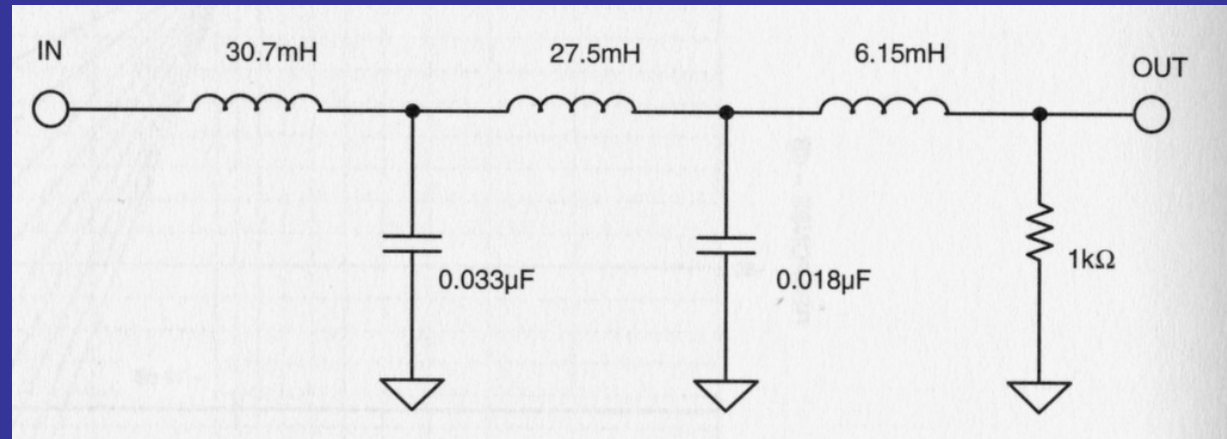
Très bon pour le paramètre analysé     Moyen  
 Bon     Médiocre

STRUCTURE DE SYNTHÈSE	RÉSEAU PASSE-BANDE TYPE (Rappel)	Surtensions possibles	Sensibilités
Contre-réaction simple		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Réseau à variable d'état		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Structure de Sallen et Key		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Structure de Rauch		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Réseau à NIC		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Réseau à gyrateur		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

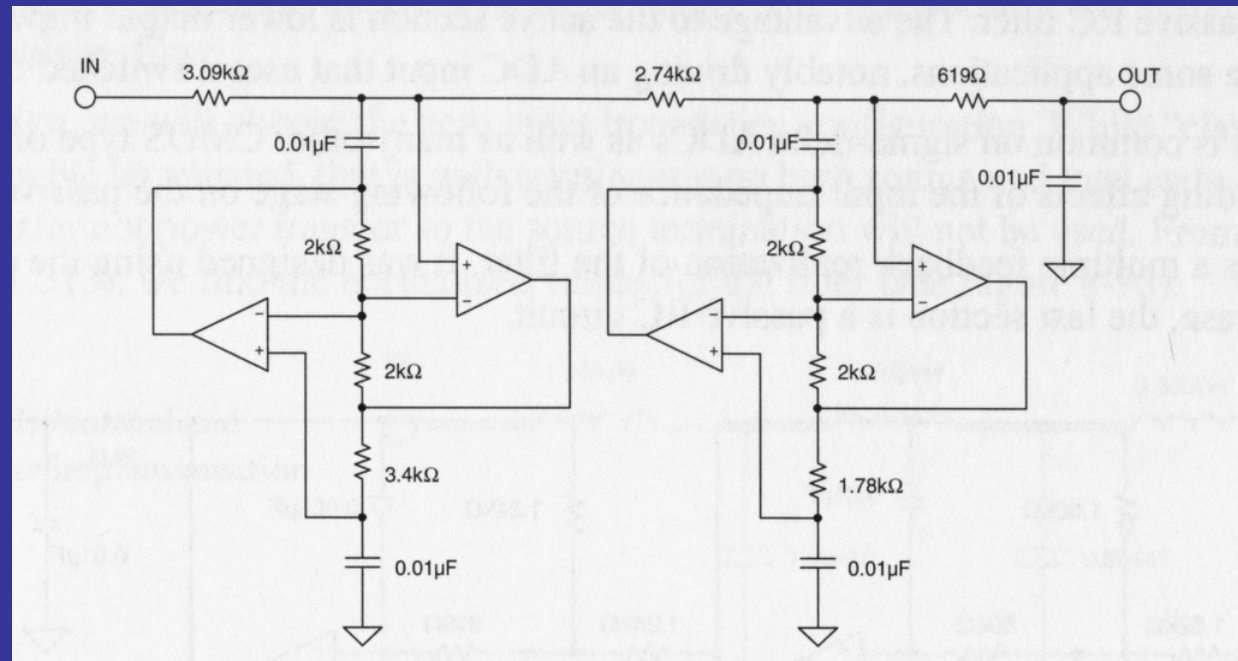
Nombre de composants	Interactions entre réglages	Rapport entre les valeurs extrêmes des composants passifs	Sortie à basse impédance	Influence de la résistance interne du générateur d'entrée	Prix de revient par paire de pôles
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

# Comparaison de la complexité de différentes structures pour réaliser un filtre Passe – Bas de Butterworth du 5ème ordre avec $F_c$ à 8kHz

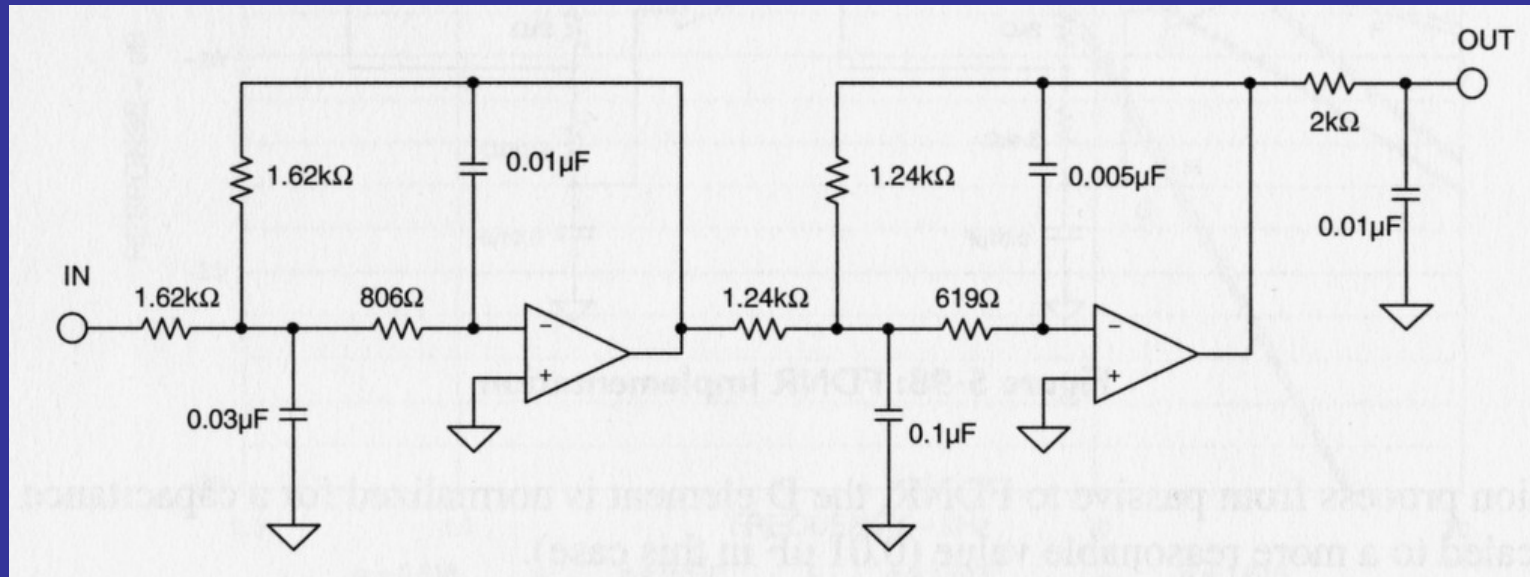
Filtre électrique passif (self-cap) Passe – Bas de Butterworth d'ordre 5 avec  $F_c$  à 8kHz.



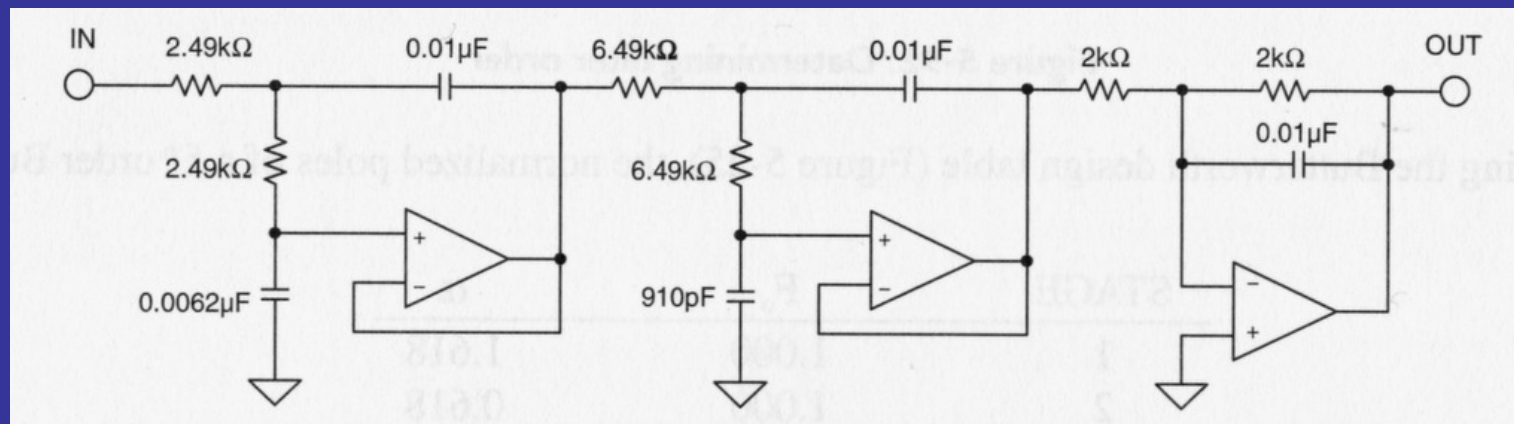
Le même filtre Passe – Bas d'ordre 5 réalisé avec des convertisseurs d'impédance négative



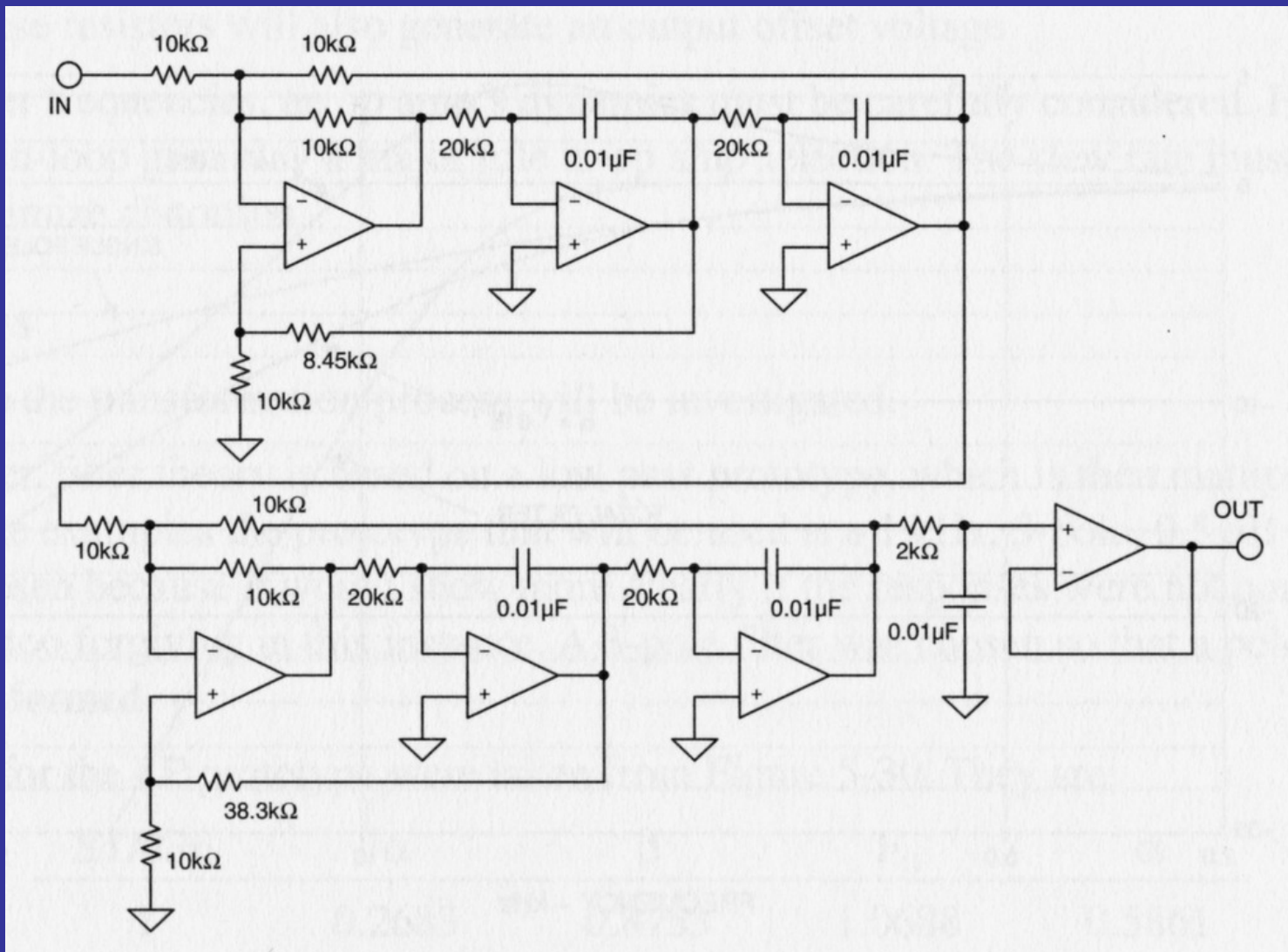




Le même filtre Passe – Bas d'ordre 5 réalisé avec une structure de Rauch (contre-réactions multiples).



Le même filtre Passe – Bas d'ordre 5 réalisé avec une structure de Sallen et Key (source de tension contrôlée).



Le même filtre Passe – Bas d'ordre 5 réalisé avec un réseau à variable d'état. On constate que cette structure est la plus gourmande en amplificateurs opérationnels; 7 contre 3 pour Sallen et Key !

## Problèmes pratiques de réalisation de filtres actifs

Un filtre RC actif ne se comporte jamais exactement comme prévu. Les deux causes principales en sont sa sensibilité passive provoquée par les imprécisions des résistances et capacités et sa sensibilité active provoquée par celle des amplificateurs opérationnel.

La valeur de la fréquence de résonance, du facteur de qualité et du gain d'un filtre RC-actif sont directement déterminés par la valeurs des composants passifs. Si ces composants dérivent, c'est toutes les caractéristiques du filtre qui fluctuent surtout pour les ordres élevés à fort Q. Les composants passifs ne sont pas parfaits et ont parfois des caractéristiques mixtes (capacités résistives, résistances selfiques etc..) et leurs valeurs sont des fonctions variables de leur environnement, tel la température, la tension des signaux qui les traverse, du vieillissement etc.. Dans les hautes et basses fréquences, une banale implantation des éléments passifs peut les parasiter et être une cause importante de variabilité des caractéristiques des filtres.

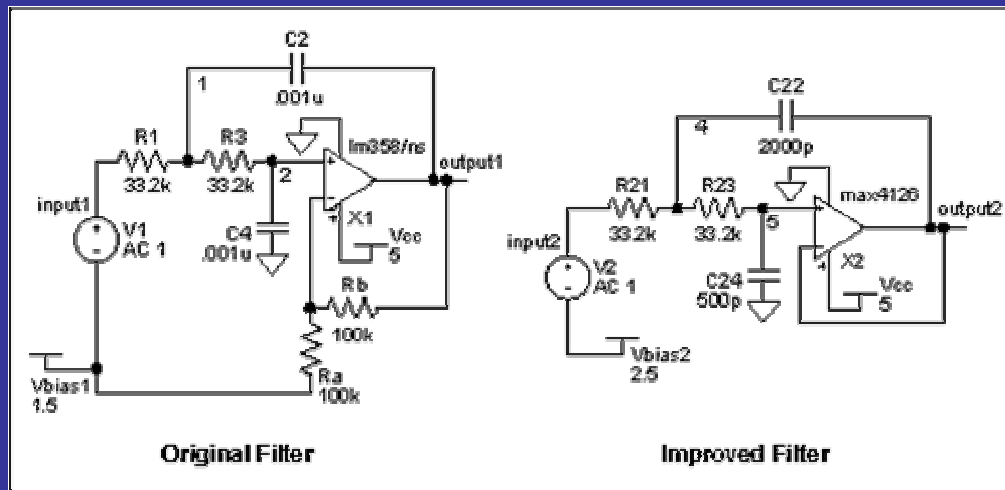
L'amplificateur opérationnel idéal doit avoir un produit gain bande infini, une impédance d'entrée infinie, et une impédance de sortie nulle. Malgré les grands progrès des fabricants, il n'a pas encore atteint la perfection voulue. La sensibilité active des filtres RC-actifs dues aux amplificateurs opérationnels dépend beaucoup de la structure. Ainsi celle de Sallen et Key y est moins sensible que celle de Rauch. D'autres effets plus subtils tels que les distorsions provoquées par des variations dynamiques des capacités d'entrée sur des amplificateurs opérationnels à FET sont à prendre en compte.

# Caractéristiques des différents types de condensateurs utilisables pour la construction de filtres RC-actifs.

CAPACITOR COMPARISON CHART			
TYPE	TYPICAL DA	ADVANTAGES	DISADVANTAGES
Polystyrene	0.001% to 0.02%	Inexpensive Low DA Good Stability (~120ppm/°C)	Damaged by Temperature > 85°C Large High Inductance Vendors Limited
Polypropylene	0.001% to 0.02%	Inexpensive Low DA Stable (~200ppm/°C) Wide Range of Values	Damaged by Temperature > 105°C Large High Inductance
Teflon	0.003% to 0.02%	Low DA Available Good Stability Operational above 125 °C Wide Range of Values	Expensive Large High Inductance
Polycarbonate	0.1%	Good Stability Low Cost Wide Temperature Range Wide Range of Values	Large DA Limits to 8-Bit Applications High Inductance
Polyester	0.3% to 0.5%	Moderate Stability Low Cost Wide Temperature Range Low Inductance (Stacked Film)	Large DA Limits to 8-Bit Applications High Inductance (Conventional)
NP0 Ceramic	<0.1%	Small Case Size Inexpensive, Many Vendors Good Stability (30ppm/°C) 1% Values Available Low Inductance (chip)	DA Generally Low (May not be Specified) Low Maximum Values ( $\leq 10nF$ )
Monolithic Ceramic (High K)	>0.2%	Low Inductance (chip) Wide Range of Values	Poor Stability Poor DA High Voltage Coefficient
Mica	>0.003%	Low Loss at HF Low Inductance Good Stability 1% Values Available	Quite Large Low Maximum Values ( $\leq 10nF$ ) Expensive
Aluminum Electrolytic	Very High	Large Values High Currents High Voltages Small Size	High Leakage Usually Polarized Poor Stability, Accuracy Inductive
Tantalum Electrolytic	Very High	Small Size Large Values Medium Inductance	High Leakage Usually Polarized Expensive Poor Stability, Accuracy

# Caractéristiques des différents types de résistances utilisables pour la construction de filtres RC-actifs.

RESISTOR COMPARISON CHART			
	TYPE	ADVANTAGES	DISADVANTAGES
DISCRETE	Carbon Composition	Lowest Cost High Power/Small Case Size Wide Range of Values	Poor Tolerance (5%) Poor Temperature Coefficient (1500 ppm/°C)
	Wirewound	Excellent Tolerance (0.01%) Excellent TC (1ppm/°C) High Power	Reactance is a Problem Large Case Size Most Expensive
	Metal Film	Good Tolerance (0.1%) Good TC (<1 to 100ppm/°C) Moderate Cost Wide Range of Values Low Voltage Coefficient	Must be Stabilized with Burn-In Low Power
	Bulk Metal or Metal Foil	Excellent Tolerance (to 0.005%) Excellent TC (to <1ppm/°C) Low Reactance Low Voltage Coefficient	Low Power Very Expensive
	High Megohm	Very High Values ( $10^8$ to $10_{14}\Omega$ ) Only Choice for Some Circuits	High Voltage Coefficient (200ppm/V) Fragile Glass Case (Needs Special Handling) Expensive
NETWORKS	Thick Film	Low Cost High Power Laser-Trimmmable Readily Available	Fair Matching (0.1%) Poor TC (>100ppm/°C) Poor Tracking TC (10ppm/°C)
	Thin Film	Good Matching (<0.01%) Good TC (<100ppm/°C) Good Tracking TC (2ppm/°C) Moderate Cost Laser-Trimmmable Low Capacitance Suitable for Hybrid IC Substrate	Often Large Geometry Limited Values and Configurations

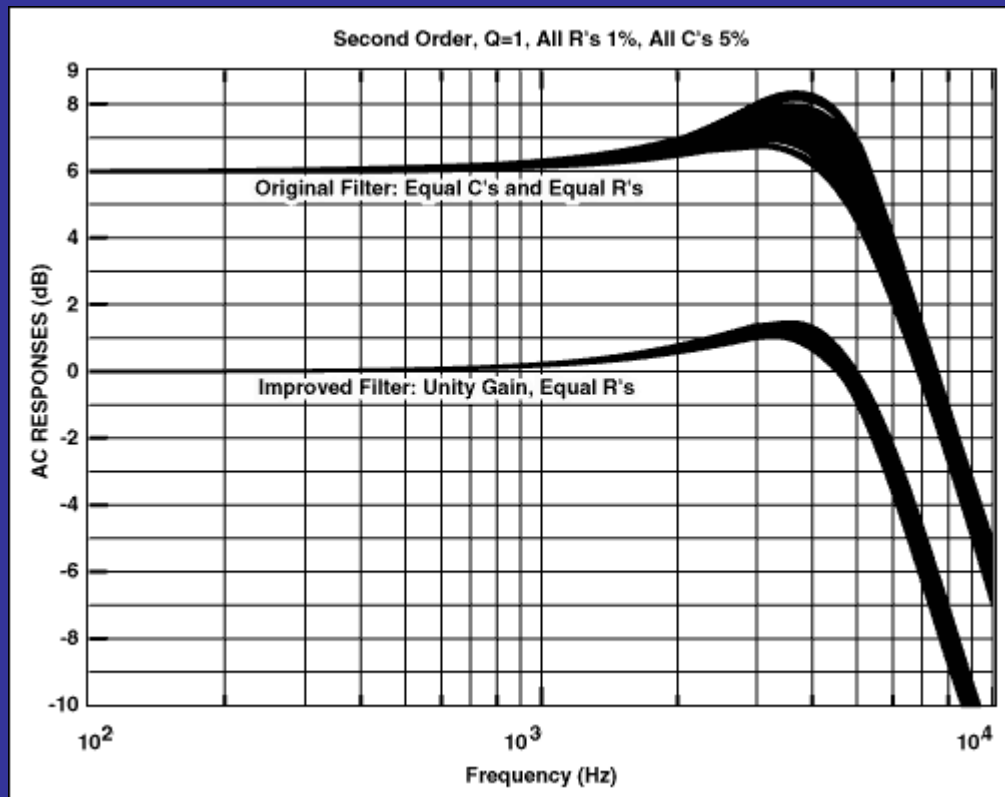


Etude par SPICE de la variation de la courbe de réponse d'une cellule du 2ème ordre Passe – Bas avec des résistances à 1 % et des capacités à 5 %. La structure est de Sallen et Key.

Dans le premier cas, le filtre est réalisé avec des éléments passifs égaux et un ampli de gain 2.

Dans le second cas, les capacités sont différentes et l'ampli est un suiveur de gain 1.

On constate dans ce dernier cas une variabilité bien moins importante de la courbe de réponse.

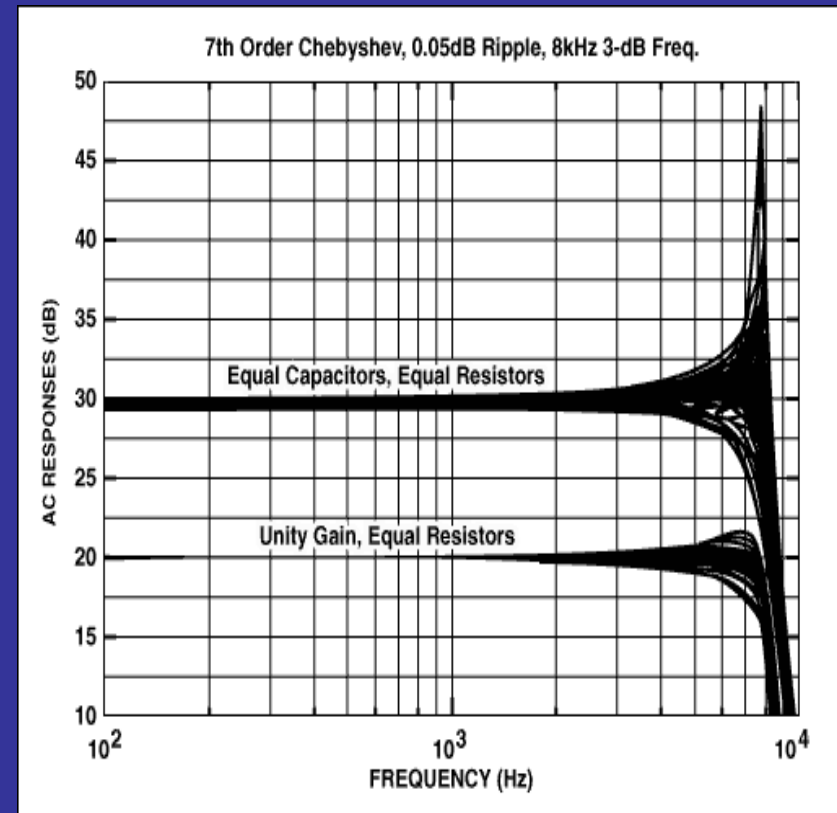
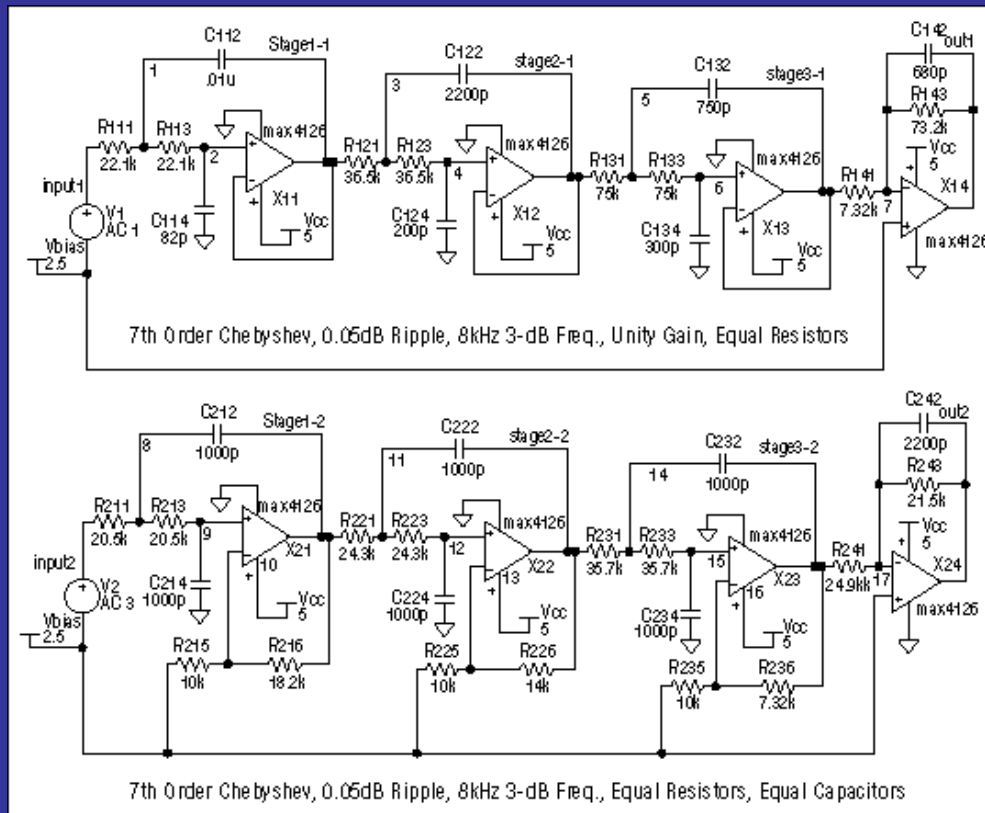


Etude par SPICE de la variation de la courbe de réponse un filtre Passe – Bas de Chebyshev du 7ème ordre. La structure est de Sallen et Key avec des résistances à 1 % et des capacités à 5 %. Sa fréquence de coupure est de 8 kHz.

Dans le premier cas, le filtre est réalisé avec des éléments passifs égaux et des amplis d'un gain total de 10 dB.

Dans le second cas, les capacités sont différentes et les amplis sont des suiveurs de gain 1.

On constate dans ce dernier cas une variabilité bien moins importante de la courbe de réponse (5 dB contre 28 à Fc).

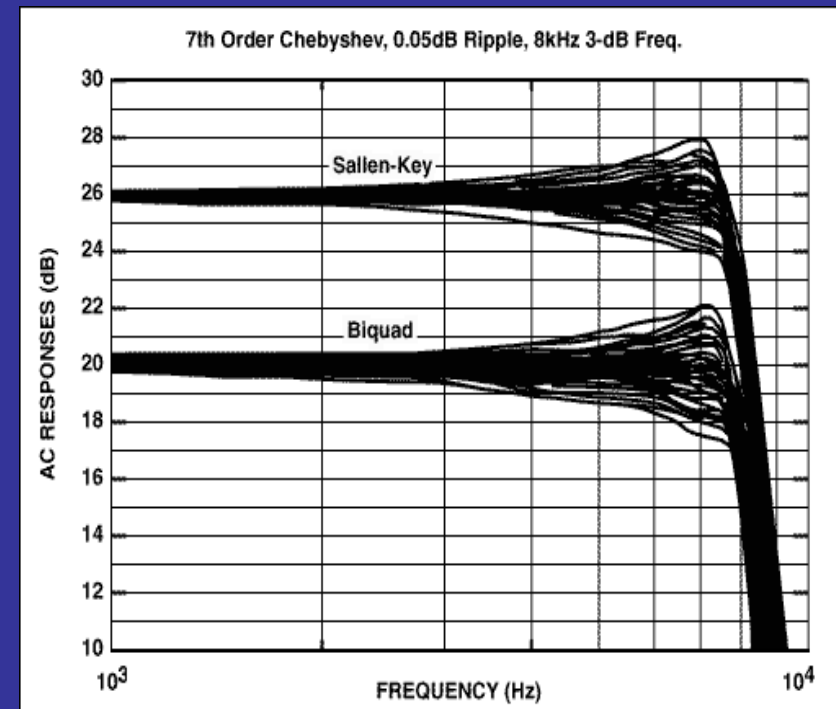
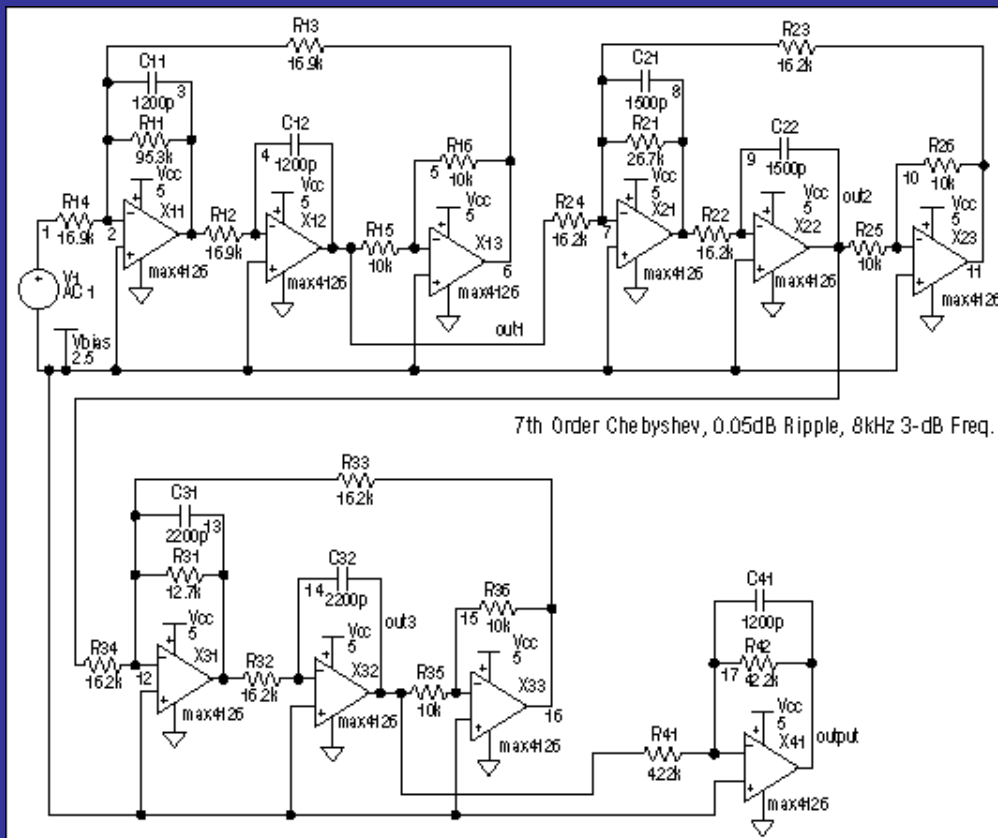


Etude par SPICE de la variation de la courbe de réponse un filtre Passe – Bas de Chebyshev du 7ème ordre, avec des résistances à 1 % et des capacités à 5 %. Sa fréquence de coupure est de 8 kHz.

Dans le premier cas, le filtre a une structure de Sallen et Key, avec des amplis suiveurs de gain 1, identique à celui de la figure précédente.

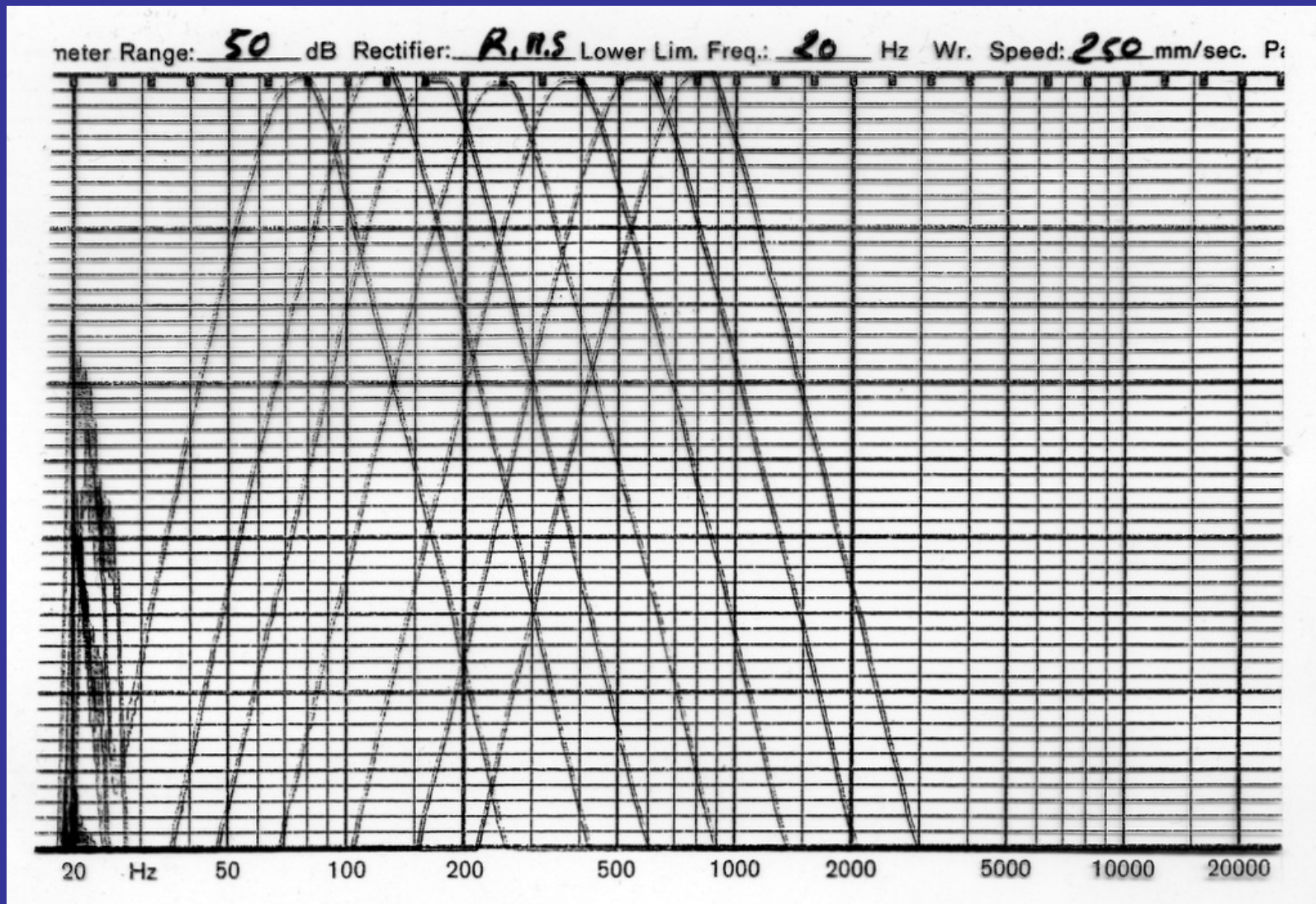
Dans le second cas, le filtre est de structure « Biquad » avec des éléments passifs de mêmes caractéristiques.

On constate que la variabilité de la courbe de réponse est équivalente pour les deux structures avec un léger avantage à celle de Sallen et Key.



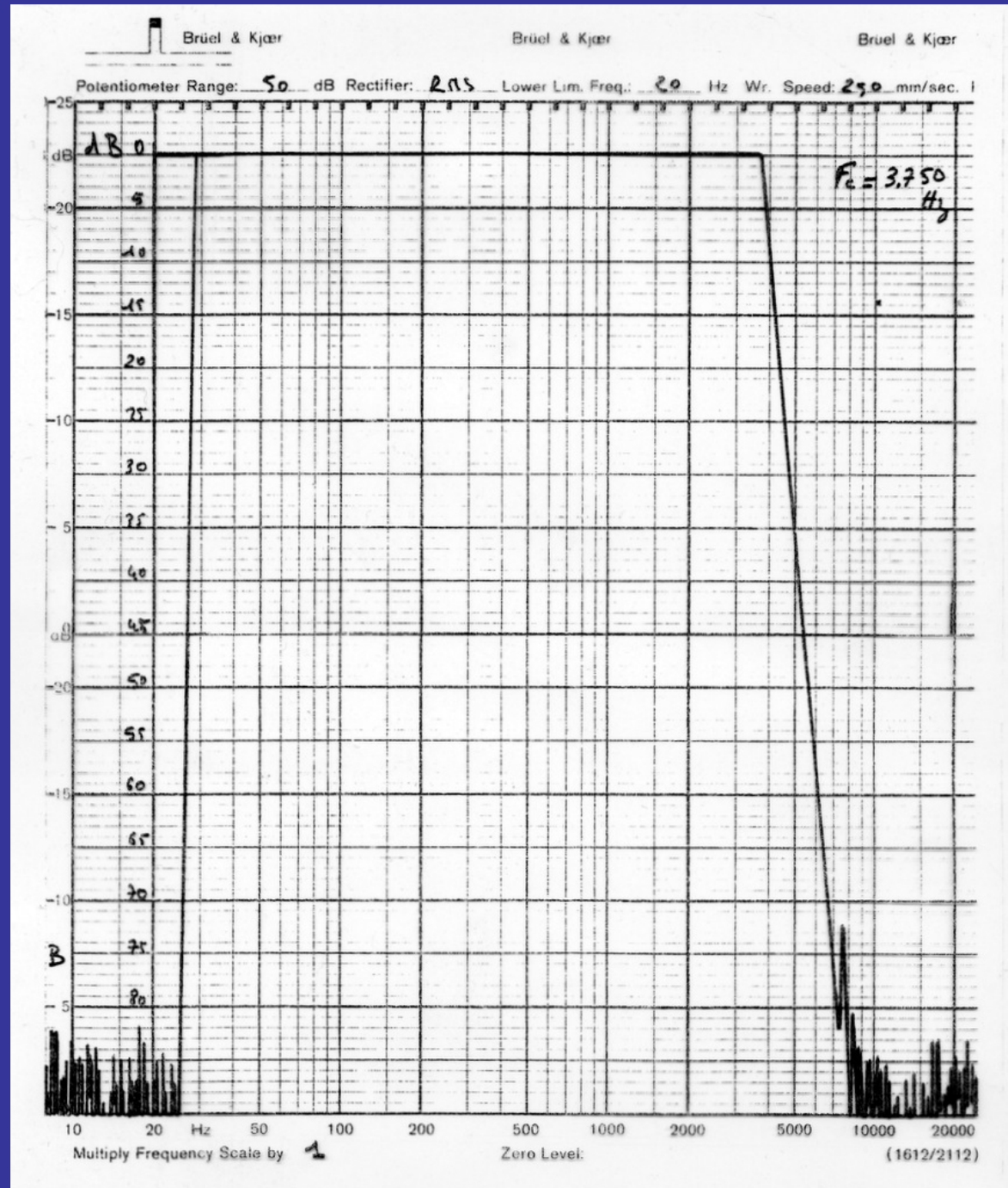


Banc de filtres Passe - Bande réalisés par l'association de Passe – Haut et Passe – Bas symétriques de Butterworth du 5ème ordre.

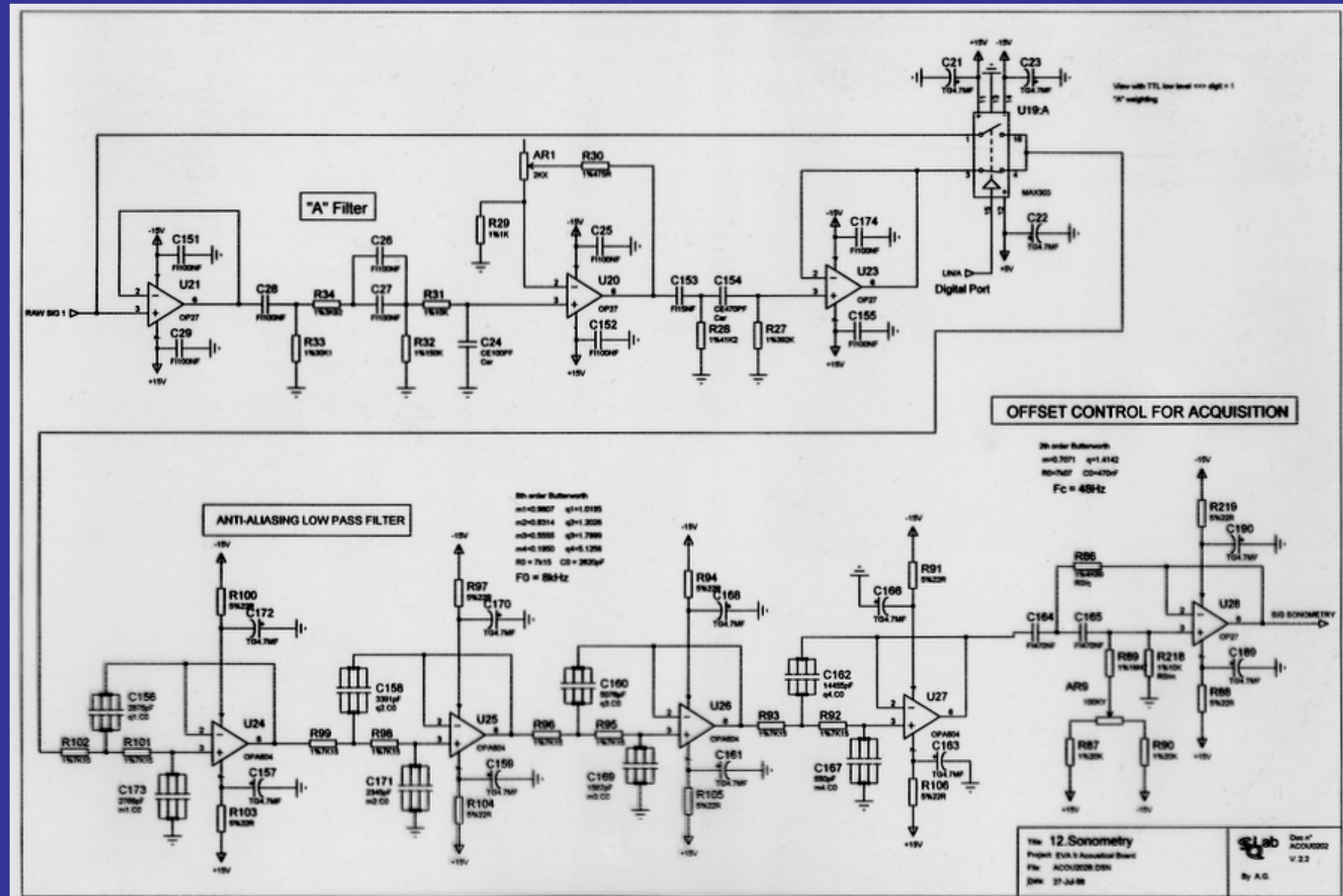


Courbe de réponse « vraie »  
d'un filtre Passe – Bas  
antirepliement de Legendre du  
10ème ordre, de structure  
Sallen et Key.

La fréquence de coupure est à  
3.750 Hz. L'atténuation de la  
bande coupée atteint 80 dB par  
octave. Le niveau de bruit est à  
-85 dB.



Réalisation industrielle d'un filtre Passe - Bas de Butterworth du 8ème ordre, avec  $F_c = 8\text{kHz}$ . La structure est de Sallen et Key. L'objectif recherché est un filtre le plus précis possible avec un bruit et une distorsion minimale.



# Comment faire varier la fréquence de coupure d'un filtre ?

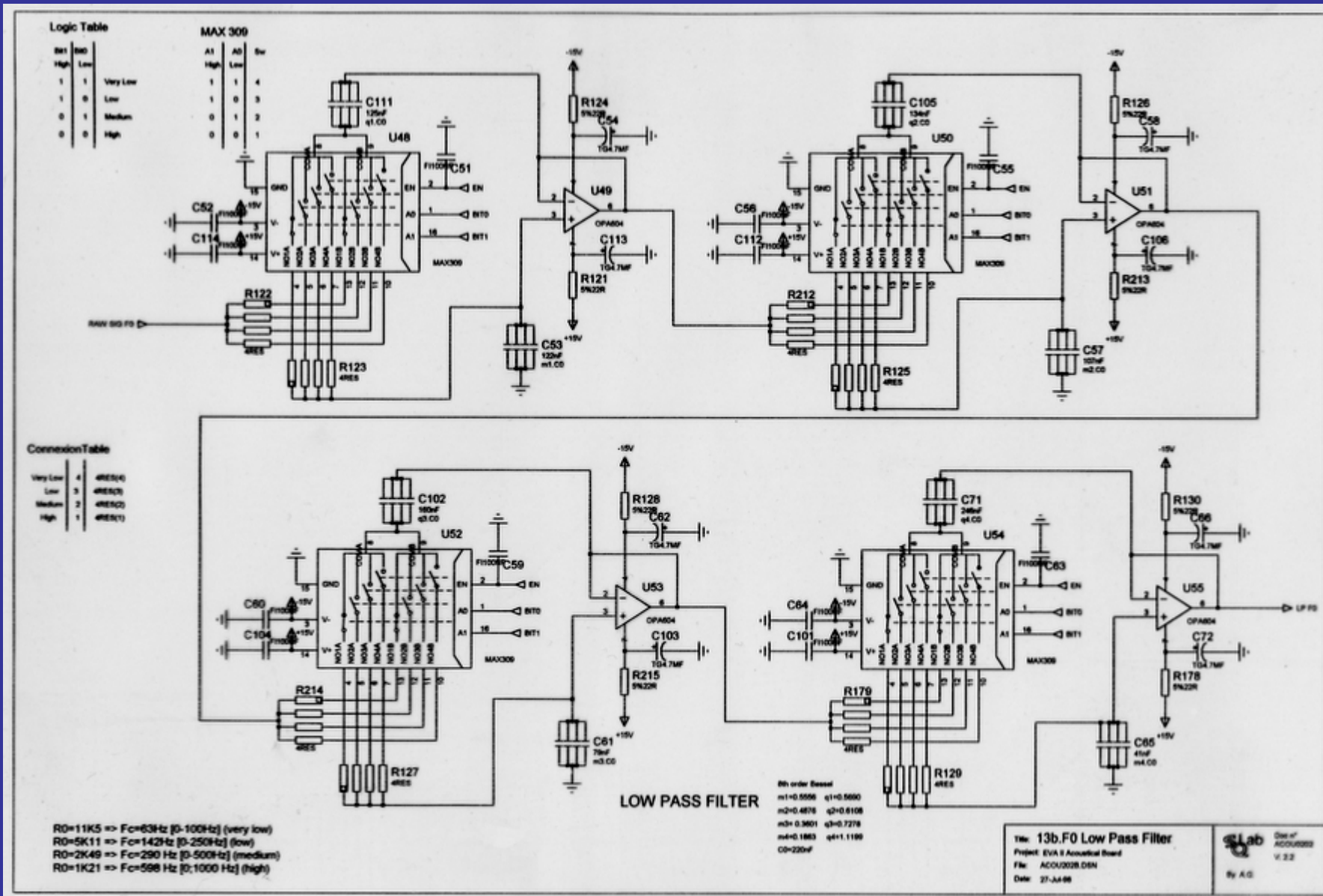
Dans de multiples applications, il peut être nécessaire de faire varier la fréquence de coupure  $F_c$  d'un filtre quel que soit son type.

La première solution consiste à changer les valeurs des résistances ou des capacités au moyen de commutateurs mécaniques manuels ou commandés (relais) ou électronique, si les pas de variation ne sont pas trop nombreux et si l'ordre du filtre n'est pas trop élevé.

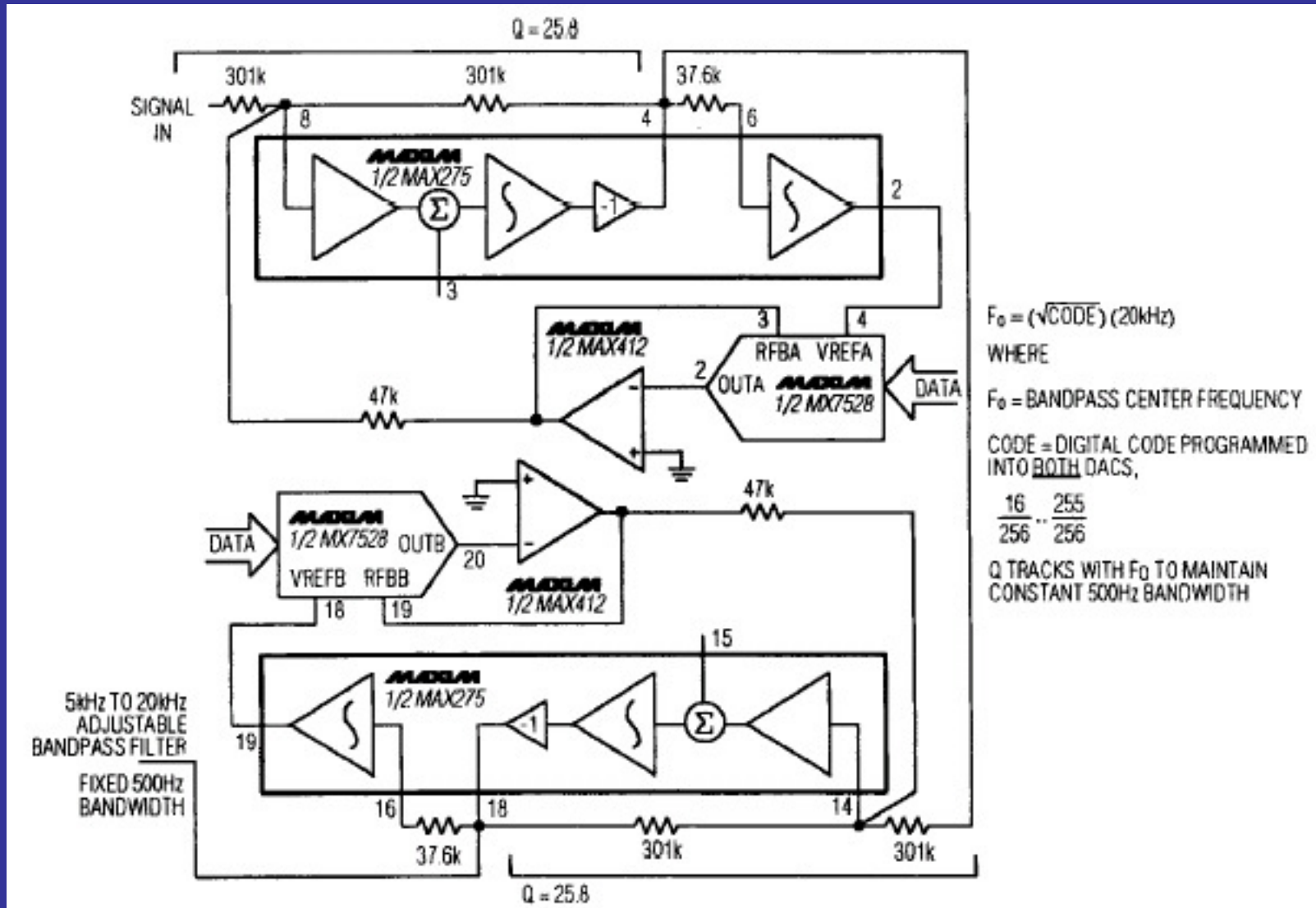
La seconde solution consiste à utiliser des résistances variables sous la forme de convertisseurs numérique-analogiques ou de potentiomètres numériques. Avec des structures à variable d'état, il est possible de faire varier également le facteur de qualité et le gain des cellules du 2ème ordre. Si l'ordre du filtre est élevé, le circuit se complexifie rapidement.

La troisième solution consiste à utiliser des filtres à capacités commutées lorsque leur taux de distorsion et leur bruit n'est pas rédhibitoire pour l'application envisagée.

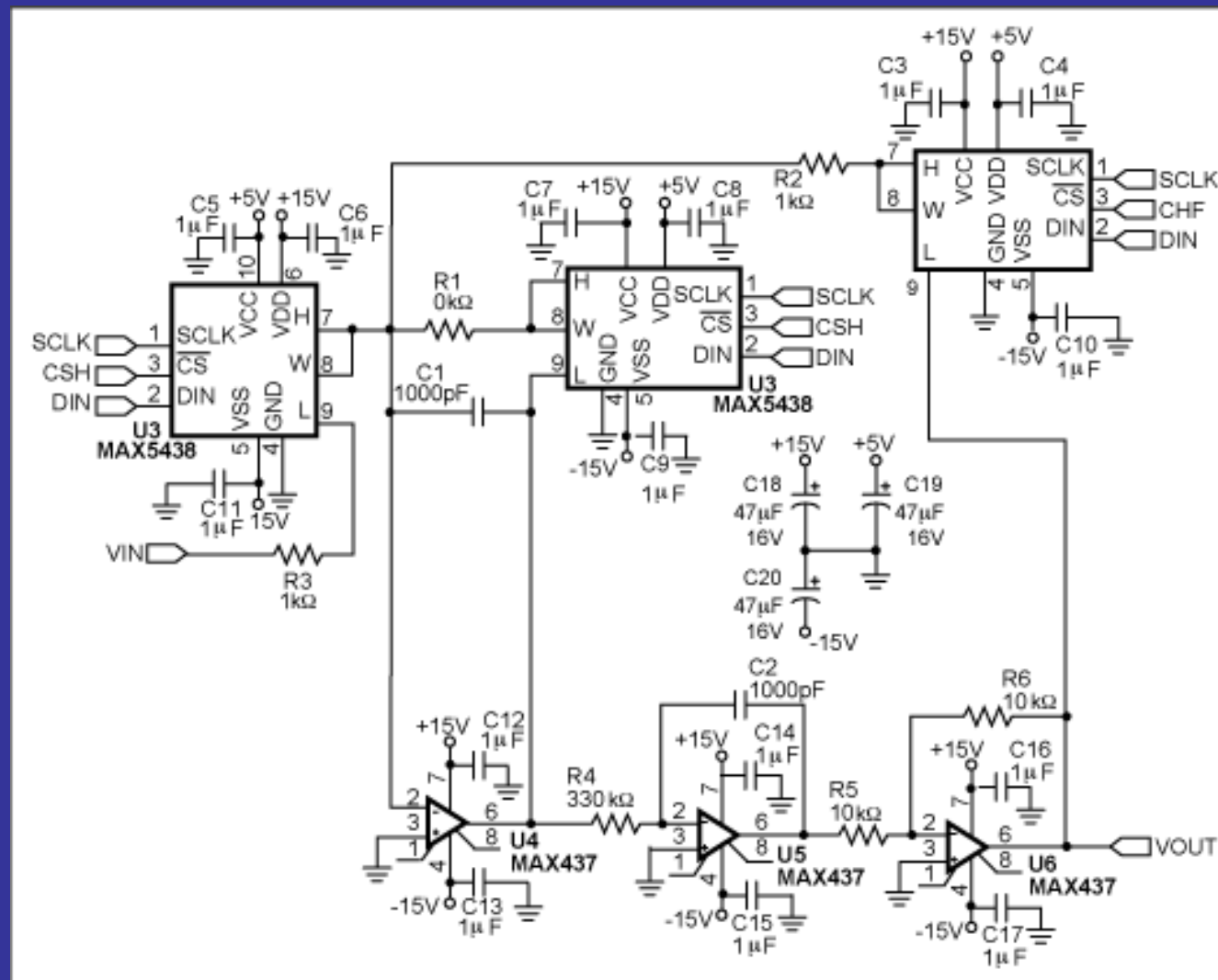
# Filtre Passe – Bas avec Fc variable par commutateur programmable



Commande de variation de la fréquence centrale d'un filtre Passe – Bande du 4ème ordre, à variable d'état intégré Max275, de 5 à 20kHz avec 500Hz de largeur de bande ,au moyen de convertisseur NA 8 bits.



Commande de variation de la fréquence de coupure d'un filtre Passe – Bande du 2ème ordre biquad, de 5 à 50kHz ,au moyen d'un potentiomètre à commande numérique série à 128 pas. Les deux autres potentiomètres font varier le facteur de qualité Q et le gain du filtre.



# Les filtres RC actif intégrés

La technologie d'intégration MOS se prête bien à la réalisation de commutateurs, d'amplificateurs opérationnels et de capacités. A partir du début des années 80 ses progrès ont permis la réalisation de filtres actifs intégrés, que ne permettait pas la technologie bipolaire.

La structure privilégiée pour l'intégration des filtres actifs, est celle à variable d'état qui n'utilise que des intégrateurs et sommateurs malgré leur nombre important en comparaison avec d'autres structures. Ces filtres sont le seul exemple de machine à calculer analogique qui se soit maintenu face au calcul numérique.

La cellule élémentaire du 2ème ordre des filtres à variable d'état est constituée par 2 intégrateurs et 1 sommateur-inverseur. Elle a la particularité de réaliser les fonctions Passe - Bande, Passe - Haut et Passe - Bas simultanément. Les capacités des intégrateurs étant fixes, on programme la fréquence de résonance de la paire de pôles, leur facteur de qualité Q, et les gains des différentes sorties au moyen de quelques résistances.

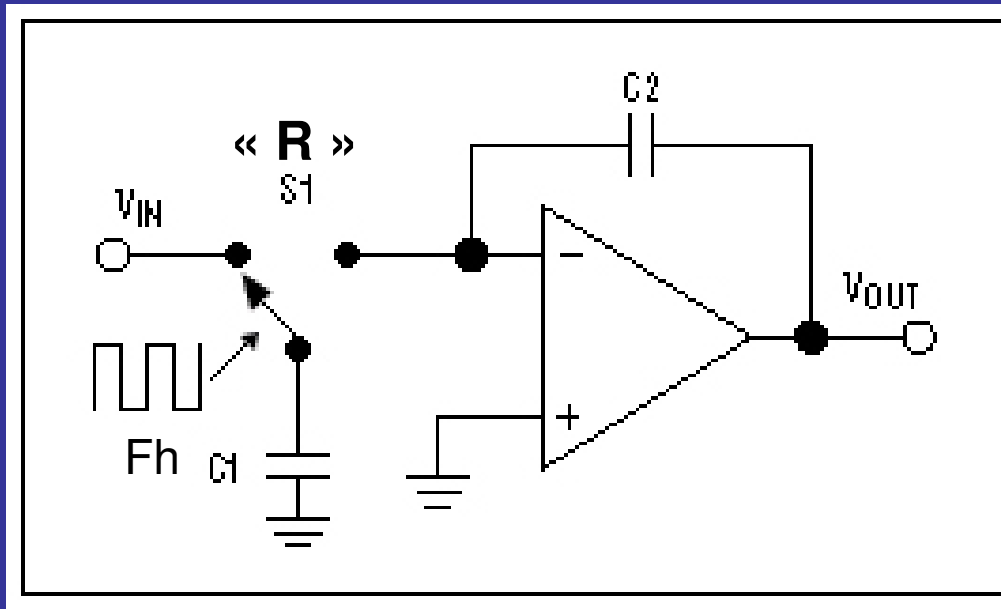
La cellule élémentaire du 2ème ordre peut également être câblée selon plusieurs mode de programmation (une dizaine) pour réaliser des filtres réjecteurs (Notch) ou Passe – Tout (All-Pass).

Ainsi, grâce à ses multiples possibilités de configuration et de programmation, la cellule élémentaire à variable d'état permet de réaliser la quasi-totalité des fonctions de filtrage.



## Les filtres à capacités commutés

Les filtres à capacités commutées, consistent à faire varier la résistance des intégrateurs des cellules élémentaires pour en changer la fréquence de résonance. On utilise la commutation d'une capacité qui se comporte alors comme une résistance selon le schéma suivant:



La capacité C1 associée au commutateur S1 actionné à la fréquence de l'horloge Fh se comporte comme une résistance R

$$Q = C1 \cdot Vin$$

$$I = Q \cdot Fc = C1 \cdot Vin \cdot Fh$$

$$R = Vin / I = 1 / C1 \cdot Fh$$

Ainsi ce principe permet de réaliser des filtres de toutes fonctions dont les fréquences de coupure peuvent varier en fonction de la fréquence de l'horloge généralement dans un rapport de 50 ou 100 ( $Fc = Fh / 100$ ). Le facteur de qualité Q des pôles, et les gains des différentes sorties du filtre sont programmés au moyen de 4 résistances externes au circuit par cellule de 2ème ordre.

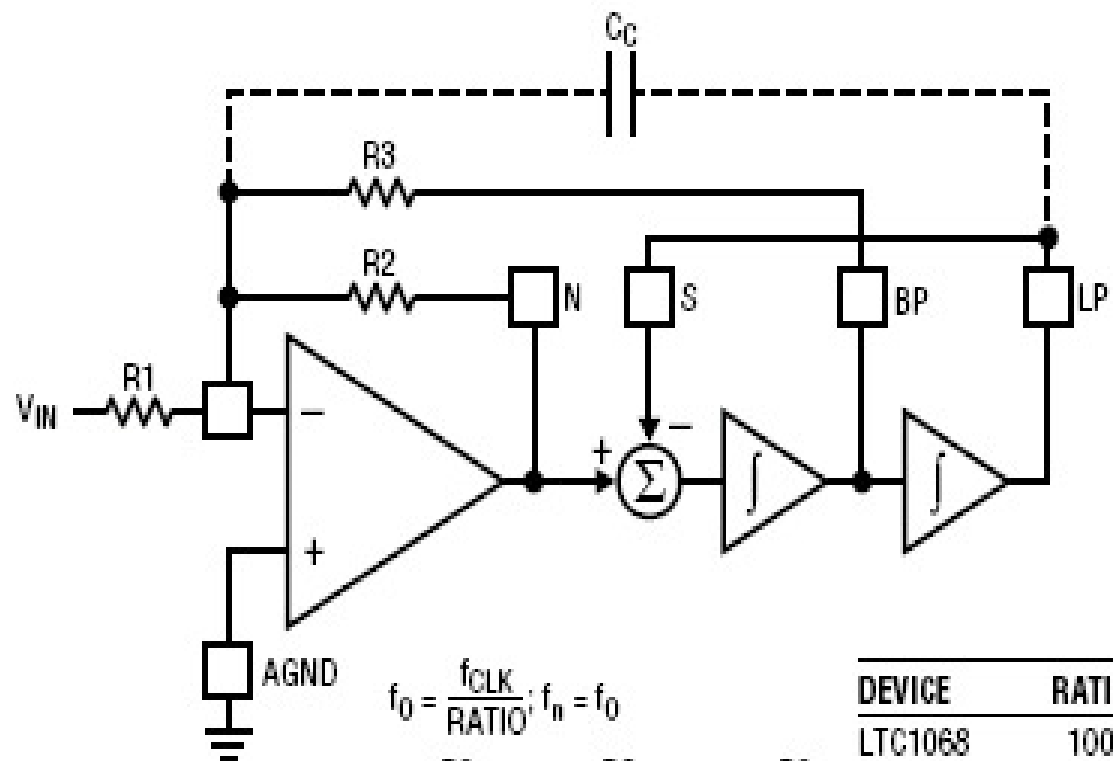
## Les divers types de filtres RC-actif intégrés

Le type le plus commun de filtre RC-actif intégré est le filtre à commutation de capacités d'usage général qui se présente sous la forme de circuits de 2 ou 4 cellules élémentaires du 2ème ordre. C'est le type de filtre le plus utilisé et distribué par les 3 principaux fabricants de filtres intégrés: National Semiconductor, Linear Technology et Maxim.

Il est possible d'intégrer également dans le circuit les résistances de programmation des fonctions de filtrage. Le filtre est alors réduit à un seul circuit intégré de caractéristiques immuables, exceptée la fréquence de coupure fixée par une horloge qui est parfois elle même intégrée au circuit. Ce type de filtres généralement Passe - Bas anti-repliement n'est proposé que par Linear Technology et Maxim.

Malgré des avantages évidents, les filtres à commutation de capacités ont des défauts, surtout en terme de dynamique et de distorsion, inhérents au fait que l'horloge échantillonne le signal qui les traverse. Pour y remédier, Linear Technology et Maxim proposent des filtres intégrés sans commutation (continuous time) dans lesquels tous les paramètres du filtre, fréquence de coupure comprise, sont configurables au moyen de résistances extérieures ou même intérieures au circuit.

**Schéma d'une cellule du 2ème ordre d'un filtre intégré à variable d'état configurée en mode 1 qui permet de réaliser les fonctions Passe - Bas, Passe – Bande et réjecteur (Notch).**



$$f_0 = \frac{f_{CLK}}{RATIO}; f_n = f_0$$

$$Q = \frac{R3}{R2}; H_{ON} = -\frac{R2}{R1}; H_{OBP} = -\frac{R3}{R1}$$

$$H_{OLP} = H_{ON}$$

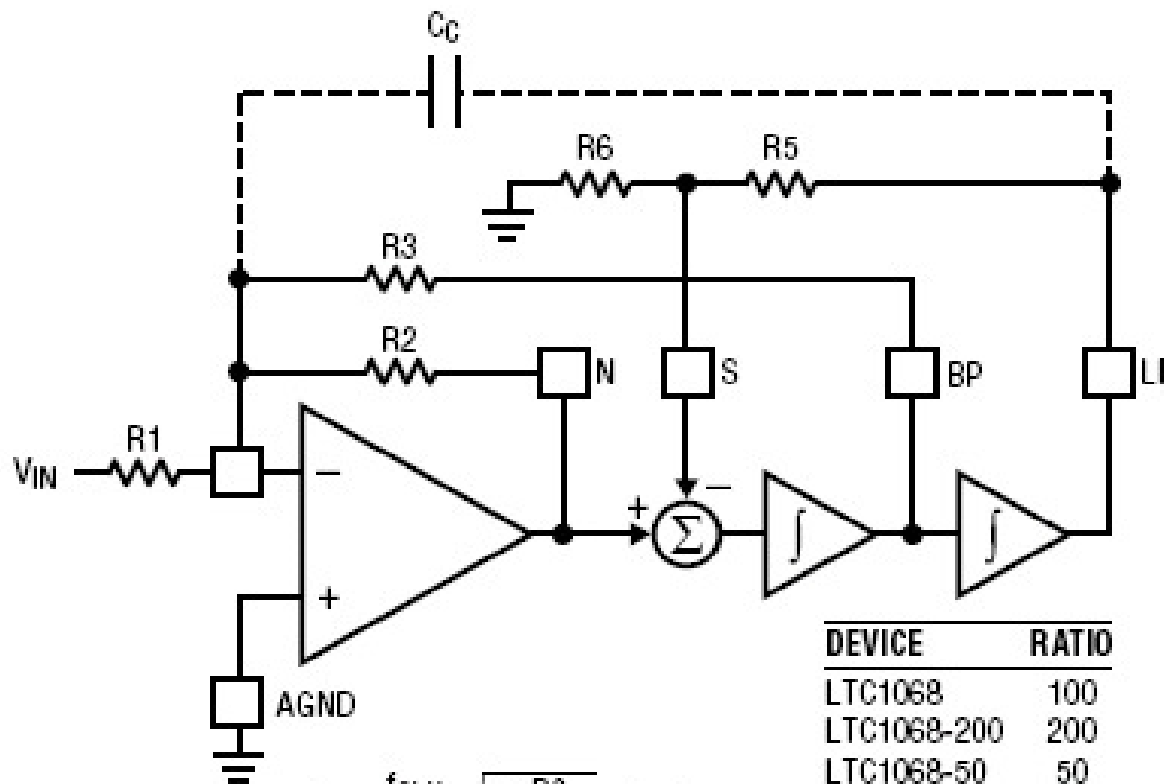
DEVICE	RATIO
LTC1068	100
LTC1068-200	200
LTC1068-50	50
LTC1068-25	25

1068 F04

Le mode 1 est la configuration de câblage la plus simple des cellules à variable d'état, avec 3 résistances seulement. Il permet de faire des filtres d'ordre élevé, et des réjecteurs mais à faible Q (Butterworth).

Le mode 1 monte haut en fréquence.

**Schéma d'une cellule du 2ème ordre d'un filtre intégré à variable d'état configurée mode 1 B qui permet de réaliser les fonctions Passe - Bas, Passe – Bande et réjecteur (Notch).**



DEVICE	RATIO
LTC1068	100
LTC1068-200	200
LTC1068-50	50
LTC1068-25	25

$$f_0 = \frac{f_{CLK}}{RATIO} \sqrt{\frac{R6}{(R6 + R5)}}; f_n = f_0$$

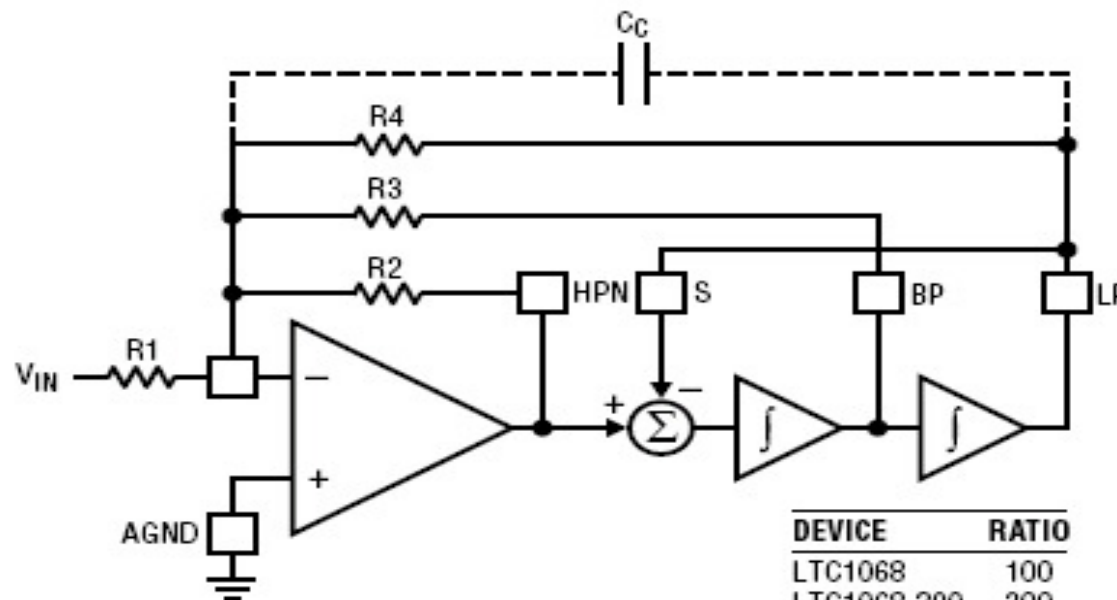
$$Q = \frac{R3}{R2} \sqrt{\frac{R6}{(R6 + R5)}}; H_{ON} = -\frac{R2}{R1}; H_{OBP} = -\frac{R3}{R1}$$

$$H_{OLP} = -\frac{R2}{R1} \left( \frac{R6 + R5}{R6} \right)$$

1068 R05

Le mode 1 B est une configuration de mode 1 améliorée pour atteindre un facteur de qualité Q plus élevé mais au prix de 2 résistances supplémentaires.

Schéma d'une cellule du 2ème ordre d'un filtre intégré à variable d'état configurée en mode 2, qui permet de réaliser les fonctions Passe - Bas, Passe - Haut, Passe - Bande et réjecteur (Notch).



DEVICE	RATIO
LTC1068	100
LTC1068-200	200
LTC1068-50	50
LTC1068-25	25

1068 F07

$$f_0 = \frac{f_{CLK}}{RATIO} \sqrt{1 + \frac{R2}{R4}}; f_n = \frac{f_{CLK}}{RATIO}$$

$$Q = 1.005 \left( \frac{R3}{R2} \right) \sqrt{1 + \frac{R2}{R4}} \left[ \frac{1}{\left( 1 - \frac{R3}{(RATIO)(0.32)(R4)} \right)} \right]$$

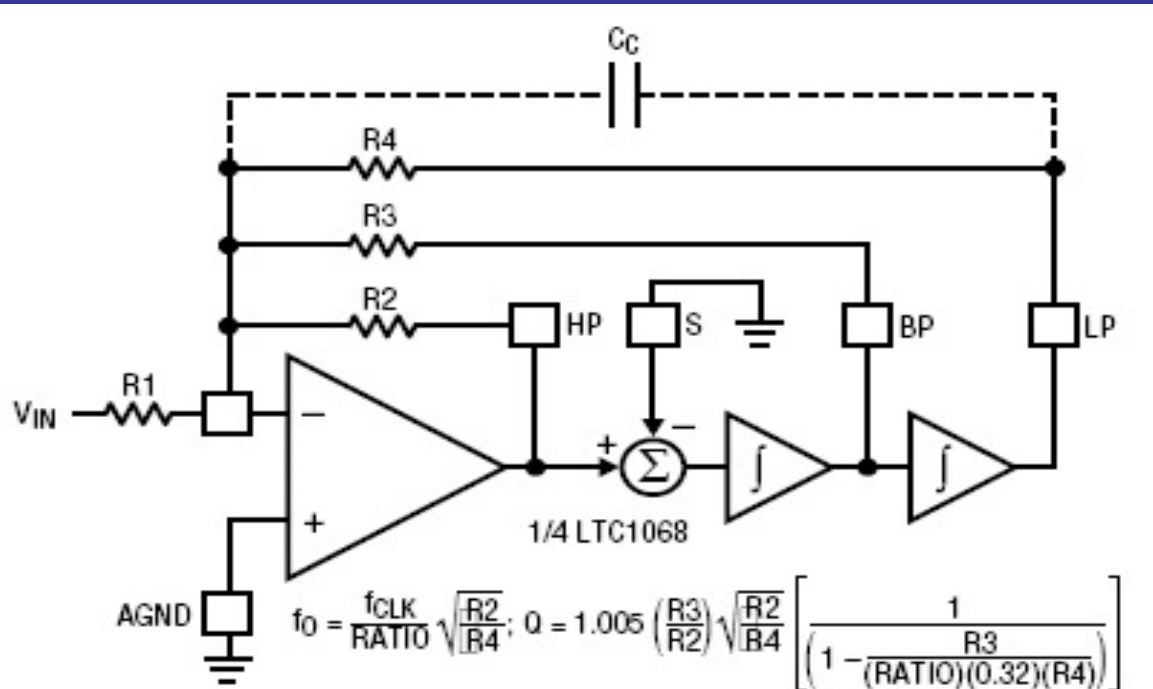
$$H_{OHPN} = -\frac{R2}{R1} \quad (\text{AC GAIN, } f \gg f_0); H_{OHPN} = -\frac{R2}{R1} \left[ \frac{1}{\left( 1 + \frac{R2}{R4} \right)} \right] \quad (\text{DC GAIN})$$

$$H_{OBP} = -\frac{R3}{R1} \left[ \frac{1}{\left( 1 - \frac{R3}{(RATIO)(0.32)(R4)} \right)} \right]; H_{OLP} = -\frac{R2}{R1} \left[ \frac{1}{\left( 1 + \frac{R2}{R4} \right)} \right]$$

Le mode 2 est une combinaison du mode 1 et du mode 3. Il a la sensibilité à la dispersion des valeurs de résistances la plus faible de tous les modes.

Il dispose d'une sortie Passe - Haut .

## Schéma d'une cellule du 2ème ordre d'un filtre intégré à variable d'état configurée en mode 3 qui permet de réaliser les fonctions Passe - Bas, Passe - Haut et Passe - Bande



$$f_0 = \frac{f_{CLK}}{RATIO} \sqrt{\frac{R2}{R4}}; Q = 1.005 \left( \frac{R3}{R2} \right) \sqrt{\frac{R2}{R4}} \left[ \frac{1}{\left( 1 - \frac{R3}{(RATIO)(0.32)(R4)} \right)} \right]$$

$$H_{OHP} = -\frac{R2}{R1}; H_{OBP} = -\frac{R3}{R1} \left[ \frac{1}{\left( 1 - \frac{R3}{(RATIO)(0.32)(R4)} \right)} \right]; H_{OLP} = -\frac{R4}{R1}$$

DEVICE	RATIO
LTC1068	100
LTC1068-200	200
LTC1068-50	50
LTC1068-25	25

1068F05

Le mode 3 est la configuration de câblage la plus classique des cellules à variable d'état. Il permet de faire des filtres d'ordre élevé.

Il ne monte pas aussi haut en fréquence que le mode 1

## Les principaux filtres RC-actifs intégrés

Après une vague de développement tout azimuts par les fabricants de circuits dans les années 80, les filtres RC-actifs intégrés ne sont plus produits que par:

-National Semiconductor, [www.national.com](http://www.national.com)

Propose une gamme réduite aux LM10 et LMF100 qui sont des filtres universels.

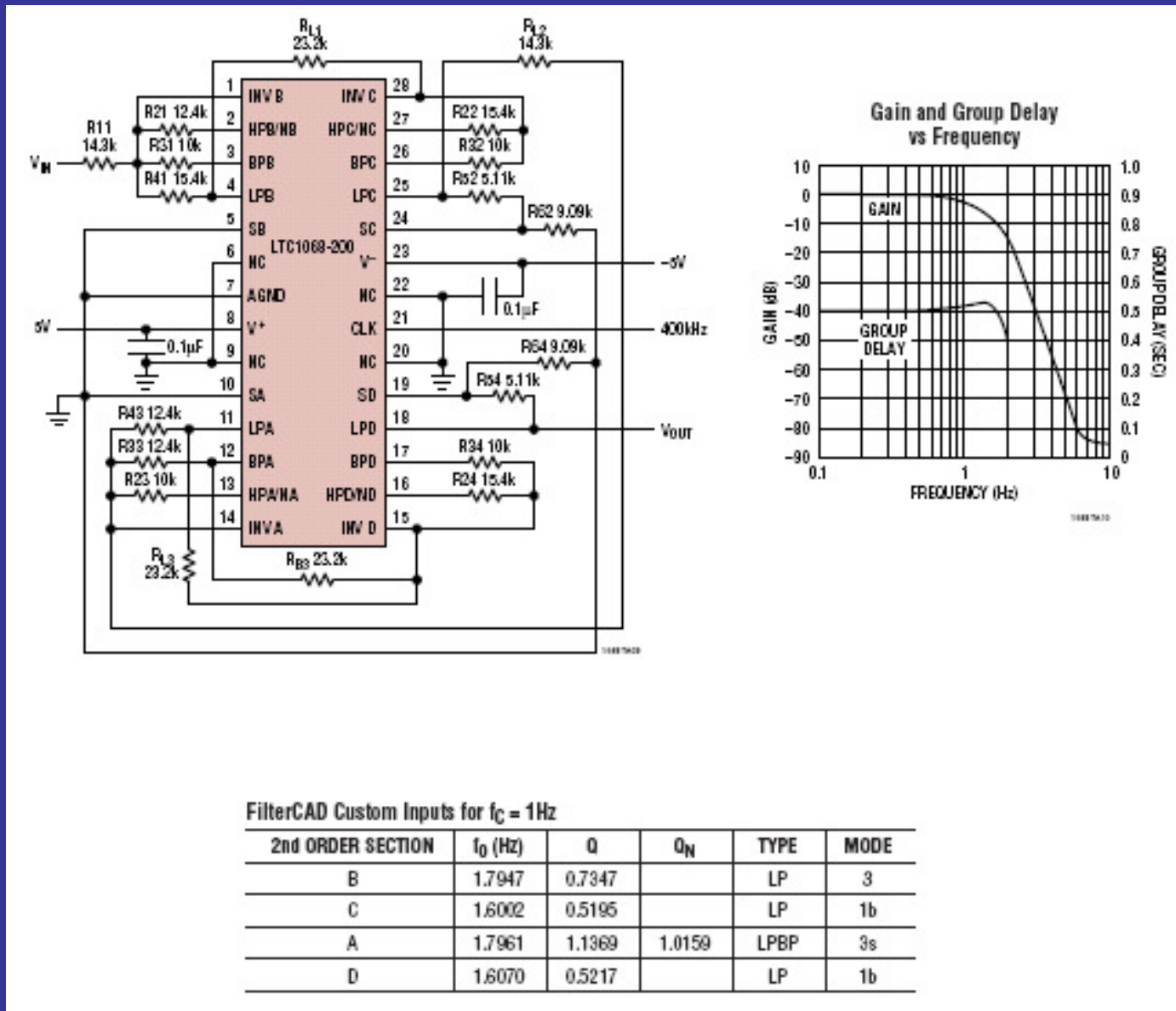
-Linear Technology, [www.linear.com](http://www.linear.com)

Propose une gamme importante: 15 filtres universels de 2 à 5 cellules (avec les séries LTC1060 et 1560), 29 filtres Passe – Bas cablés pour les fonctions classiques (avec les séries LTC6600, 1164), et quelques circuits non commutés (LTC1563-2)

-- Maxim, [www.maxim-ic.com](http://www.maxim-ic.com)

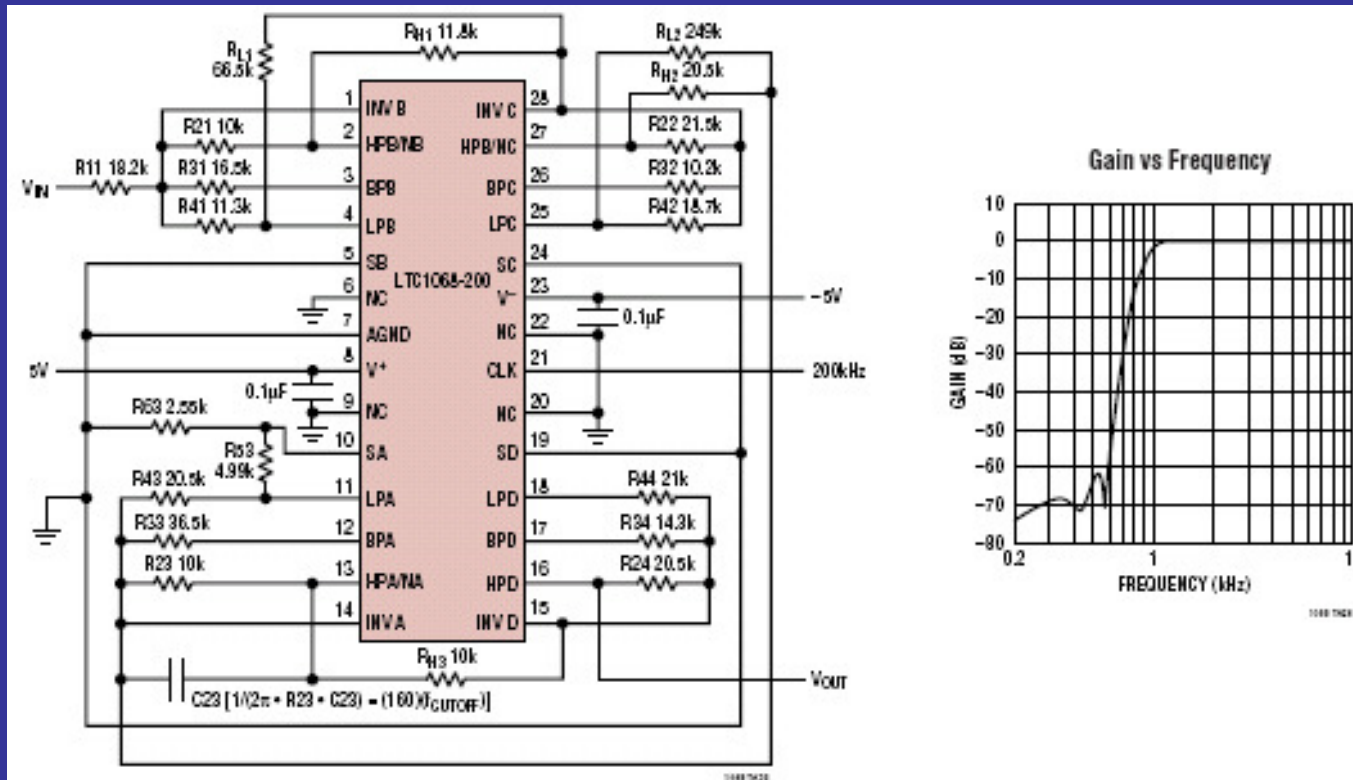
Propose une gamme aussi importante: 12 filtres universels de 2 à 5 cellules (avec les séries MAX260, 7490), 37 filtres Passe – Bas cablés pour les fonctions classiques (avec les séries MAX7420, 7410), et quelques circuits non commutés (MAX275)

# Exemple de réalisation avec un circuit LTC1068 de Linear Technology d'un filtre Passe – Bas à phase linéaire du 8ème ordre à $f_c = 1\text{Hz}$ .





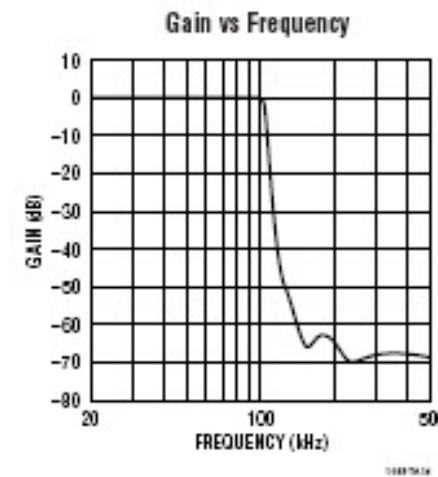
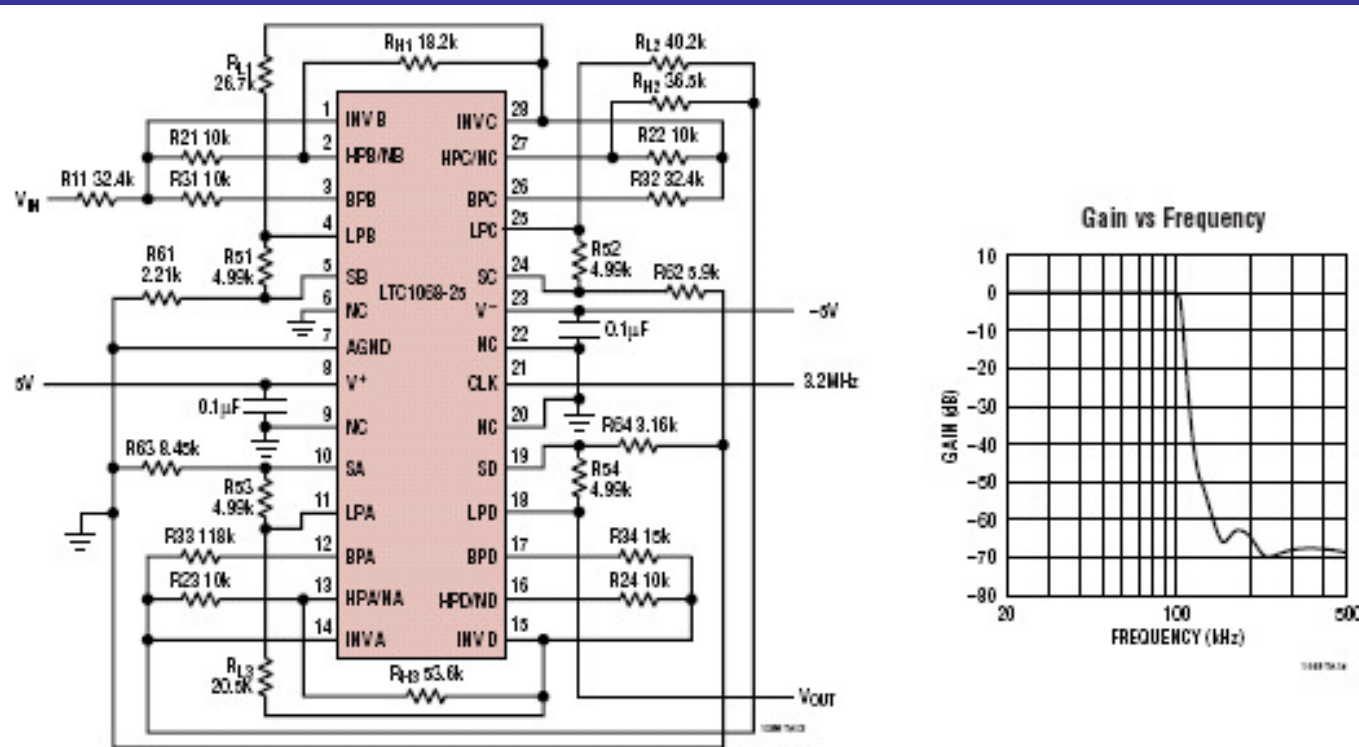
Exemple de réalisation avec un circuit LTC1068 de Linear Technology d'un filtre Passe – Haut de Cauer (elliptique) du 8ème ordre à  $F_c = 1\text{kHz}$ . La chute par octave de l'atténuation est supérieure à 80 dB.



FilterCAD Custom Inputs for  $f_c = 1\text{kHz}$

2nd ORDER SECTION	$f_0$ (kHz)	Q	$f_N$ (kHz)	TYPE	MODE
B	0.9407	1.5964	0.4212	HPN	3a
C	1.0723	0.5156	0.2869	HPN	3a
A	0.9088	3.4293	0.5815	HPN	2b
D	0.9880	0.7001	0.0000	HP	3

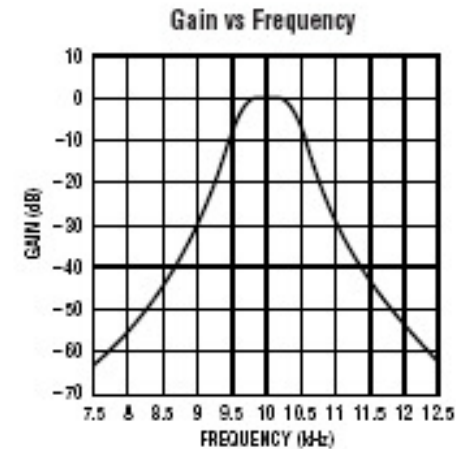
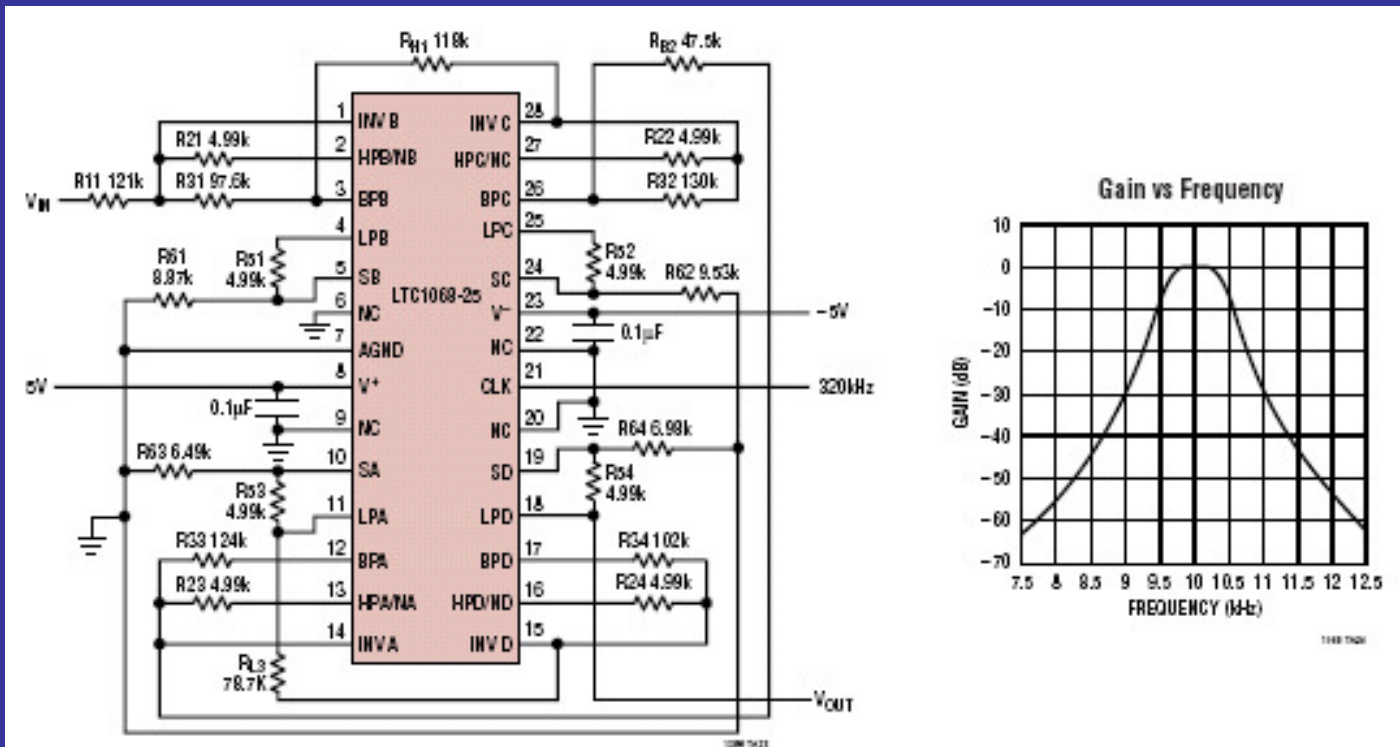
Exemple de réalisation avec un circuit LTC1068 de Linear Technology d'un filtre Passe – Baut de Cauer (elliptique) du 8ème ordre à  $F_c = 100\text{kHz}$ . La chute par octave de l'atténuation est supérieure à 80 dB



FilterCAD Custom Inputs for  $f_c = 100\text{kHz}$

2nd ORDER SECTION	$f_0$ (kHz)	Q	$f_N$ (kHz)	TYPE	MODE
B	70.9153	0.5540	127.2678	LPN	1bn
C	94.2154	2.3848	154.1187	LPN	1bn
A	101.4936	9.3564	230.5192	LPN	1bn
D	79.7030	0.9340		LP	1b

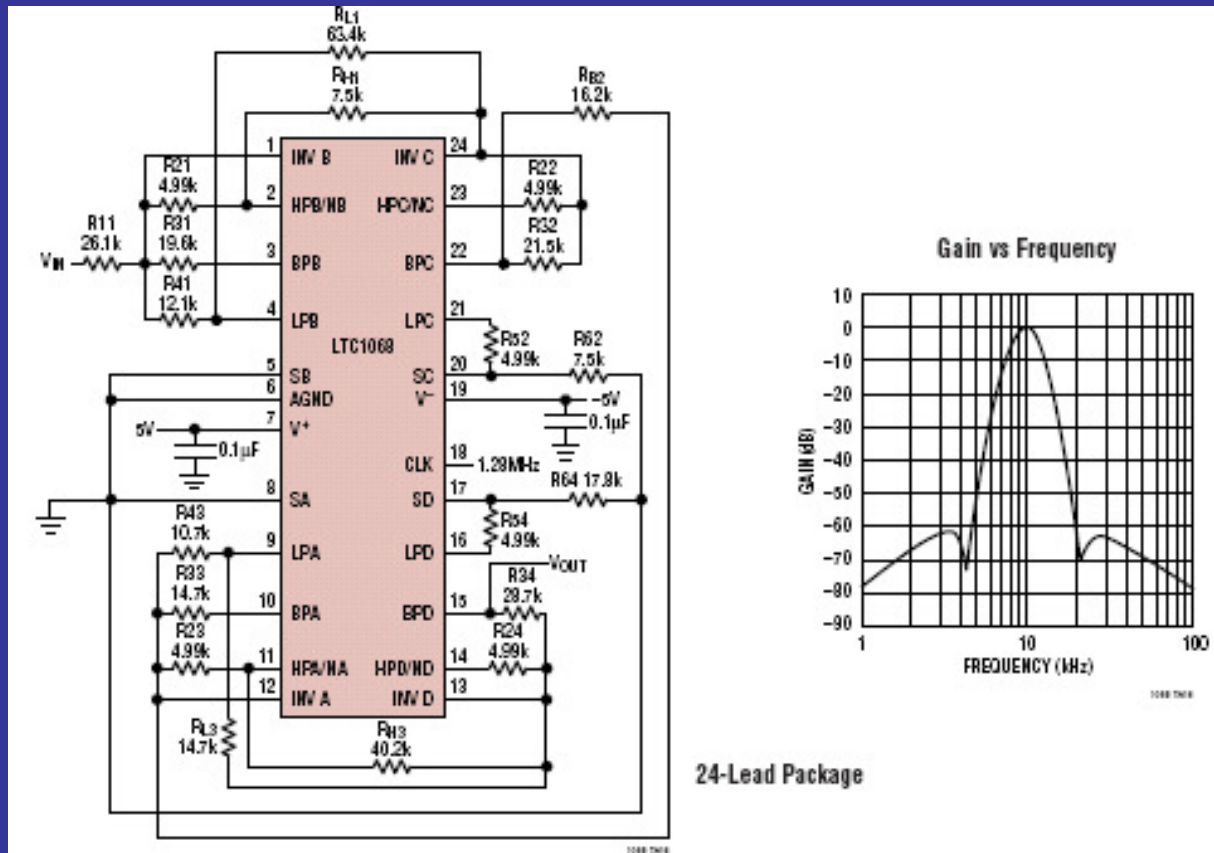
Exemple de réalisation avec un circuit LTC1068 de Linear Technology d'un filtre Passe – Bande du 8ème ordre à 10kHz. La largeur de bande à -3 dB est de 700 Hz. La chute par octave de l'atténuation est supérieure à 80 dB



FilterCAD Custom Inputs for  $f_c = 10\text{kHz}$

2nd ORDER SECTION	$f_0$ (kHz)	Q	TYPE	MODE
B	10.2398	15.6469	BP	1b
C	10.3699	21.1060	BP	1b
A	9.6241	18.6841	LP	1b
D	9.7744	15.6092	LP	1b

Exemple de réalisation avec un circuit LTC1068 de Linear Technology d'un filtre Passe – Bande à phase linéaire du 8ème ordre à 10kHz. La chute par octave de l'atténuation est de 70 dB.

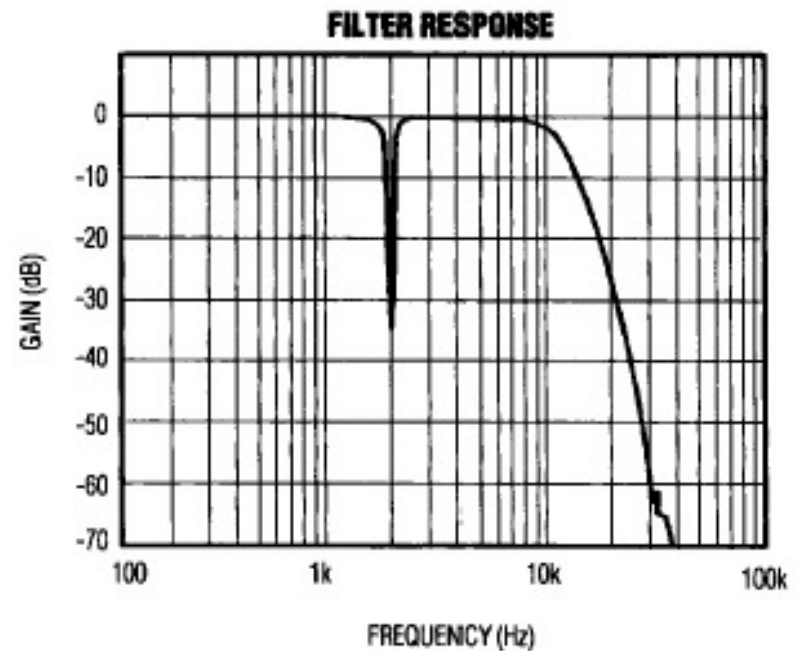
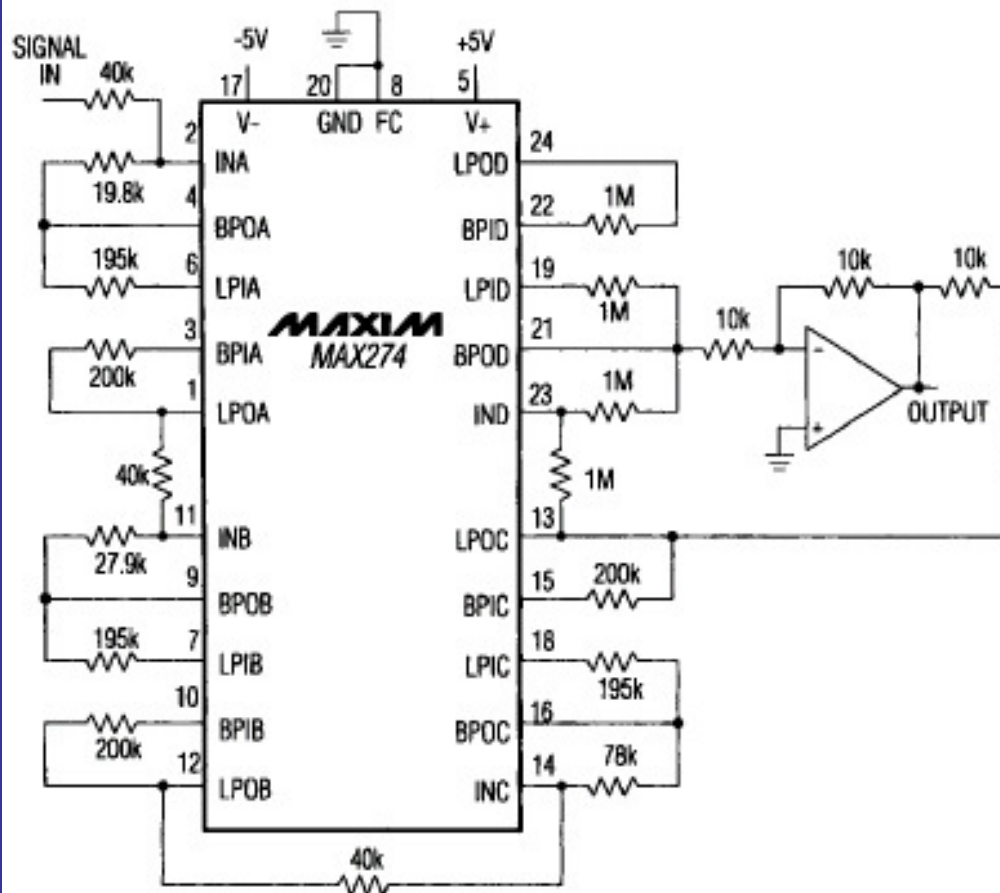


24-Lead Package

FilterCAD Custom Inputs for  $f_c = 10\text{kHz}$

2nd ORDER SECTION	$f_0$ (kHz)	Q	$f_H$ (kHz)	TYPE	MODE
B	8.2199	2.6702	4.4025	HPN	3a
C	9.9188	3.3388		BP	1b
A	8.7411	2.1125	21.1672	LPN	3a
D	11.3122	5.0830		BP	1b

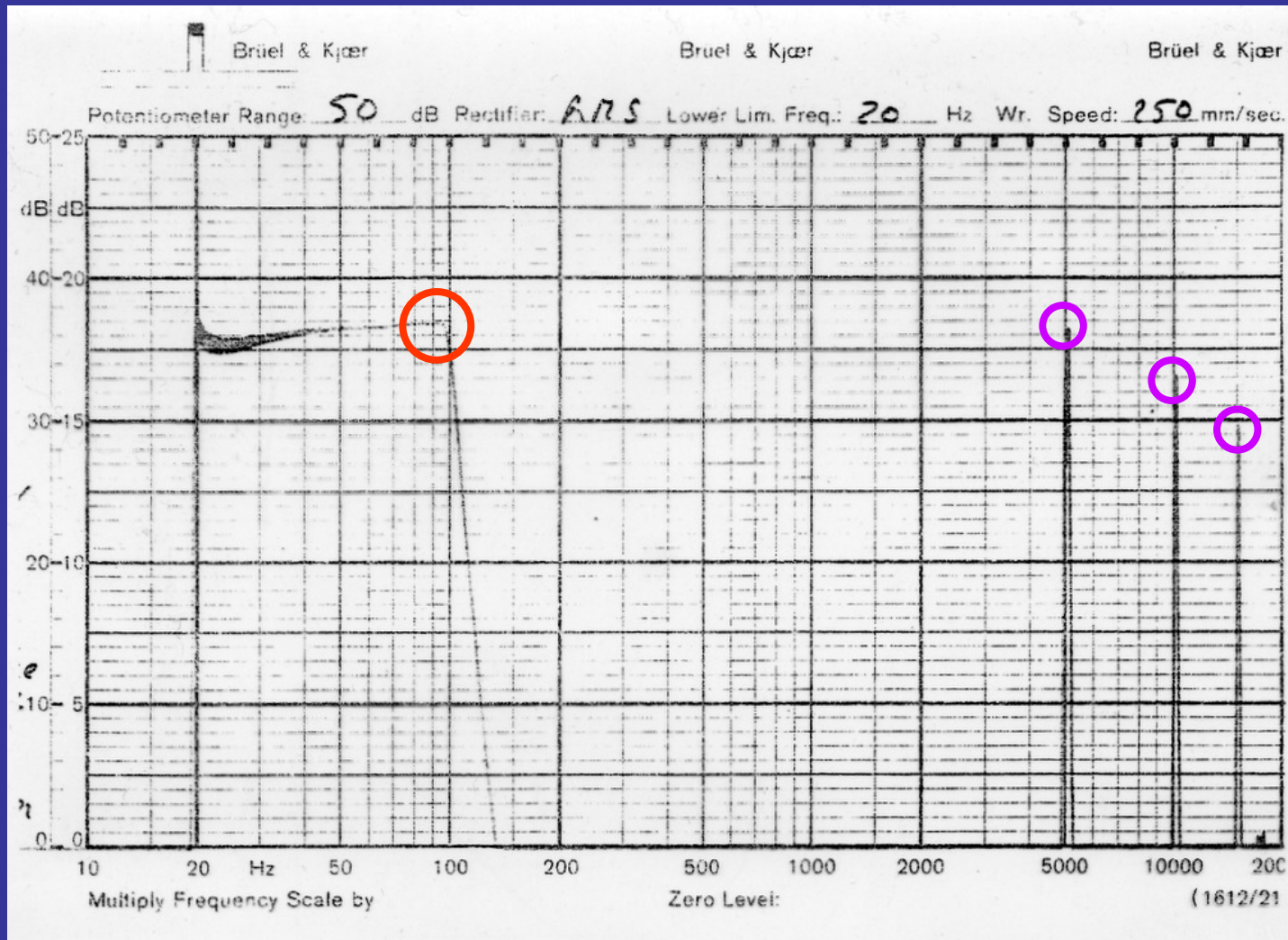
Exemple de réalisation avec un circuit MAX274 de Maxim d'un filtre Passe – Bas non commuté de Butterworth du 6ème ordre à  $F_c = 10\text{kHz}$ , associé à un filtre réjecteur (Notch) à  $F_c 2\text{kHz}$ .



## Avantages et inconvénients des filtres intégrés à capacités commutées

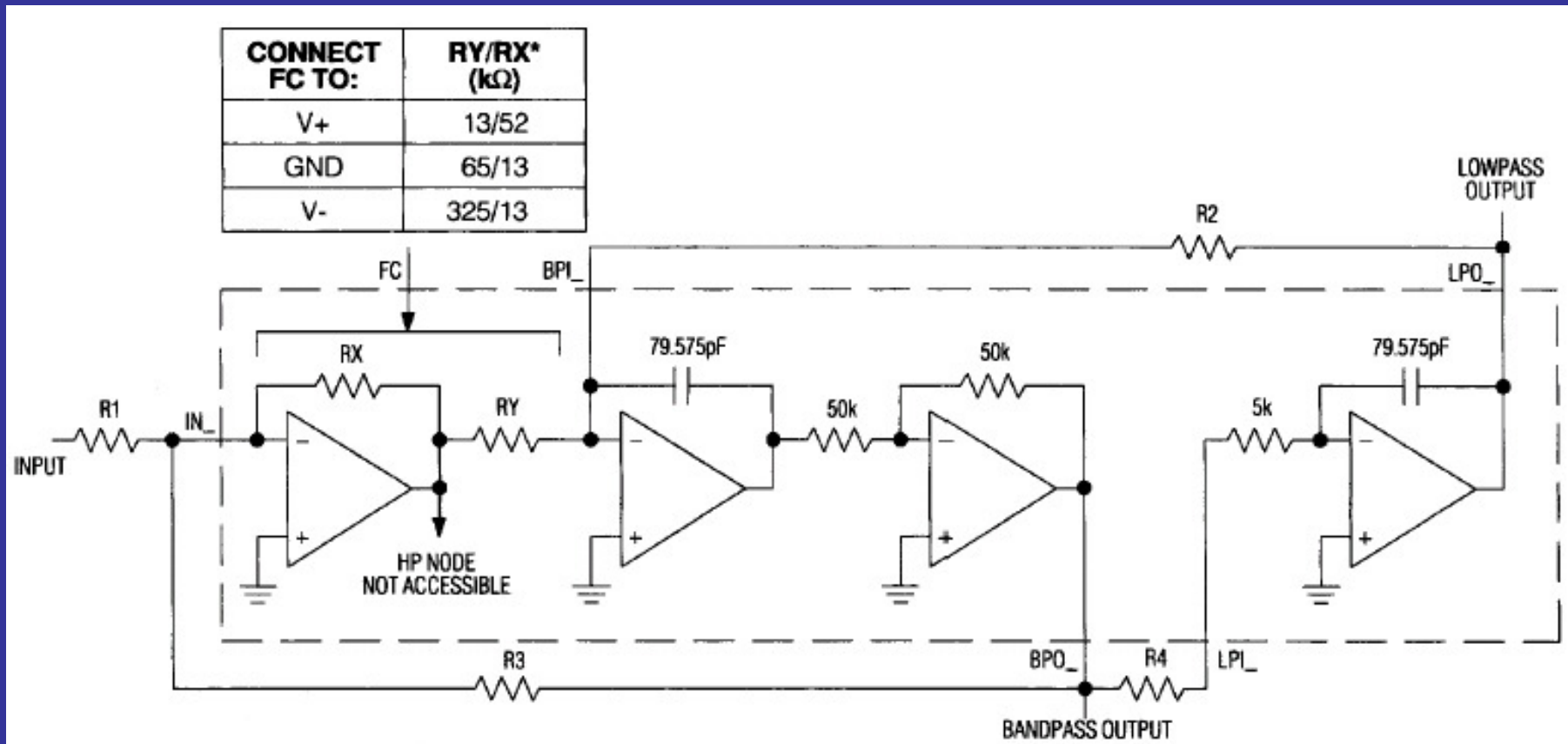
- Grâce à ses multiples modes de configuration et sa programmation versatile, la cellule de base à variable d'état permet de synthétiser la quasi-totalité des fonctions de filtrage.
- Des filtres cablés très simples sont proposés par les constructeurs pour les fonctions Passe – Bas les plus utilisées.
- Ils sont économiques et d'un très faible encombrement.
- On peut faire varier facilement leur fréquence de coupure.
- Leur signal étant échantillonné par l'horloge, il est souvent nécessaire de les faire précéder par un filtrage anti repliement (fonction du spectre du signal d'entrée en rapport avec la fréquence de l'horloge). Il est en revanche absolument nécessaire de les faire suivre par un filtre de lissage pour éliminer l'horloge présente dans le signal de sortie. Ceci complique la belle simplicité du circuit initial.
- Malgré des progrès continus, ces circuits sont toujours plus fragiles que les autres composants actifs. Ils nécessitent des précautions strictes pour leur mise en œuvre particulièrement au niveau des alimentations.
- Malgré l'application pointilleuse des recommandations des constructeurs et tous les soins possibles dans leur implantation, les filtres à capacités commutées restent plus bruyants et ont plus de distorsion que leurs homologues « statiques » et n'atteignent jamais les caractéristiques données par les constructeurs.

Mise en évidence de la superposition du signal de l'horloge avec celui traversant un filtre Passe - Bas à capacités commutées du 8ème ordre à  $F_c = 100$  Hz. La fréquence de l'horloge est de  $F_c \times 50$  soit 5 kHz et ses deux harmoniques à 10 et 15 kHz.. Il est nécessaire de supprimer ces composantes au moyen d'un filtre Passe – Bas de lissage.



## Schéma du filtre intégré non commuté (continuous time) **MAX274** de MAXIM.

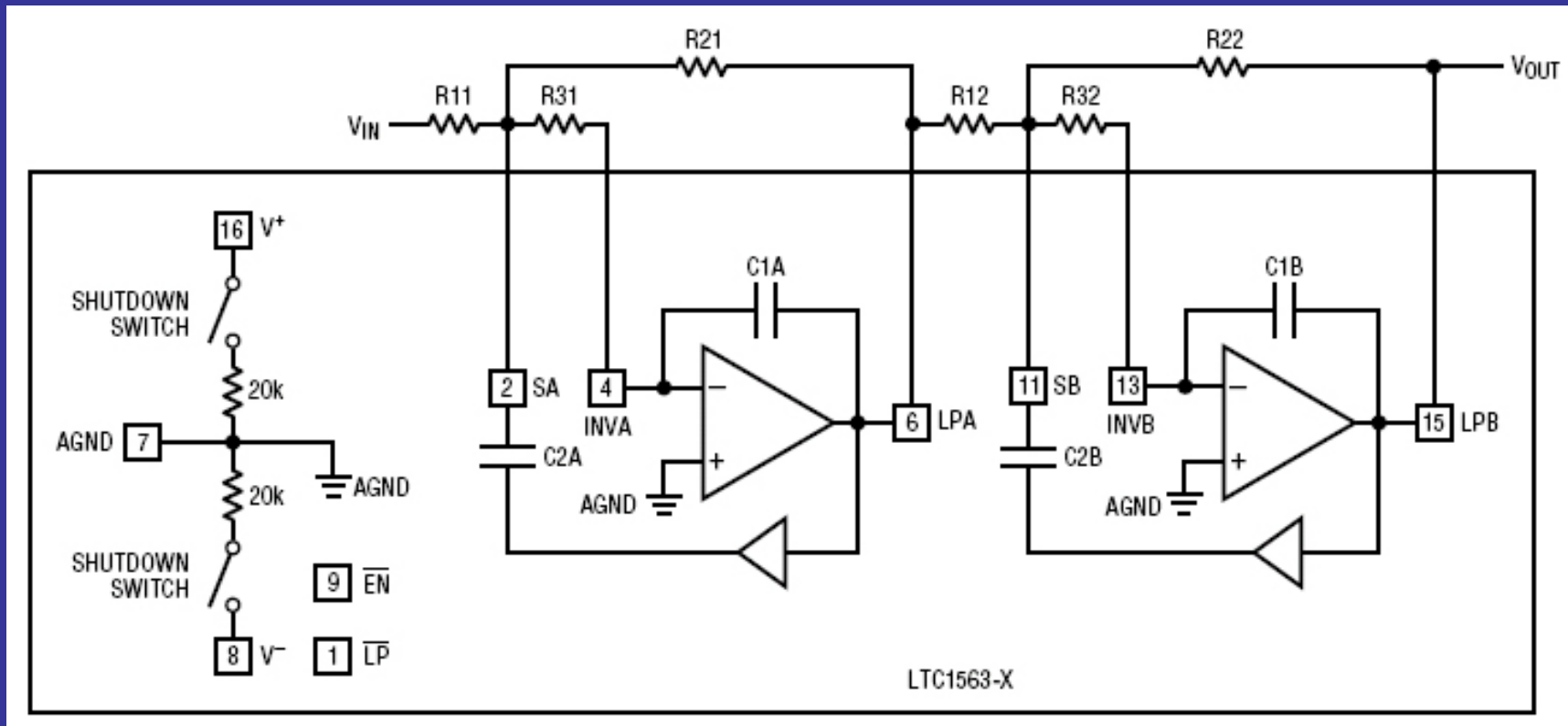
Ce circuit est programmé avec 4 résistances par cellule du 2ème ordre. Il peut être configuré dans toutes les fonctions d'approximation classiques, en Passe – Bas et Passe – Bande. Sa gamme de fréquence de coupure s'étend de 250Hz à 150kHz. Dans les meilleures conditions d'utilisation, sa dynamique est de presque 90 dB.





## Schéma du filtre intégré non commuté (continuous time) **LTC1563** de Linear Technology.

Ce circuit a pour avantage d'être programmé avec seulement 3 résistances par cellule du 2ème ordre, grâce à une structure propre à Linear Technology. Il peut être configuré dans toutes les fonctions d'approximation classiques et sa gamme de fréquence de coupure s'étend de 256Hz à 256kHz. Dans les meilleures conditions d'utilisation, sa dynamique est de l'ordre de 90 dB.



# Les logiciels de développement de filtre RC-actifs

Il existe sur le marché de la CAO plusieurs grands logiciels contenant des applications dédiées plus particulièrement au développements de toutes sortes de filtres, très professionnels mais très onéreux. Nous ne présentons que quelques logiciels gratuits, proposés par des fabricants de circuits ou de prix modique.

- *Filter CAD* de Linear Technology . A télécharger sur: [www.linear.com](http://www.linear.com)

Ergonomique, pratique, complet mais...réduit aux circuits intégrés commutés ou non de la marque.

- *MAX274 Design Software* de Maxim . A télécharger sur: [www.maxim-ic.com](http://www.maxim-ic.com)

Tout l'opposé du précédent et réduit à...un seul composant.

- *Webench Active Filter Designer* de National Semiconductor . Ne se télécharge pas, s'utilise en ligne sur le site: [www.national.com](http://www.national.com)

Interactif avec démo et commentaires très bien faits, assez complet, s'applique aux filtres RC-actifs classiques.

-*Filter-PRO* de Texas Instruments d'origine Burr-Brown. A télécharger sur: [www.ti.com](http://www.ti.com)

Très facile à utiliser, très complet et pratique, c'est la petite merveille des structures qu'il connaît; Sallen et Key et les contre réactions multiples.

- *Filter Lab* de Microchip. A télécharger sur: [www.microchip.com](http://www.microchip.com)

Agréable à utiliser, plus réduit que le précédent.

-*FiltersCAD* de Genel International. A télécharger sur: [www.filterscad.com](http://www.filterscad.com)

Logiciel payant (40 €), très diffusé pour l'enseignement, bien fini, mais des manques.

FilterCAD - Filter1

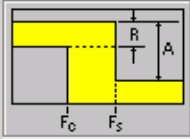
File Edit View Chart Window Help



Filter 1:Enhanced Design

Filter Type

- Lowpass
- Highpass
- Bandpass
- Notch



Amplitudes (c) Passba Passband Ri Stopband A Actual Atter

Response

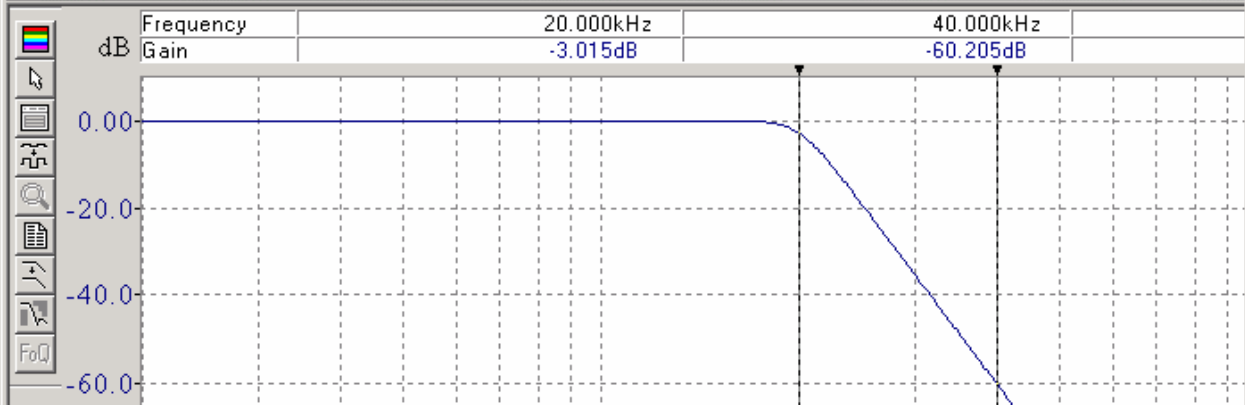
- Butterworth
- Bessel
- Chebyshev
- Elliptic
- Min Q Elliptic
- Custom

Order

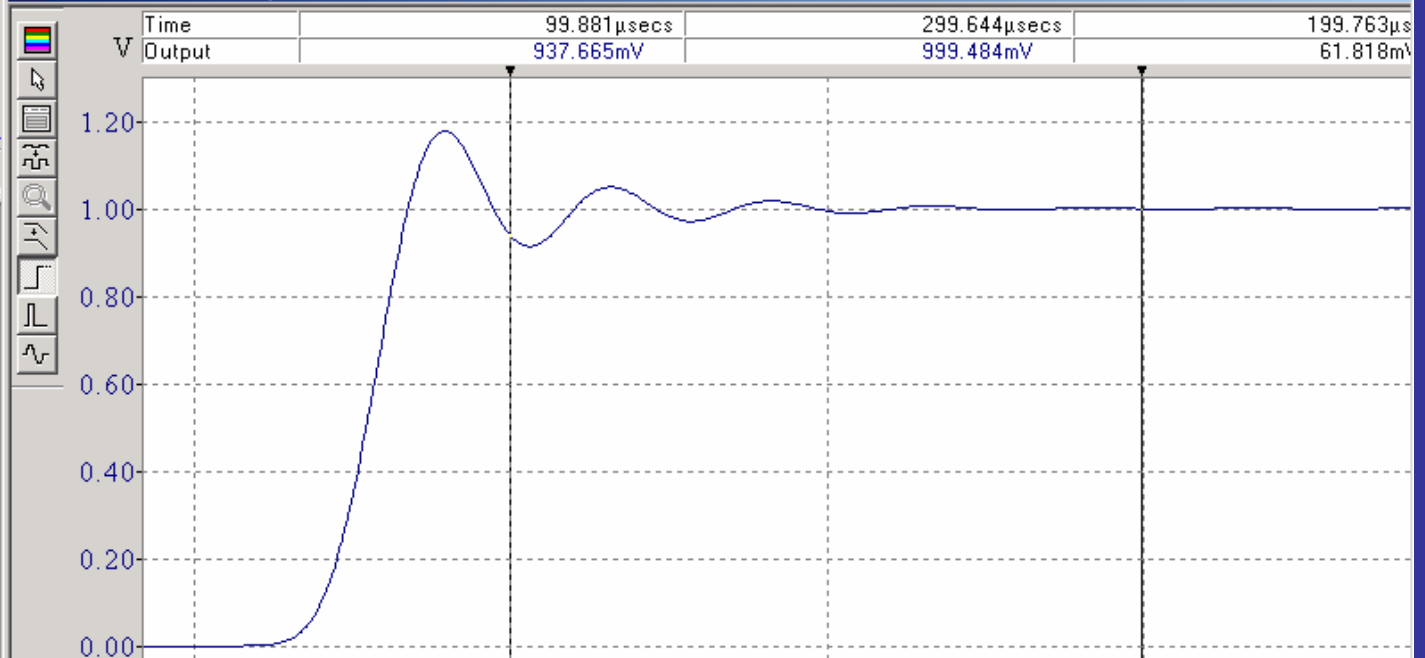
Coefficients

Fo
20.0000
20.0000
20.0000

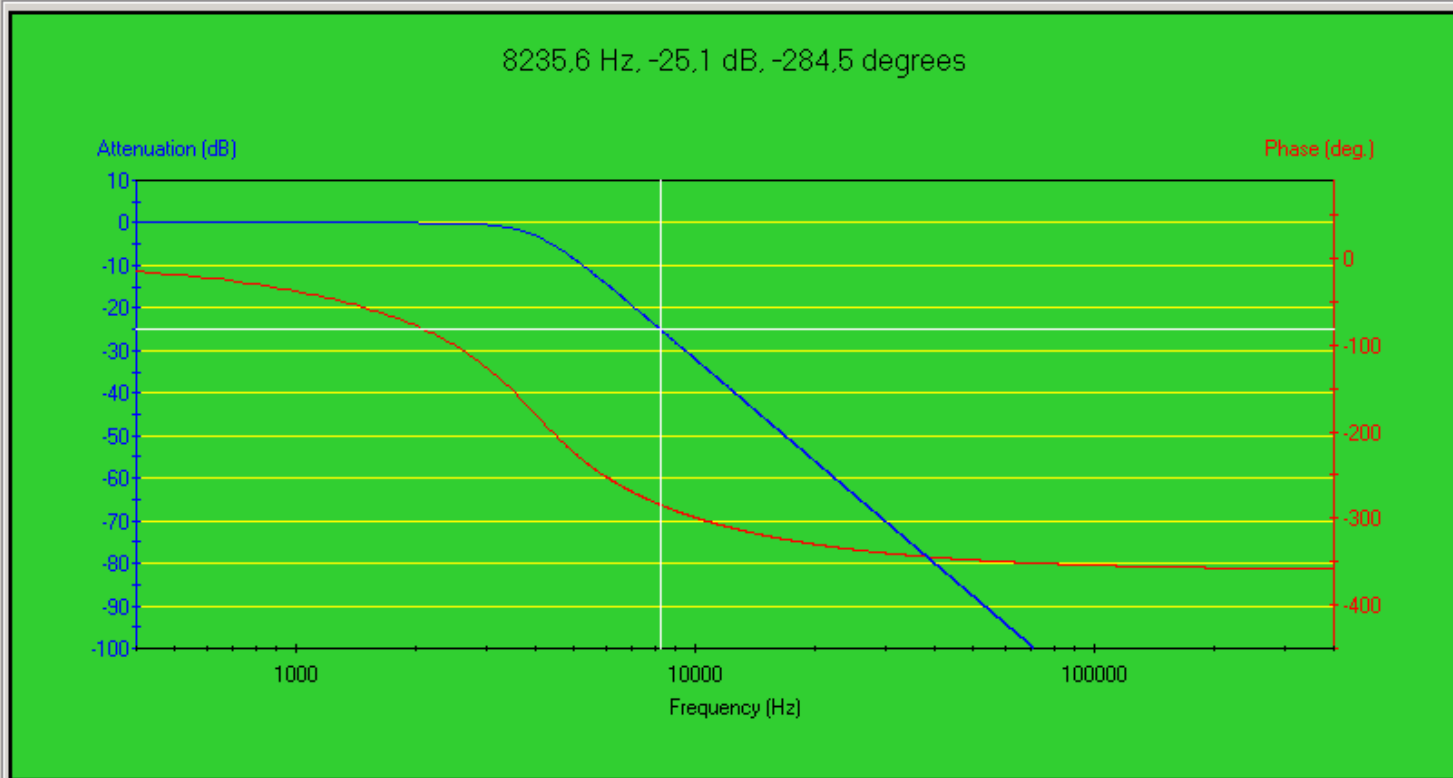
Filter 1:Frequency Response



Filter 1:Time Response



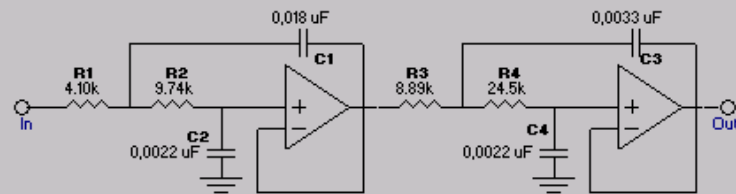
Modified NUM



(c)1999 Microchip Technology, Inc.

Butterworth 4 4000 Hz -3 dB 1 v/v  
Order Cut-off Frequency Ripple Gain

Response Circuit



## Circuit Options

To edit the component values, click on a capacitor value in the circuit above. You may then select a new value from the list, or enter an exact value. Resistor values are calculated based on the capacitors that are chosen. FilterLab will warn you if a value is not within an allowable range. All calculations are based on the approximation method, filter order, and cut-off frequency.

Click here to visit Microchip's website for the MCP60x single supply op-amp data sheet: <http://www.microchip.com>

## Circuit Topology

- Sallen Key  
 Multiple Feedback (MFB)

## Resistor Selection

- Standard 1% Resistors  
 Exact Value

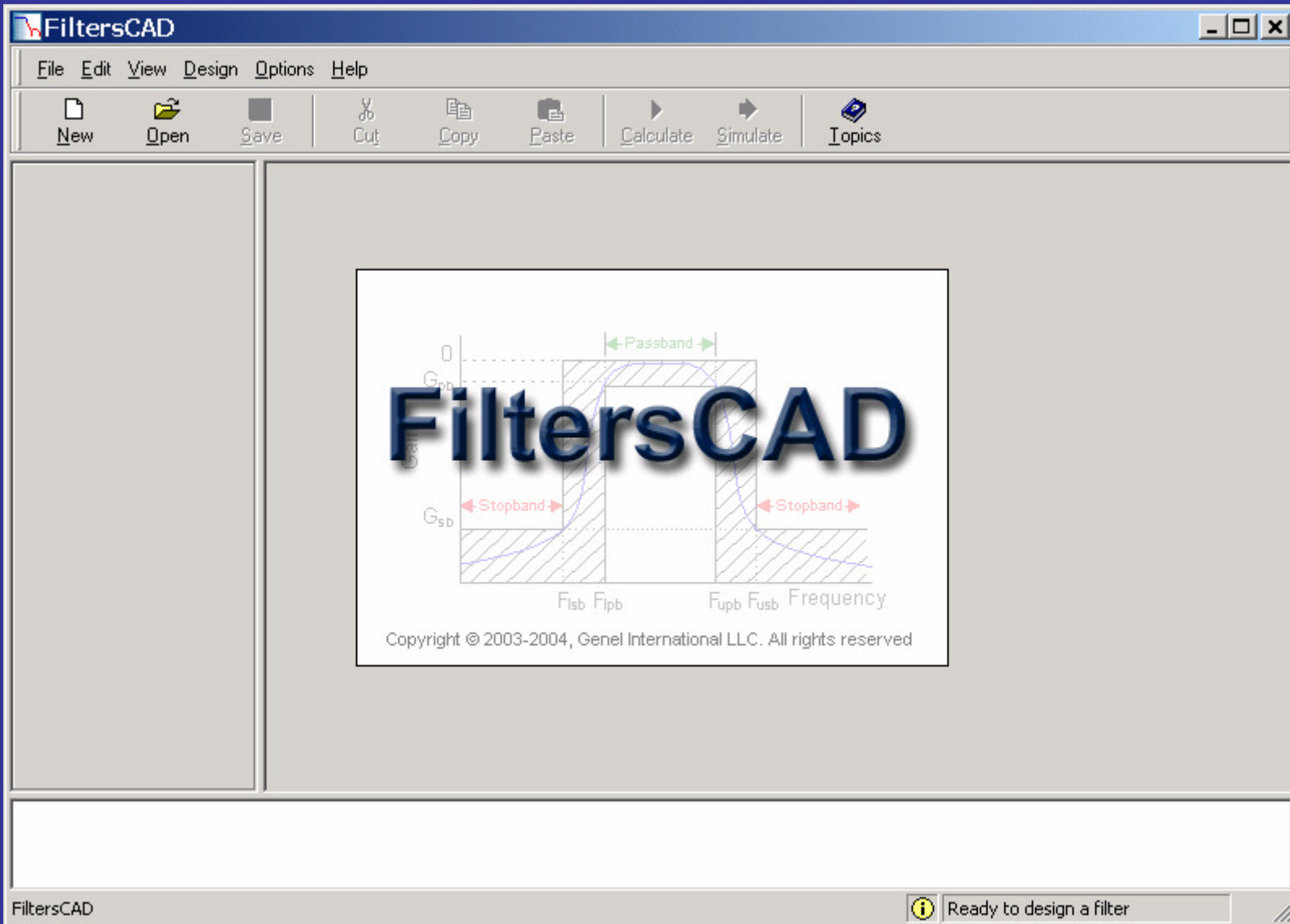
## Capacitor List

0,01 uF  
0,0068 uF  
0,0082 uF  
0,01 uF  
0,015 uF  
0,018 uF  
0,022 uF  
0,033 uF

Reset Components

## Help

 **FilterLab**  
*Low pass*  
MICROCHIP (c)1999 Microchip Technology, Inc.



**FiltersCAD - Untitled**

File Edit View Design Options Help

New Open Save Cut Copy Paste Calculate Simulate Topics

**Design Steps**

- 1 Approximation
- 2 Implementation
- 3 Simulation

### Filter Approximation

**Selectivity**

- Lowpass filter
- Highpass filter
- Bandpass filter
- Bandstop filter

**Approximation**

- Butterworth
- Chebyshev
- Inverse-Chebyshev
- Elliptic (Cauer)

**Frequency specifications**

Fsb - stopband frequency  Hz

Fpb - passband frequency  Hz

**Gain specifications**

Gpb - passband gain  dB

Gsb - stopband gain  dB

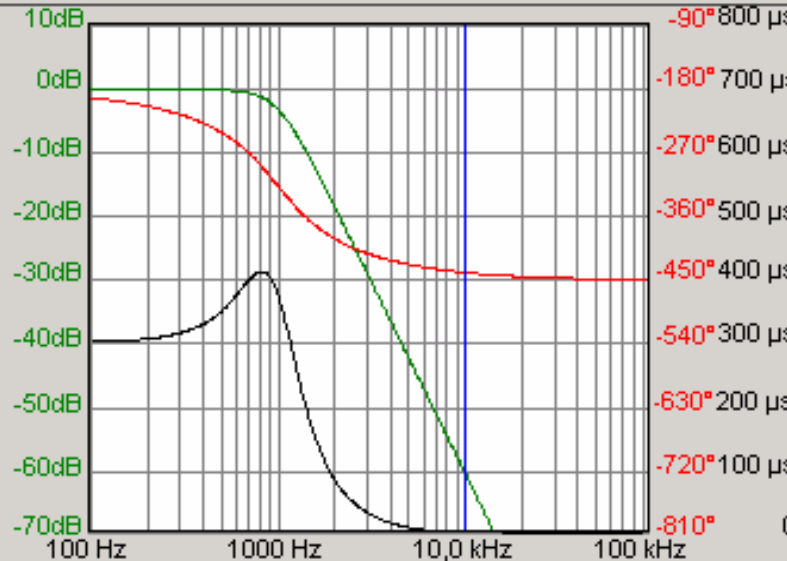
$$H(s) = \frac{\prod_{k=1}^n (a_k \cdot s^2 + b_k \cdot s + c_k)}{\prod_{k=1}^n (d_k \cdot s^2 + e_k \cdot s + f_k)}$$

Creates a new design file Ready to design a filter



Butterworth filters have the flattest possible passband response and a smooth transition into the stopband.

They have moderate pulse-response overshoot which increases with increasing number of poles.



Settings

Fully Differential    Poles:     Ripple:  dB

Circuit Type:  Sallen-Key     MFB    Passband:  Low Pass     High Pass

Cutoff Freq.:  Hz

R1 Seed:  Ohm

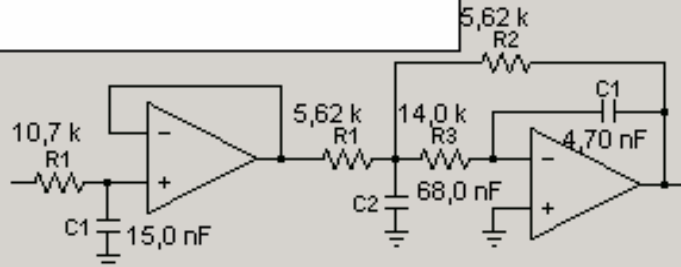
Response Freq.:  Hz

Filter Type:

Value Display:  Component Values     Sensitivities

Components:  Res.     Cap.

Optional Entry	C1	C2	Gain (V/V)
A			
B			
C			
D			
E			
Real			



Real Pole Section

Section A

	Passband Gain (Vout/Vin)	Fn	Response at 10,0 k Hz. Q	Gain	Phase*	Req. GBP
Real	1,0	1,0000		-20,12	-84,3°	50,0
A	1,0	1,0000	1,0000	-39,89	-174,2°	100
	1,0	Totals	1,0000	-60,01	-258,6°	

MFB,3-Pole Low-Pass Butterworth: 1,0 kHz Cutoff, Passband Gain of 1,0

\* Note: Phase response is not corrected 180° for inverting stages.

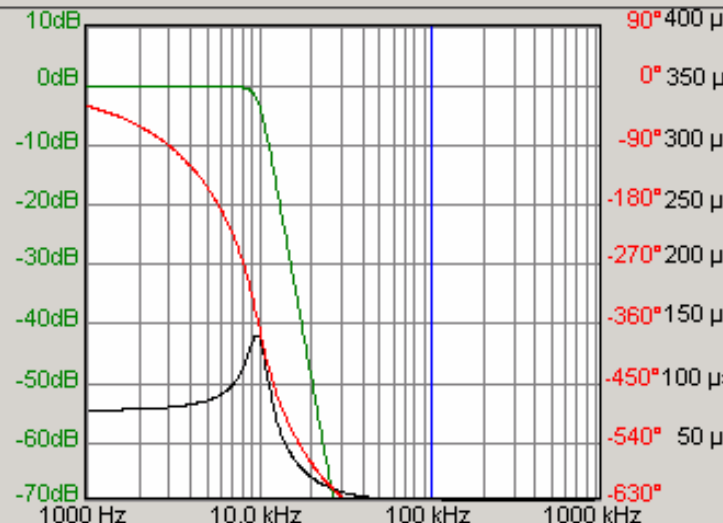


# Texas Instruments FilterPro

File Options View Help



The Sallen-Key topology uses an op amp in a noninverting gain— often as a G=1 buffer. With an op amp used as a G=1 buffer, this filter type provides excellent passband gain accuracy. Sallen-Key filters can be relatively sensitive to component values in high-gain, high-Q sections.



**Settings**

Fully Differential    Poles:     Ripple:  dB

**Circuit Type**

Sallen-Key     Passband Low    Cutoff Freq.:  Hz

MFB     High Pass    R1 Seed:  Ohm

**Filter Type**

Butterworth    Response Freq.:  Hz

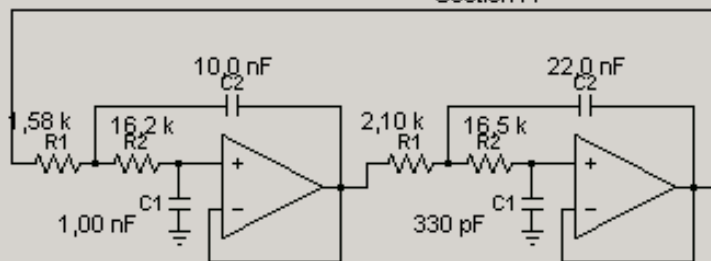
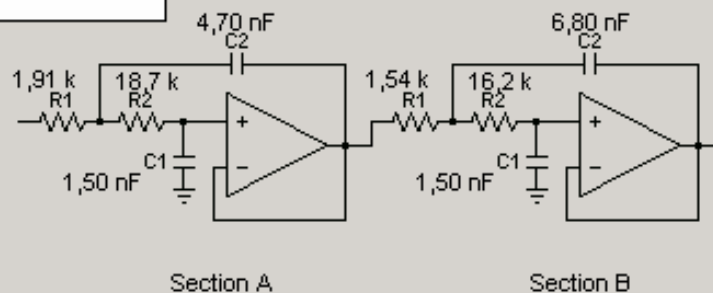
**Value Display**

Component Values     Sensitivities

**Components**

Res.     Cap.

Optional Entry		Gain (V/V)
C1	C2	
A		
B		
C		
D		
E		
Real		



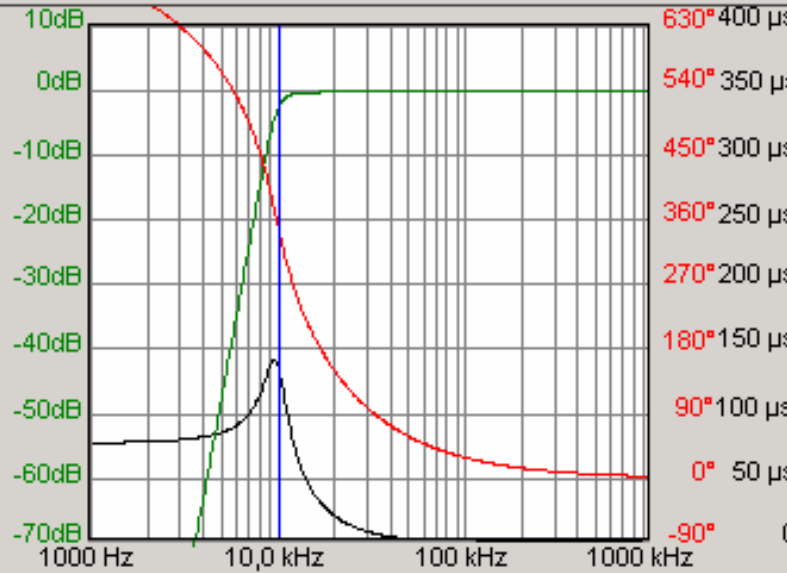
	Passband Gain (Vout/Vin)	Fn	Response at 10,0 k Hz.		Req. GBP
			Q	Gain    Phase*	
A	1	10,000	509,80 m	-5,77 dB    -89,8°	0
B	1	10,000	601,34 m	-4,46 dB    -90,2°	0
C	1	10,000	899,98 m	-0,96 dB    -90,5°	0
D	1	10,000	2,5629	8,27 dB    -89,0°	8,00
	1,0	Totals	707,11 m	-2,92 dB    -359,5°	

Sallen-Key, 8-Pole Low-Pass Butterworth: 10,0 kHz Cutoff, Passband Gain of 1,0

\* Note: Phase response is not corrected 180° for inverting stages.



The high-pass filter is a low-pass filter design transposed around the cutoff frequency. If an MFB circuit is used the filter does not roll off at the frequency limit of the amplifier. Instead, the amplifier is not predictable at those frequencies. If the Sallen-Key circuit is used the response rolls off at the frequency limit of the amplifier. The high-pass filter can be cascaded (followed) with a low-pass filter to form a wide band-pass filter.



Settings

Fully Differential    Poles: 8    Ripple:  dB

Circuit Type:  Sallen-Key     MFB    Passband:  Low Pass     High Pass

Cutoff Freq.: 10,0 k Hz

R1 Seed: 10,0 k Ohm

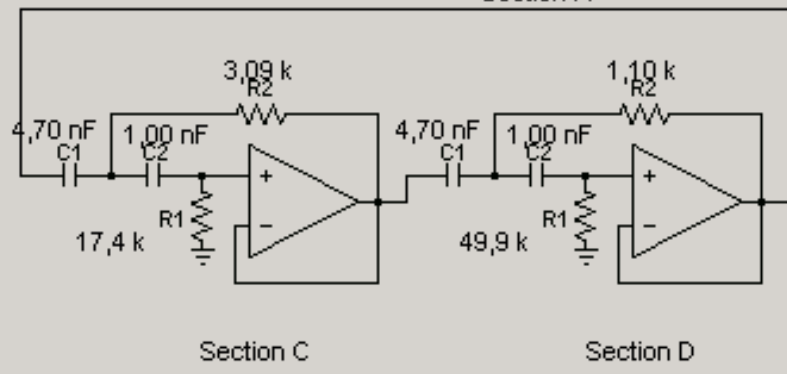
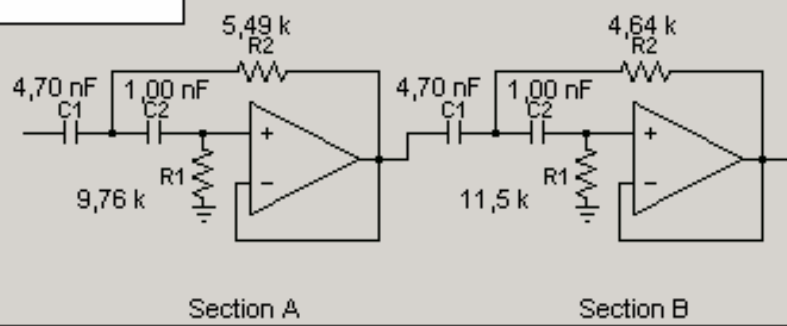
Filter Type: Butterworth

Response Freq.: 10,0 k Hz

Value Display:  Component Values     Sensitivities

Components: E96 Res.    E6 Cap.

Optional Entry	C1	C2	Gain (V/V)
A			
B			
C			
D			
E			
Real			



	Passband Gain (Vout/Vin)	Fn	Response at 10,0 k Hz. Q	Gain	Phase*	Req. GBP
A	1	10,000	509,80 m	-5,92 dB	90,2°	0
B	1	10,000	601,34 m	-4,50 dB	90,3°	0
C	1	10,000	899,98 m	-0,90 dB	90,1°	0
D	1	10,000	2,5629	8,24 dB	87,3°	8,00
1,0	Totals		707,11 m	-3,08 dB	357,9°	

Sallen-Key, 8-Pole High-Pass Butterworth: 10,0 kHz Cutoff, Passband Gain of 1,0

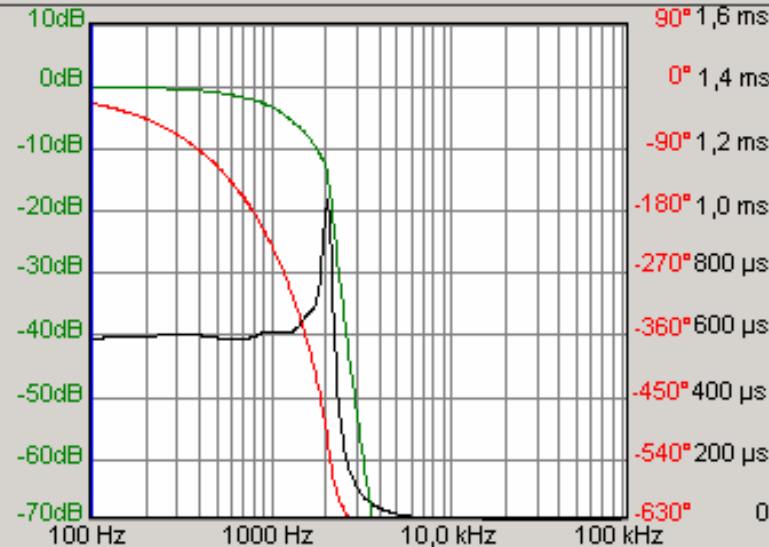
\* Note: Phase response is not corrected 180° for inverting stages.

# Texas Instruments FilterPro

File Options View Help



The low-pass filter is presently selected. If a high-Pass filter is desired then click on the High-Pass check box.



**Settings**

Fully Differential    Poles:     Ripple:  dB

**Circuit Type**

Sallen-Key     Passband Low    Cutoff Freq.:  Hz

MFB     Pass High    R1 Seed:  Ohm

**Filter Type**

   Response Freq.:  Hz

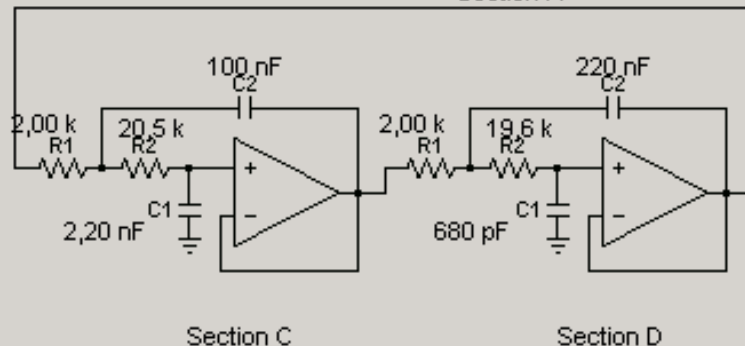
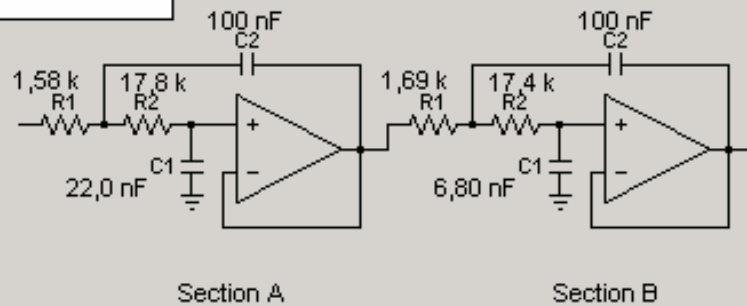
**Value Display**

Component Values     Sensitivities

**Components**

Res.     Cap.

Optional Entry	C1	C2	Gain (V/V)
A			
B			
C			
D			
E			
Real			



	Passband Gain (Vout/Vin)	Fn	Response at 100 Hz. Q	Gain	Phase*	Req. GBP
A	1	639,38 Hz	587,56 m	-0,10 dB	-15,4°	0
B	1	1,1226	1,0846	0,04 dB	-4,7°	112
C	1	1,6672	1,9260	0,03 dB	-1,8°	167
D	1	2,0797	5,2571	0,02 dB	-0,5°	26,0
1,0	Totals		6,4528	-0,01 dB	-22,4°	

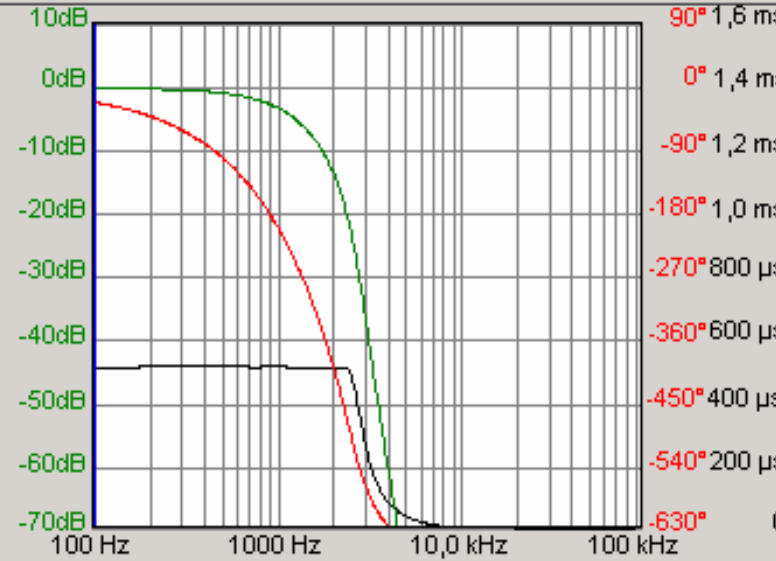
Sallen-Key, 8-Pole Low-Pass Transitional Gaussian to 12-dB: 1,00 kHz Cutoff, Passband Gain of 1,0

\* Note: Phase response is not corrected 180° for inverting stages.



The Linear Phase with equiripple error of 0.05 degree filter has phase flatness within 0.05 degree significantly beyond the passband with multiple stages. Its magnitude response is not as flat as the Butterworth, 'sagging' smoothly through the passband. Attenuation into the stopband is nearly as steep as the Butterworth for a given number of poles.

This filter has very little pulse response overshoot because of its linear group delay through the passband.



Settings

Fully Differential   Poles    Ripple  dB

Circuit Type

Sallen-Key    Low Pass   Cutoff Freq.  Hz

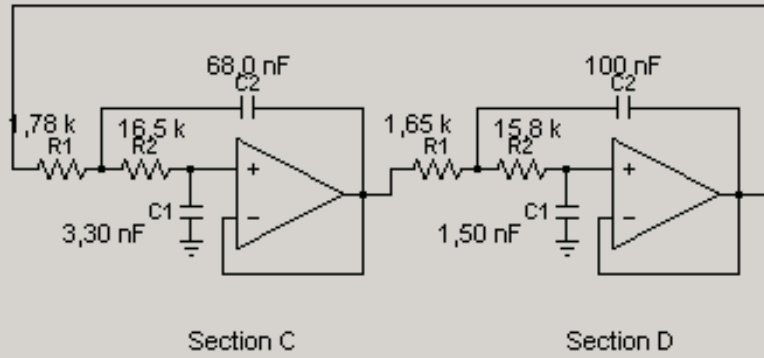
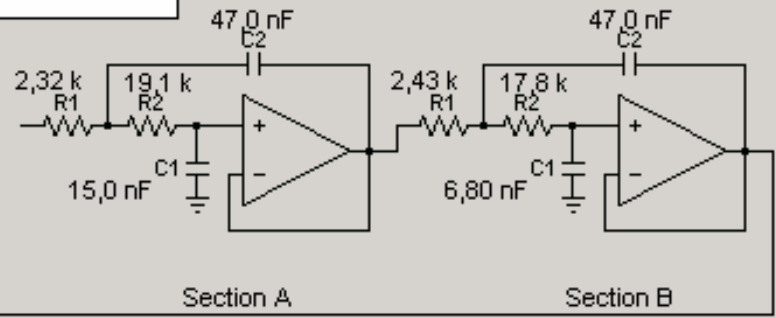
MFB    High Pass   R1  Ohm

Filter Type: **Linear Phase, 0.05**   Response Freq.  Hz

Value Display:  Component Values    Sensitivities

Components: E96 Res.   E6 Cap.

Optional Entry	C1	C2	Gain (V/V)
A			
B			
C			
D			
E			
Real			



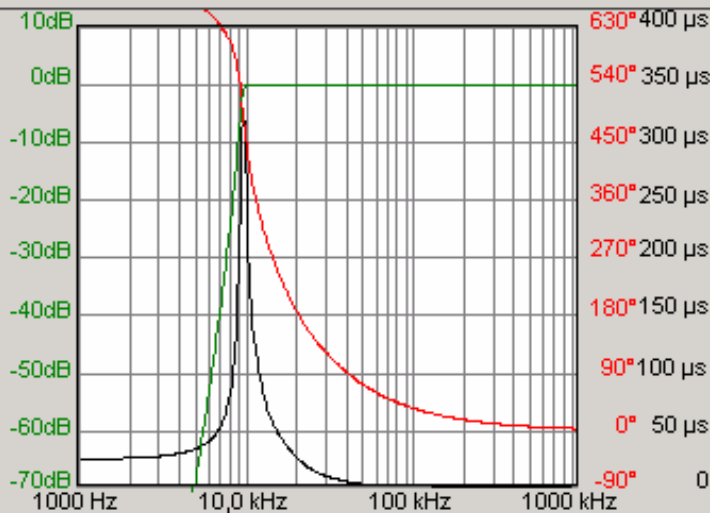
	Passband Gain (Vout/Vin)	Fn	Response at 100 Hz. Q	Gain	Phase*	Req. GBP
A	1	899,61 Hz	548,88 m	-0,07 dB	-11,6°	0
B	1	1,3604	857,78 m	0,01 dB	-5,0°	0
C	1	1,9516	1,3528	0,02 dB	-2,2°	195
D	1	2,5336	2,3719	0,01 dB	-0,9°	2,03
<hr/>						
	1,0	Totals	1,5107	-0,03 dB	-19,6°	

Sallen-Key, 8-Pole Low-Pass Linear Phase, 0.05 deg.: 1.00 kHz Cutoff, Passband Gain of 1.0

\* Note: Phase response is not corrected 180° for inverting stages.



The Multiple Feedback (MFB) or Infinite Gain topology places two feedback paths around an op amp. This filter type is less sensitive to component values than the Sallen-Key topology.



**Settings**

Fully Differential    Poles:     Ripple:  dB

**Circuit Type**

Sallen-Key:     Passband:  Low     High

MFB:     Pass:  High     Pass

Cutoff Freq.:  Hz

R1 Seed:  Ohm

**Filter Type**:

Response Freq.:  Hz

**Value Display**

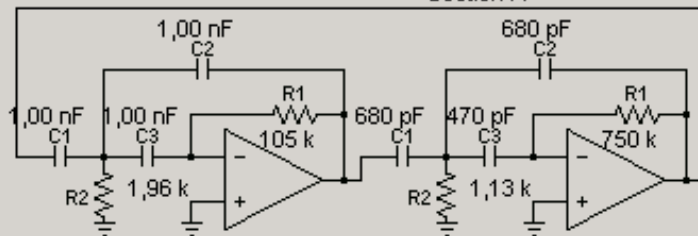
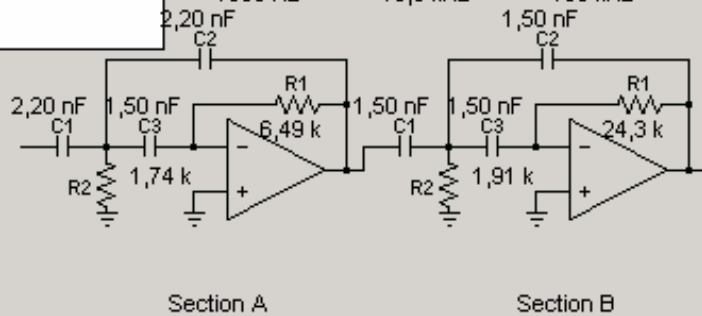
Component Values     Sensitivities

**Components**

Res.     Cap.

**Optional Entry**

	C1	C2	Gain (V/V)
A			
B			
C			
D			
E			
Real			



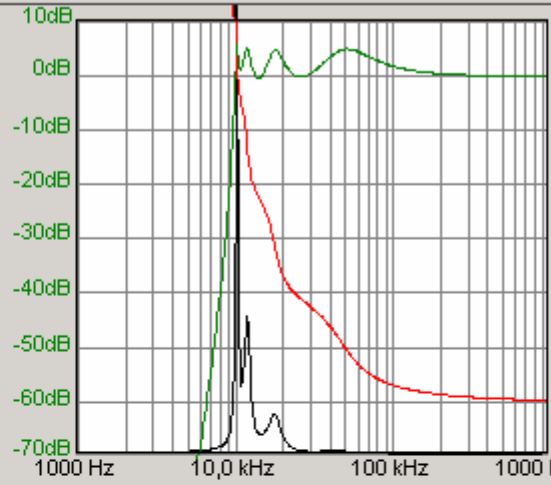
	Passband Gain (Vout/Vin)	Fn	Response at 1,00 M Hz Q	Gain	Phase*	Req. GBP
A	1,0	26,206	593,18 m	0,00 dB	2,5°	0
B	1,0	15,500	1,1830	0,00 dB	0,8°	645
C	1,0	11,188	2,4528	0,00 dB	0,3°	1,79
D	1,0	9,6697	8,0819	0,00 dB	0,1°	8,27
	1,0	Totals	13,910	0,00 dB	3,6°	

MFB, 8-Pole High-Pass Chebychev, 0,1dB Ripple:  
10,0 kHz Cutoff, Passband Gain of 1,0

\* Note: Phase response is not corrected 180° for inverting stages.



Enter ripple in dB... greater than zero up to 10dB  
**\*\* CHEBYSHEV FILTERS ONLY \*\***  
 Ripple is the peak-to-peak amplitude variation in the passband. There is a trade-off between rate of rolloff and ripple. For a given number of poles, you can achieve faster rolloff by allowing more passband ripple.



630° 800 μs  
 540° 700 μs  
 450° 600 μs  
 360° 500 μs  
 270° 400 μs  
 180° 300 μs  
 90° 200 μs  
 0° 100 μs  
 -90° 0

Settings

Fully Differential Poles **8** Ripple **3** dB

Circuit Type: Sallen-Key  Passband Low  Passband High  MFB  Pass

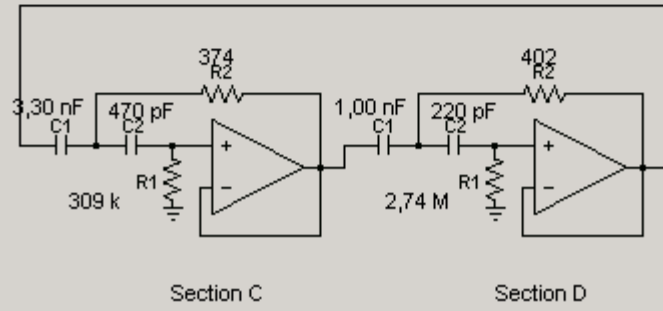
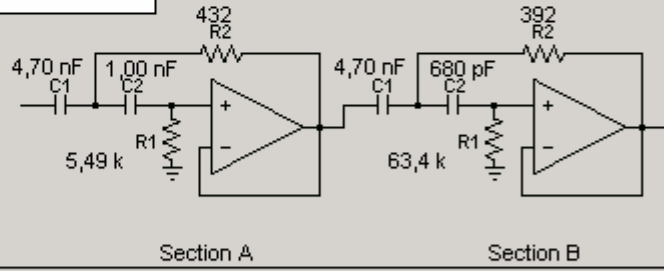
Cutoff Freq. **10,0 k** Hz  
 R1 **10,0 k** Ohm  
 Seed  
 Response Freq. **1,00 M** Hz

Filter Type: **Chebyshev**

Value Display:  Component Values  Sensitivities

Components: E96 Res. E6 Cap.

Optional Entry	C1	C2	Gain (V/V)
A			
B			
C			
D			
E			
Real			



	Passband Gain (Vout/Vin)	Response at 1,00 M Hz		Req. GBP		
		Fn	Q			
A	1	47,459	1,3492	0,01 dB	2,0°	211
B	1	17,818	4,2392	0,00 dB	0,2°	35,9
C	1	11,972	9,4420	0,00 dB	0,1°	609
D	1	10,162	31,677	0,00 dB	0,0°	29,3
1,0 Totals			1,7107 k	0,02 dB	2,4°	

Sallen-Key, 8-Pole High-Pass Chebyshev, 5dB Ripple: 10,0 kHz Cutoff, Passband Gain of 1,0

\* Note: Phase response is not corrected 180° for inverting stages.

FilterCAD - Filter1

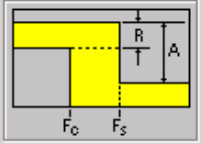
File Edit View Filter Window Help

Filter1:Enhanced Design

Untitled

Filter Type

- Lowpass
- Highpass
- Bandpass
- Notch



Amplitudes (dB)

Passband Gain: 0

Passband Ripple (R): 0

Stopband Atten. (A): 63.7

Actual Atten. (at Fs): 63.7

Frequencies

Passband (Fc): 10

Stopband (Fs): 25

Hz  kHz  MHz

Response

- Butterworth
- Bessel
- Chebyshev
- Elliptic
- Min Q Elliptic
- Custom

Order

8

>16

Coefficients

Fo	Q	Fn
10.0000	2.5629	INF
10.0000	0.9000	INF
10.0000	0.6013	INF
10.0000	0.5098	INF
-	-	-
-	-	-
-	-	-
-	-	-

Modified NUM

**FilterCAD de Linear Technology - Ecran d'établissement du gabarit et choix du type et de la forme du filtre**



## Filter2:Report



Device:LTC1562CN

Supply:+/-5.0V

Low Power:No

DC Accurate:Yes

Linear Phase:No

## Design Pole/Zero Locations

Fo	Q	Fn	Qn	type
10.0000	0.5098	INF	-	LP
10.0000	0.9000	INF	-	LP
10.0000	0.6013	INF	-	LP
10.0000	2.5629	INF	-	LP

## Implementation Pole/Zero Locations

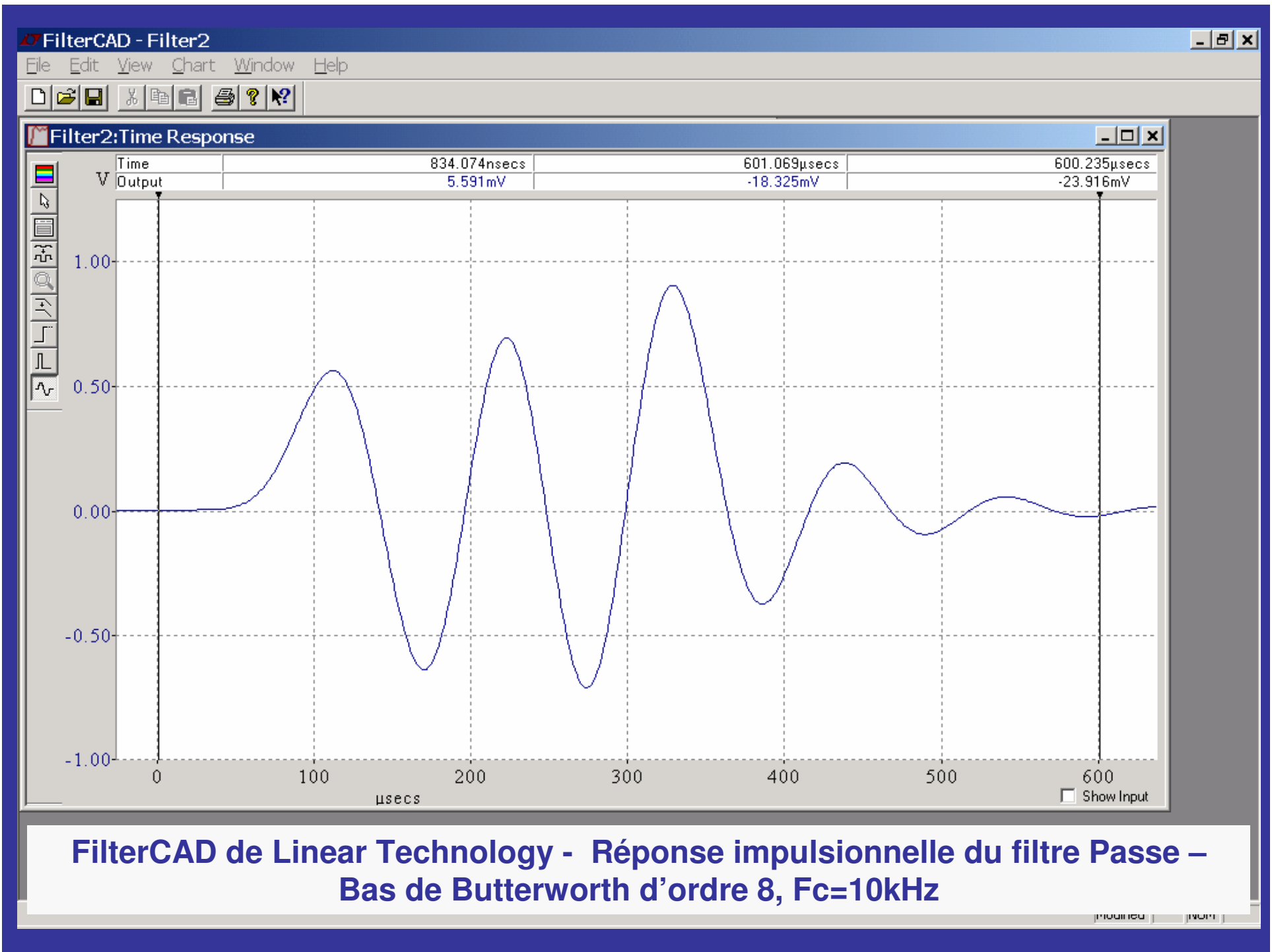
Fo	Q	Fn	Qn	type	OFT
10.0733	0.5147	INF	-	LP	RIN
10.0723	0.9155	INF	-	LP	RIN
10.0729	0.6084	INF	-	LP	RIN
9.9338	2.5330	INF	-	LP	RIN

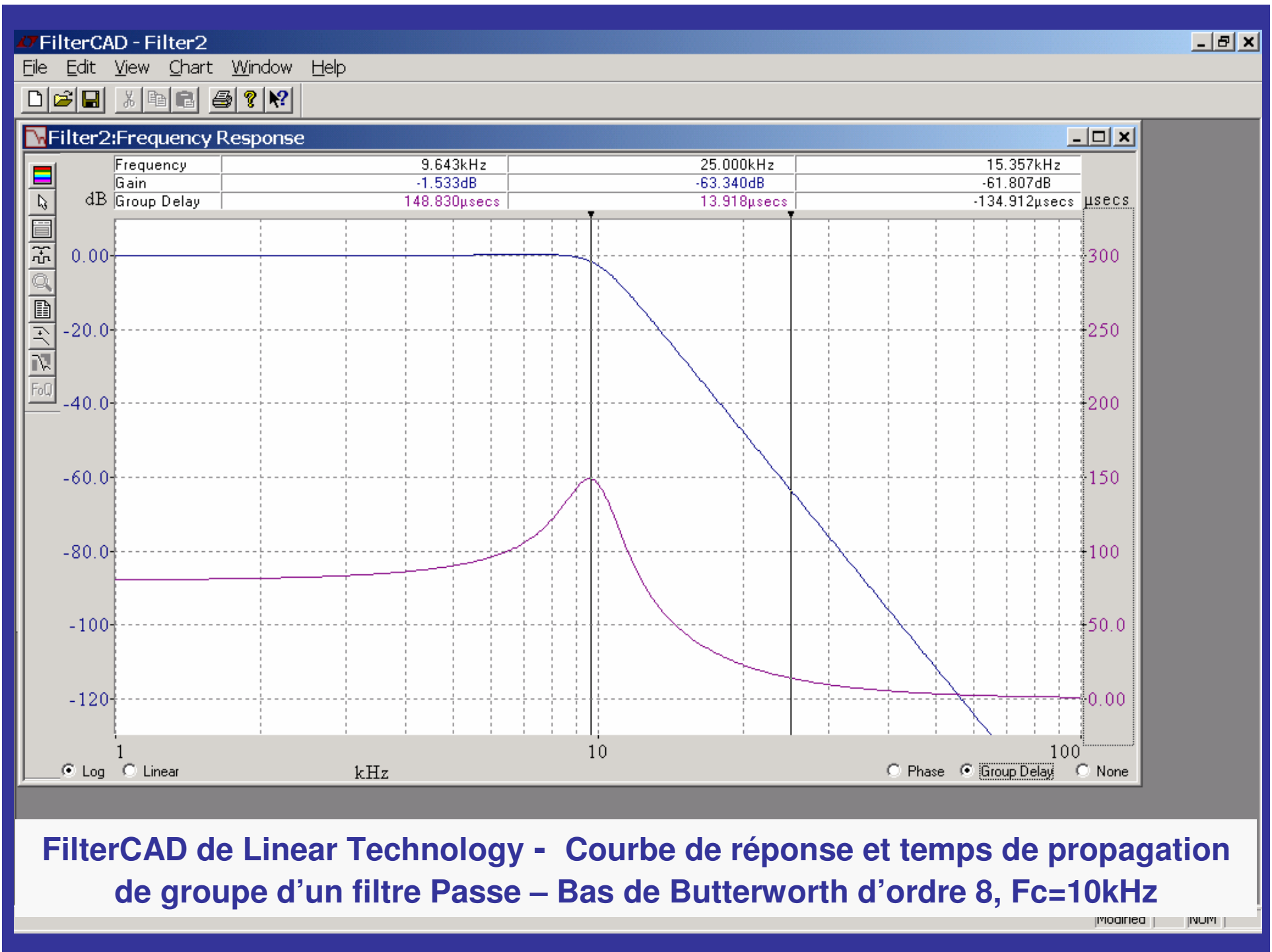
## Resistors (1% Values, kOhms)

R2	RQ	Rin
1020	51.1	1020
1020	90.9	1020
1020	60.4	1020
1050	255	1050
-	-	-

**FilterCAD de Linear Technology - Tableau des valeurs numériques du filtre de Butterworth d'ordre 8, Fc=10kHz**

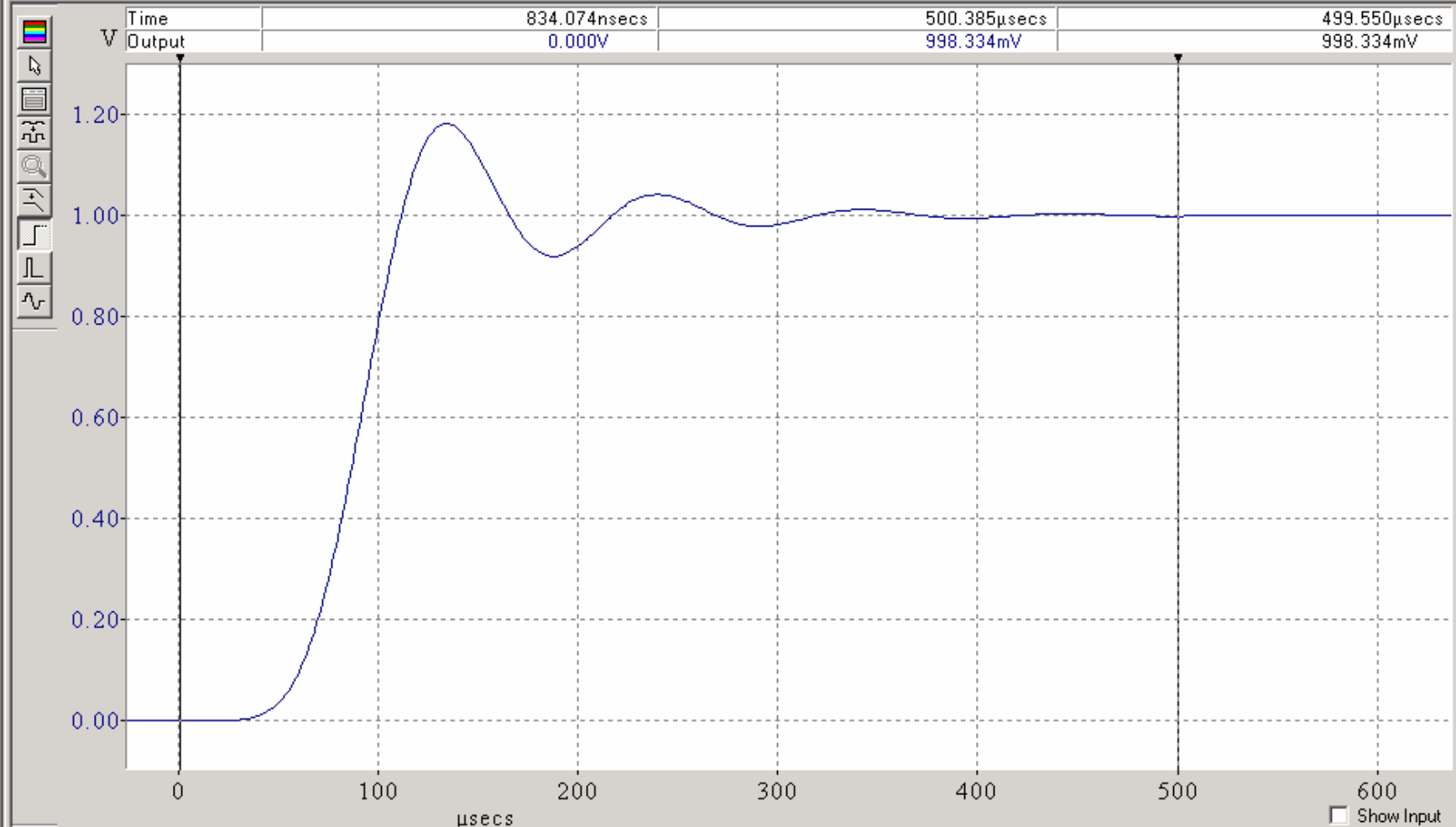




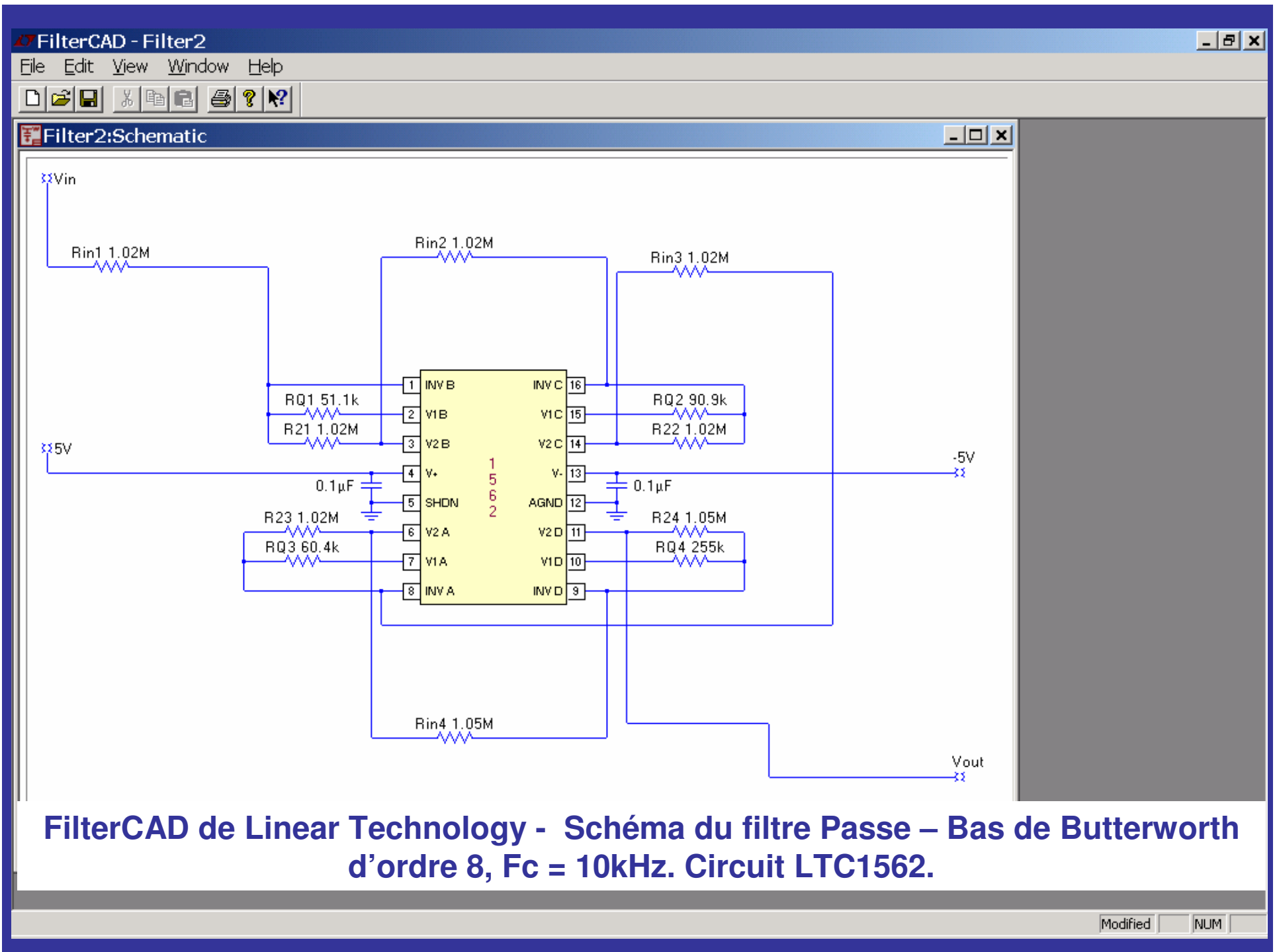




## Filter2:Time Response



**FilterCAD de Linear Technology - Réponse à un échelon (indicielle) du filtre  
Passe – Bas de Butterworth d'ordre 8,  $F_c=10\text{kHz}$**



**FilterCAD de Linear Technology - Schéma du filtre Passe – Bas de Butterworth d'ordre 8,  $F_c = 10\text{kHz}$ . Circuit LTC1562.**

## Les limites d'utilisation des filtres RC-actifs

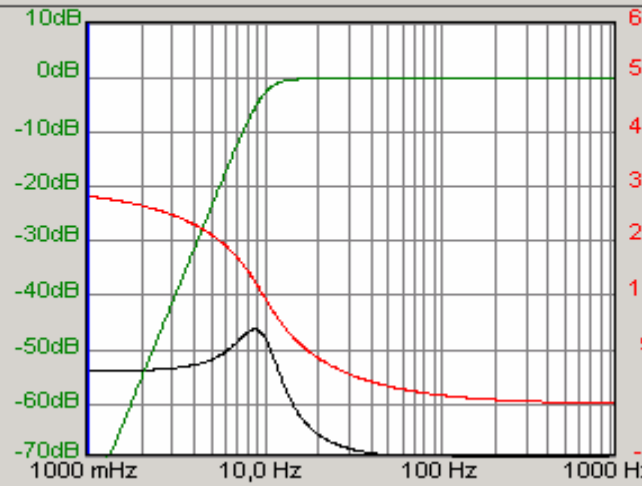
Les caractéristiques d'un filtre RC-actif dépendent en grande partie de la qualité de ses composants passifs ainsi que de celles de ses amplificateurs opérationnels avec des variations en fonction de la structure choisie.

L'accès au hautes fréquences est de nos jours facilité par les progrès des amplificateurs opérationnels à large produit gain bande associé à une forte impédance d'entrée, nécessaire à l'utilisation de faibles capacités. La stabilité des composants passifs de faible valeurs n'est pas très problématique mais la qualité et la conception des circuits en terme de capacités parasites et de découplages est primordiale. Avec les meilleures précautions il est possible d'atteindre des fréquences de coupure de l'ordre de 30 Mhz.

Les très basses fréquences exigent également des amplificateurs à grande impédance d'entrée. Les composants passifs résistances et capacités de fortes valeurs stables, sont rares donc onéreux. Là encore la qualité des découplages est primordiale (Zener), ainsi que le dessin des circuits pour des problèmes d'isolement, face aux fortes résistances utilisées. Avec des valeurs de résistances de 25 M $\Omega$  et de 50  $\mu$ F pour les capacités, il est possible d'atteindre des fréquences de l'ordre de 1mHz.



The Sallen-Key topology uses an op amp in a noninverting gain— often as a G=1 buffer. With an op amp used as a G=1 buffer, this filter type provides excellent passband gain accuracy. Sallen-Key filters can be relatively sensitive to component values in high-gain, high-Q sections.



Settings

Fully Differential Poles **4** Ripple  dB

Circuit Type:  Sallen-Key  Low Pass  High Pass  MFB

Passband:  Low  High

Cutoff Freq. **10,0** Hz

R1 **1,00 M** Ohm

Seed

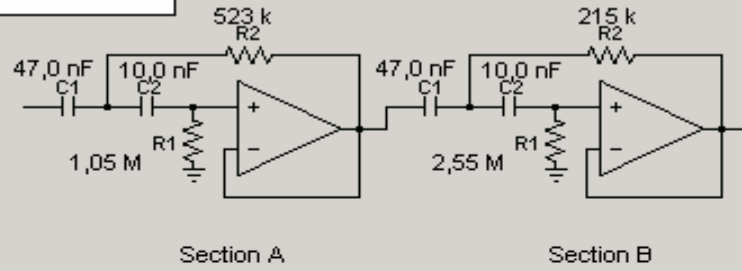
Filter Type: **Butterworth**

Response Freq. **1,00** Hz

Value Display:  Component Values  Sensitivities

Components: E96 Res. E6 Cap.

Optional Entry	C1	C2	Gain (V/V)
A			
B			
C			
D			
E			
Real			



Passband Gain (Vout/Vin)	Fn	Q	Response at 1,00 Hz. Gain	Phase*	Req. GBP	
A	1	10,000 Hz	541,20 m	-39,90	169,3°	0
B	1	10,000 Hz	1,3066	-39,79	175,6°	1,00
1,0	Totals	707,11 m	-79,69	344,8°		

Sallen-Key, 4-Pole High-Pass Butterworth: 10,0 Hz Cutoff, Passband Gain of 1,0

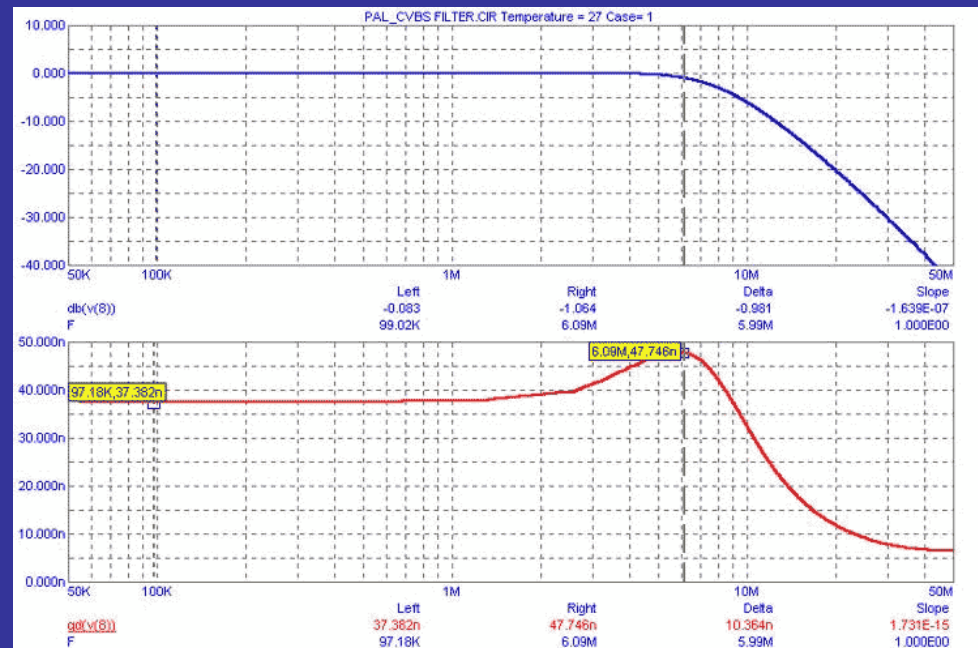
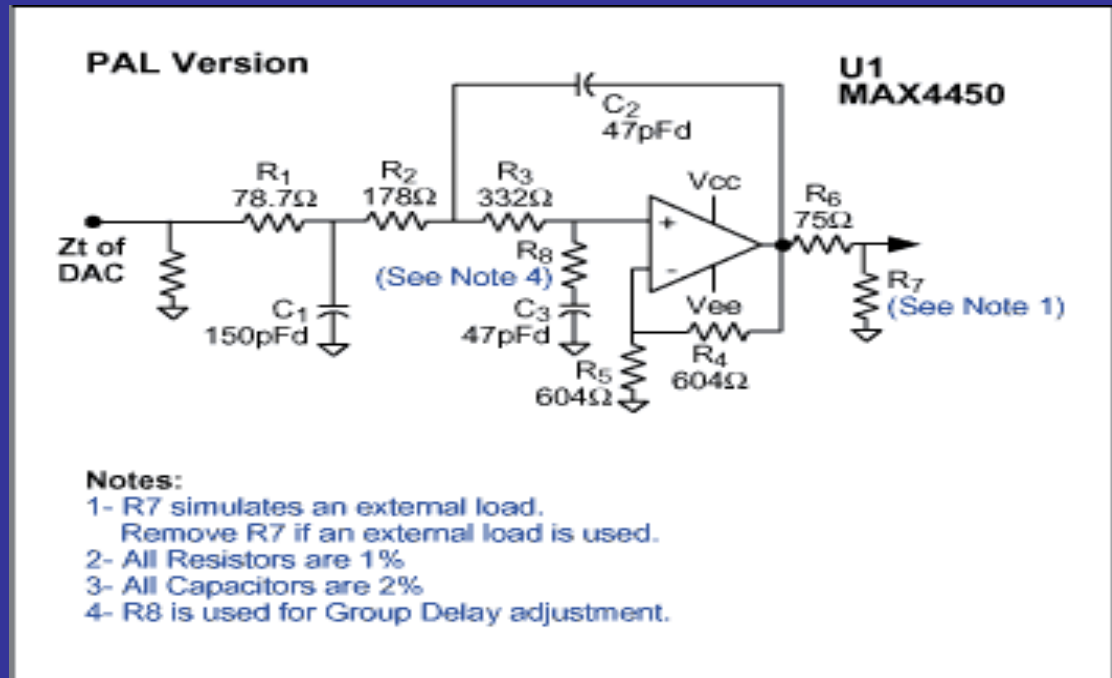
\* Note: Phase response is not corrected 180° for inverting stages.

Valeurs des condensateurs pour  $F_c = 10\text{Hz}$ .

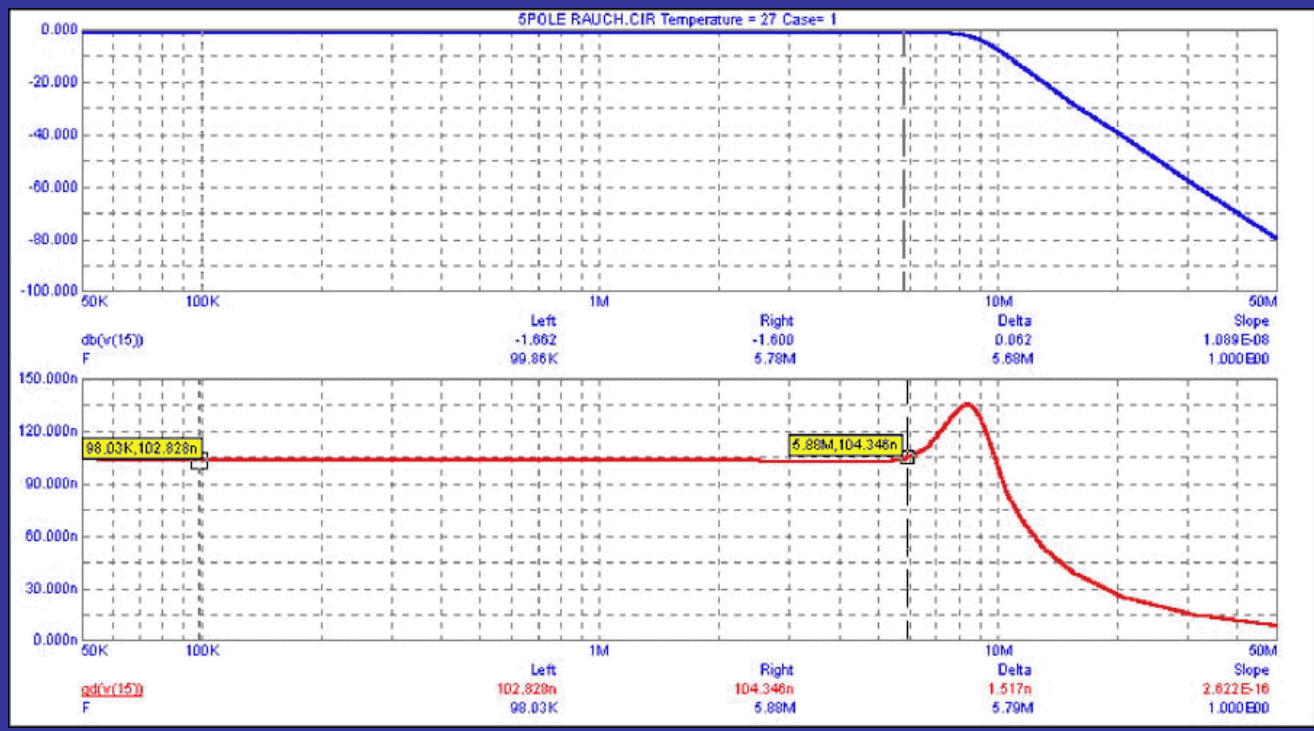
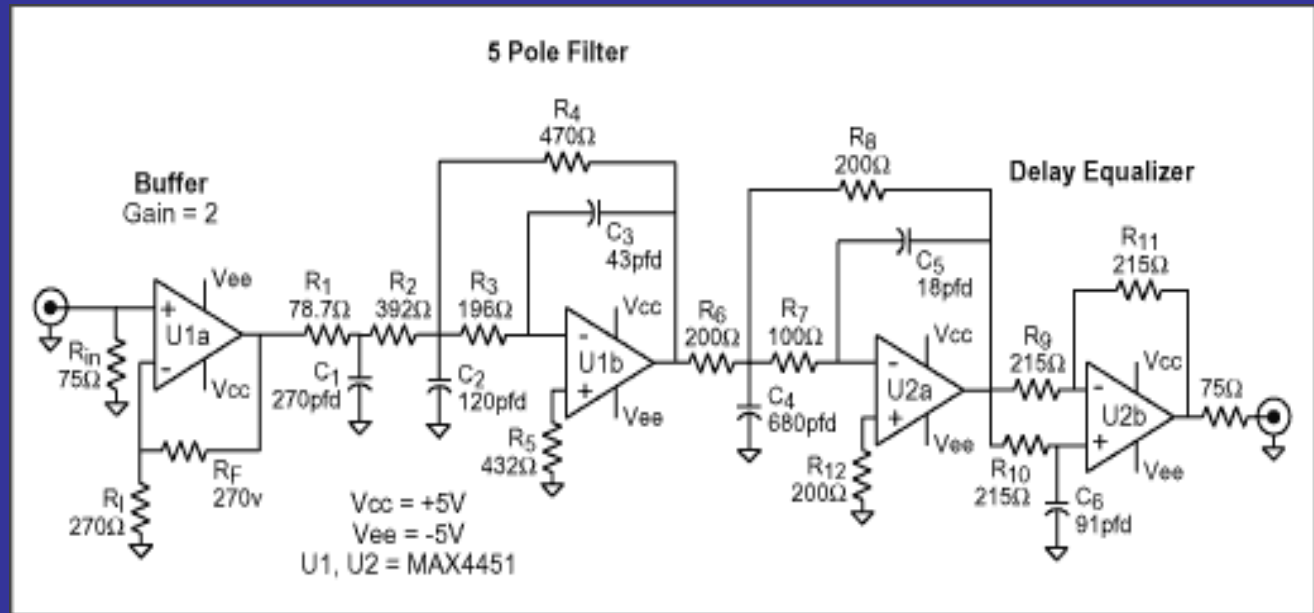
Pour  $F_c = 0,1\text{Hz}$ :  $C1 = 4,7\mu\text{F}$  et  $C2 = 1\mu\text{F}$

**Exemple d'un filtre Passe – Haut de Butterworth du 4ème ordre avec une fréquence de coupure de 10 Hz transposée à 0,1 Hz.**

Exemple d'un filtre  
 Passe – Bas de  
 Butterworth du 3ème  
 ordre après conversion  
 numérique-analogique  
 d'un signal vidéo PAL.  
 La fréquence de  
 coupure est de 6 MHz.



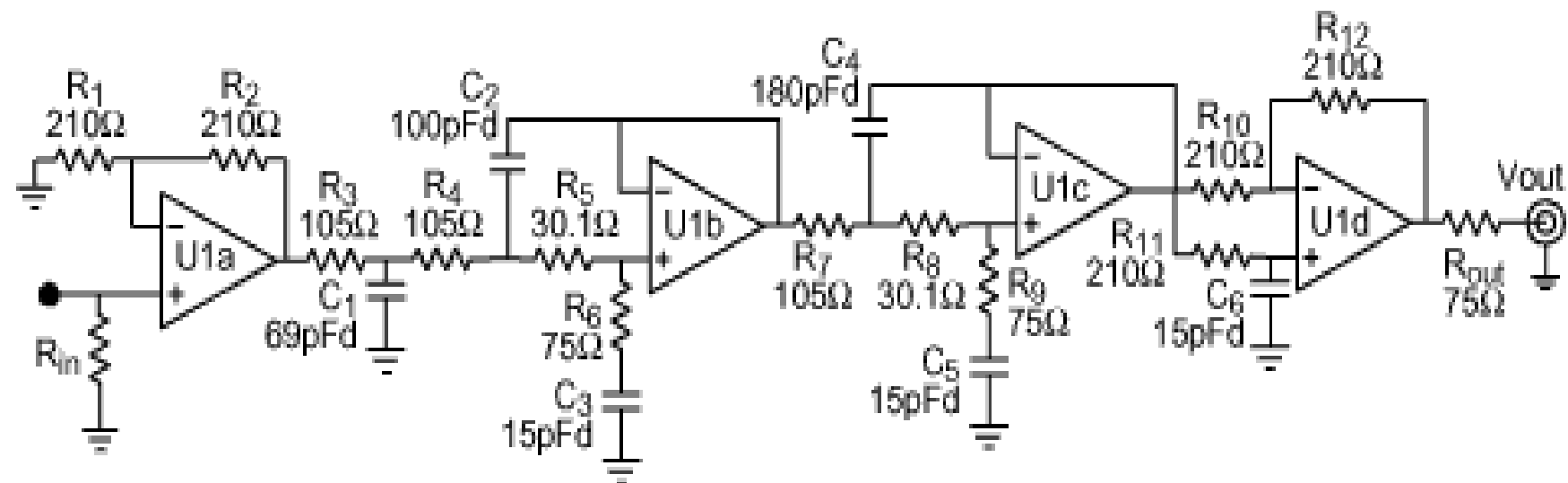
Exemple de filtre RC-actif Passe – Bas de reconstruction d'un signal vidéo après conversion numérique-analogique. Le filtre est un Butterworth du 5ème ordre avec une fréquence de coupure de 6 MHz et une structure de Rauch. Un circuit égaliseur améliore la réponse temporelle du filtre.





Exemple de filtre RC-actif Passe – Bas de reconstruction d'un signal HDTV après conversion numérique-analogique. Le filtre est un Butterworth du 5ème ordre avec une fréquence de coupure de **30 MHz** et une structure de Sallen et Key. Un circuit égaliseur améliore la réponse temporelle du filtre.

Un tel filtre demande de grandes précautions de réalisation et représente la limite actuelle des filtres RC-actifs.



**U1 MAX4383**

# Bibliographie

Zverev A.,I., (1967).

*Handbook of Filters Synthesis*, Wiley, New-York, 576 p.

ISBN 0471-98680-1 (La référence absolue, abondamment copiée depuis sa parution)

Hansell G. E., (1969)

*Filter Design and Evaluation*, Van Nostrand, New-York, 203 p.

ISBN 76-97169. (L'autre référence pour le design)

*Active Filters: Lumped, Distributed, Integrated, Digital, and Parametric*, (1970).

Huelsman L. P. Editor, Mc Graw Hill, 372 p.

ISBN 07-030847-0 (Premier état exhaustif du filtrage actif)

Bildstein, P., (1972).

*Filtres actifs*. Editions Radio, Paris, 251 p. (Premier et très bon ouvrage en Français sur les filtres actifs. Remarquables aspects pratiques avec de nombreuses tables dont les très rares polynômes de Legendre. Devenu introuvable!)

.Hilburn, J.L., Johnson, D.E., (1973)

*Manual of active filter design*, Mc Graw Hill, New-York, 190 p.

ISBN 07-028759-7 (Un grand classique de l'époque)

Gazin, J. F., (1974).

*Filtres actifs à amplificateurs opérationnels*, Thomson CSF, Paris, 304 p.

(Très bon ouvrage pratique sur les filtres actifs. Devenu Introuvable!)

Marchais, J.C., (1979)

*Structures élémentaires des filtres actifs*, Masson, Paris, 124 p.

ISBN 1-225-62910-2 (Bon ouvrage en Français)

Huelsman, L. P., Allen, P. E., (1980)

*Theory and design of active filters*, Mc Graw Hill, New-York, 576 p.

ISBN 0-07-030854-3 (Très bon ouvrage sur le filtrage actif)

Lancaster, D., (1981)

*Active filter cookbook*, Howard Sams, Indianapolis, 240 p.

ISBN 0-672-21168-8 (Ouvrage pratique à l'américaine c'est-à-dire très bon)

Williams, A.B., (1981)

*Electronic Filter Design Handbook*, Mc Graw Hill, New-York, 576 p.

ISBN 0-07-070430-9 (Un des tout meilleurs ouvrages sur les généralités du filtrage)

*Techniques modernes de filtrage*, Journées d'électronique 1981, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Presses Polytechniques Romandes, Lausanne, 389 p

(Excellente synthèse internationale sur l'état de l'art du filtrage en 1981, dont toutes les bases des filtres à capacités commutées... qui commençaient !)

*Switched-capacitor Filter Handbook*, (1985) Edited by Kerry Lacanette, National Semiconductor, Santa Clara, 145 p.

( Le plus complet ouvrage sur la programmation des cellules à variable d'état à capacité commutées, très nombreuses tables de fonctions d'approximation. Devenu introuvable).

Niewiadomski Heineman, (1989)

*Electronic filters design handbook*, Mc Graw Hill, New-York, 195 p.

ISBN 0-434-91378-2 (Bon aperçu général sur les filtres actifs)

Hassler, et Neyrinck. (1996)

*Filtres électriques*, Presses Polytechniques Romandes, Lausanne, 375 p.

(La référence académique absolue de langue française sur le filtrage)

Leclerc, D., Quinquis, A., (1996)

*Le filtrage des signaux*, Hermes, Paris, 106 p.

ISBN 2-86601-552-5 (Très bon fascicule sur l'essentiel du traitement du signal)

Zumbahlen, H., (2005).

*Analog Filters. In Op Amp Applications Handbook*, Jung, W. Editor, ,Analog-Devices, Newnes, Burlington, 878 p.

ISBN 0-7506-7844-5 (La référence actuelle sur les filtres RC-actifs)