ETI
Filtrage analogique

I – Introduction

II – Etude des filtres de Butterworth et de Chebychev

III – Filtres actifs

IV – Filtres à capacités commutées

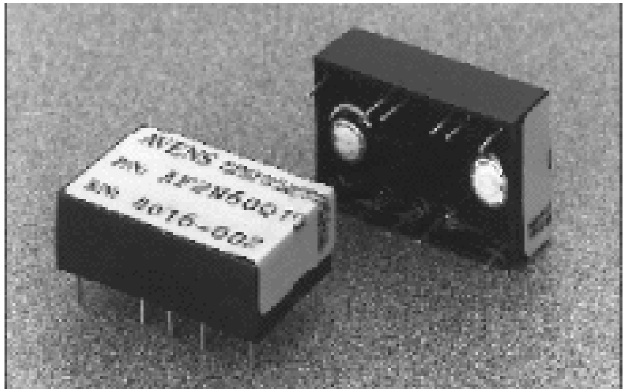
INSTITUT d'OPTIQUE GRADUATE SCHOOL

IOGS 1A 2015
Sylvie Lebrun

Domaines d'application

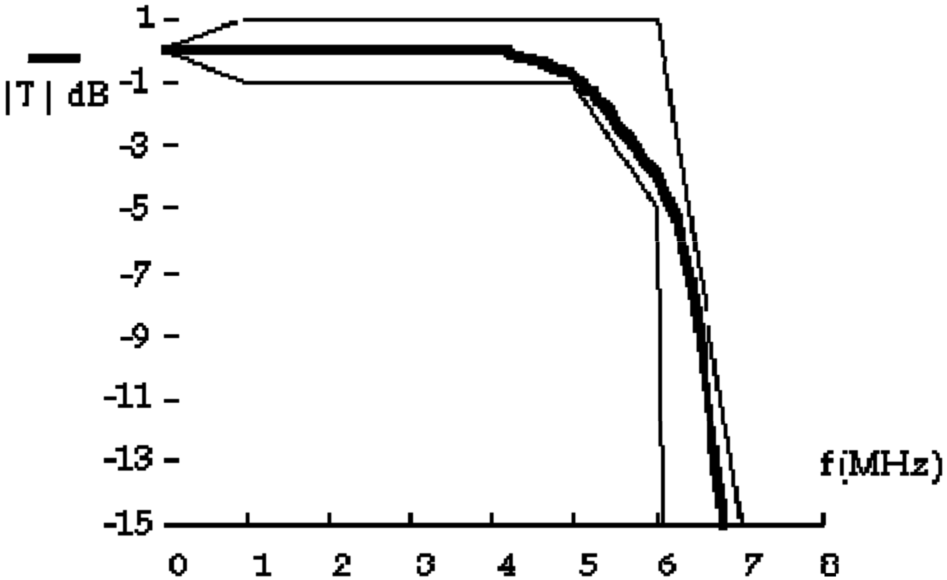
- ✓Traitement de signaux audio, vidéo, radio…
- ✓Télécommunications, télémétrie…
- ✓Instrumentation scientifique, médicale, radars…
- ✓Acquisition numérique de données (anti-repliement)
- ✓Réjection de bruit (alimentation électrique…)

…

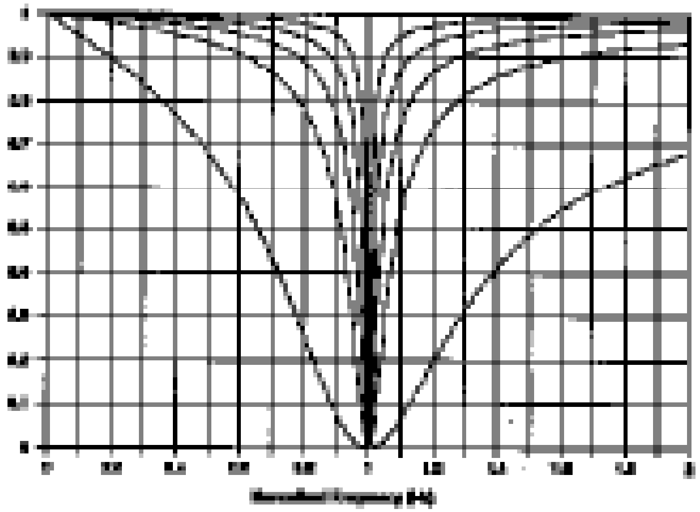


Miniature Filters Active/Bandpass/Band-Reject

gabarit de filtre vidéo



http://www.avens-filter.com/



Introduction

TYPE	COMPOSANTS	SPECIFITES
Filtre numérique	Circuits logiques intégrés	▶ Signaux numérisés ▶ F < 100MHz ▶ convient en grande série ▶ entièrement programmable
Filtres passifs	Circuit discret L et C, Composants piézoélectriques (quartz)	▶ F élevée ▶ pas d'alimentation ▶ non intégrable
Filtres actifs	AIL, R et C	▶ F < 1 MHz ▶ besoin d'alimentation ▶ tension filtrée faible < 12V
Filtres à capacité commutée	AIL, Interrupteur commandé MOS, R et C intégré	▶ F < qq MHz ▶ besoin d'alimentation ▶ intégrable ▶ fréquence programmable

http://ressource.electron.free.fr/bts/cours/le-filtrage-actif-passif.pdf
AIL : Amplificateur Intégré Linéaire

Introduction

Historique :

1920-1960 : filtres passifs RLC

1960 : filtres actifs avec ALI

1970 : circuits intégrés (→VLSI)

1980 : filtres numériques, DSP

1980 : filtres analogiques

< filtre passif LC séparateur de voies
pour enceinte acoustique

filtre passif céramique passe-bande >
centré sur 10,7 MHz
pour étage fi de récepteur FM

Généralités

Soit un signal u(t) comprenant plusieurs composantes sinusoïdales. Un filtre est un dispositif dont la fonction de transfert complexe $\underline{T}$ permet d'isoler certaines composantes en éliminant les composantes de fréquences indésirables.

Pour qu'un filtre ne *déforme* pas les signaux compris dans une certaine bande passante (BP), il faut réunir deux conditions :

1-Le module de la fonction de transfert doit être le plus constant possible dans la BP

2-Le temps de propagation de groupe t_g doit être le plus constant possible dans la BP

Par définition, $\boxed{t_g = -\frac{d\phi(\omega)}{d\omega}}$ =>phase ϕ linéaire

Si de plus $|\underline{T}|=0$ pour les fréquences à éliminer, alors le filtre est idéal.

En pratique, on se contente d'approcher ce filtre Idéal. La réalisation de filtres se fait à partir de polynômes d'approximation optimisant au mieux les contraintes demandées puis d'un éventuel ajout en cascade d'un correcteur de phase.

-une BP plate au maximum pour les filtres de **Butterworth**

-une bande de transition étroite au dépend d'une ondulation dans la BP pour les filtres de **Chebychev**

-une phase linéaire dans la BP pour les filtres de **Bessel**

-autres filtres (Chebychev de type II, Cauer ...)

Caractérisation d’un filtre

Pour une étude complète :

Réponse fréquentielle :
=>Diagrammes de Bode
-module de la fonction de transfert
-t_g

Réponse temporelle :
-réponse impulsionnelle
-réponse indicielle

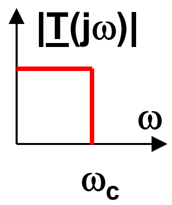
Notations

<u>Notations :</u>

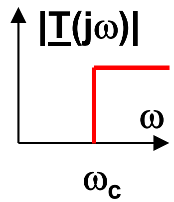
Fonction de transfert complexe : $\underline{T}(j\omega)$

Module : $T(\omega)=|\underline{T}(j\omega)|$

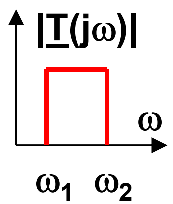
Gain en dB : $G_{dB}=20.\log T(\omega)$



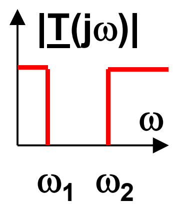
Filtre passe-bas



Filtre passe-haut



Filtre passe-bande



Filtre coupe-bande

Etude précise des filtres passe-bas
Il suffira d'effectuer des changements de variables pour les autres filtres

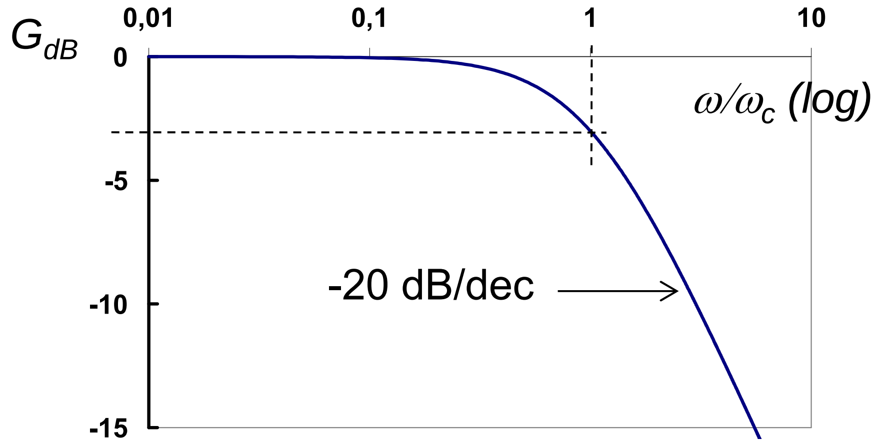
Bonne connaissance des filtres passe-bas d'ordre 1 et 2

Rappels sur les filtres passe-bas

Passe-bas 1er ordre

$$\underline{T}(j\omega) = \frac{1}{1 + j\frac{\omega}{\omega_c}}$$

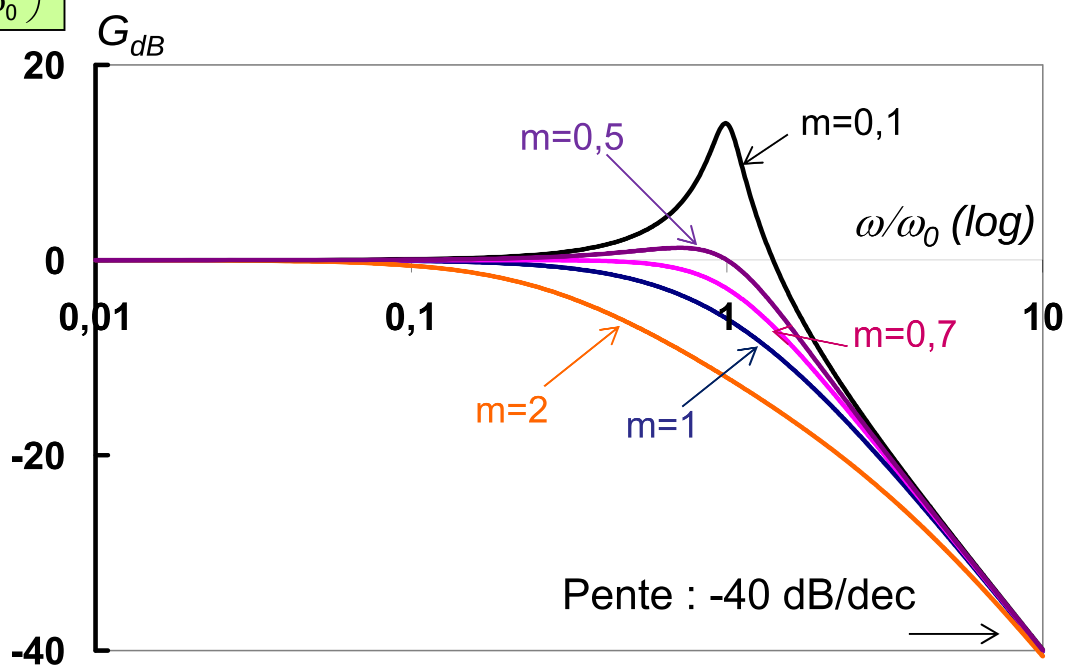
ω_c est la fréquence de coupure à -3 dB



Passe-bas 2nd ordre

$$\underline{T}(j\omega) = \frac{1}{1 + 2jm\frac{\omega}{\omega_0} + \left(j\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} = \frac{1}{1 + \frac{j}{Q}\frac{\omega}{\omega_0} + \left(j\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}$$

m est le facteur d'amortissement
Q est le facteur de qualité
ω_0 est la fréquence propre



0<m<0,7 : résonance à $\omega_r = \omega_0\sqrt{1-2m^2}$

m>0,7 : il n'y a plus de résonance

m=0,7 : réponse la plus plate dans la BP

m≥1 : T est décomposable en un produit de 1er ordre

Notion de gabarit

Cahier des charges :

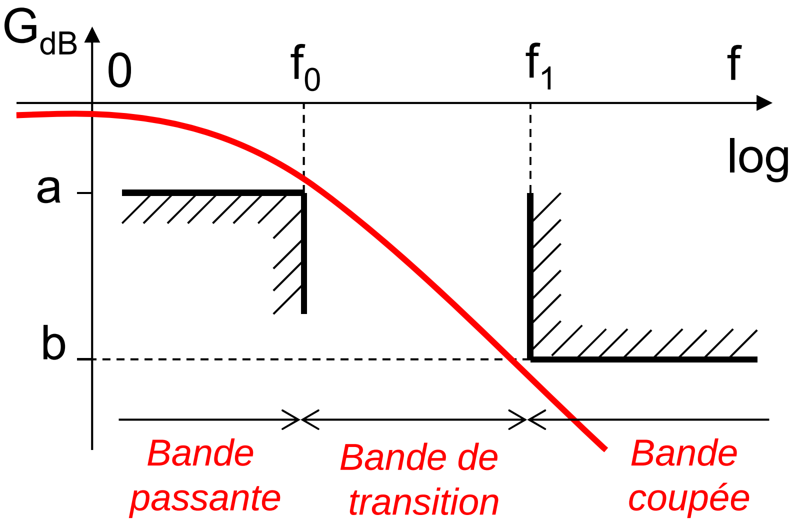
Construire un filtre *passe-bas* qui ne transmet que les signaux de fréquence < à f_0.

G_{dB} doit posséder :

-une valeur minimale **a** dans la bande de fréquences à transmettre

-une valeur maximale **b** dans la bande de fréquences à éliminer

-Le gabarit est caractérisé par 2 points (f_0, a) et (f_1, b).



Autres spécifications possibles d'un gabarit :

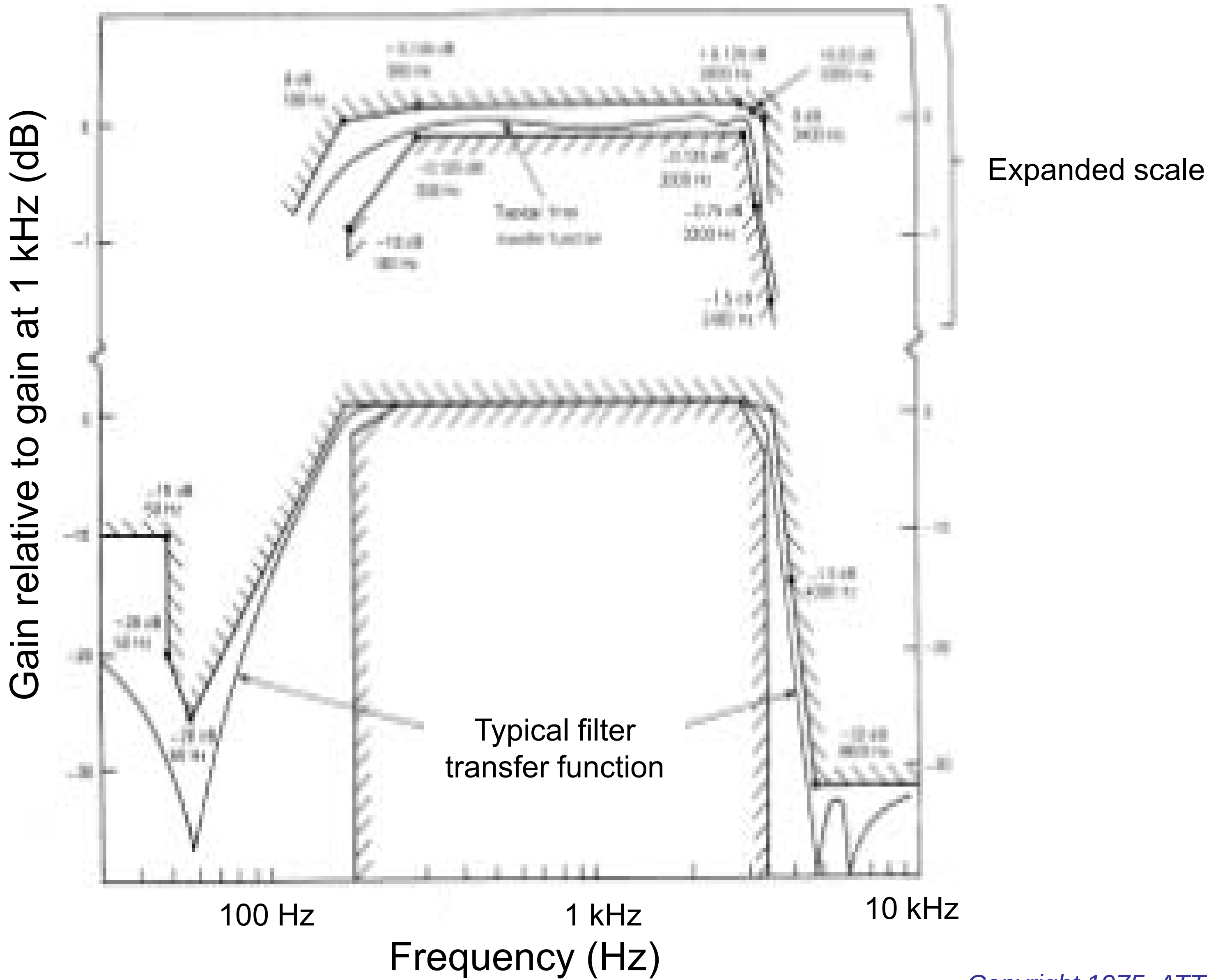
Ondulation dans la BP

Largeur de la bande de transition

Etc …

Utilisation d'approximations de filtres réels :
Butterworth, Chebychev, Bessel, Cauer …

Ex : Gabarit de transmission téléphonique



Filtrage analogique

I – Introduction

II – Etude des filtres de Butterworth et de Chebychev

III – Filtres actifs

IV – Filtres à capacités commutées

Filtres de Butterworth

Utilisé pour sa réponse extrêmement plate dans la BP

Le module de la fonction de transfert $T(\omega)$ est cherché sous la forme :

$$T(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^{2n}}}$$

où n est l'ordre du filtre

La réponse fréquentielle est normalisée par rapport à la pulsation de coupure (ou caractéristique) ω_c pour laquelle l'atténuation est de -3 dB

On pose $x=\omega/\omega_c$.

$$T(x) = \frac{1}{\sqrt{1+x^{2n}}}$$

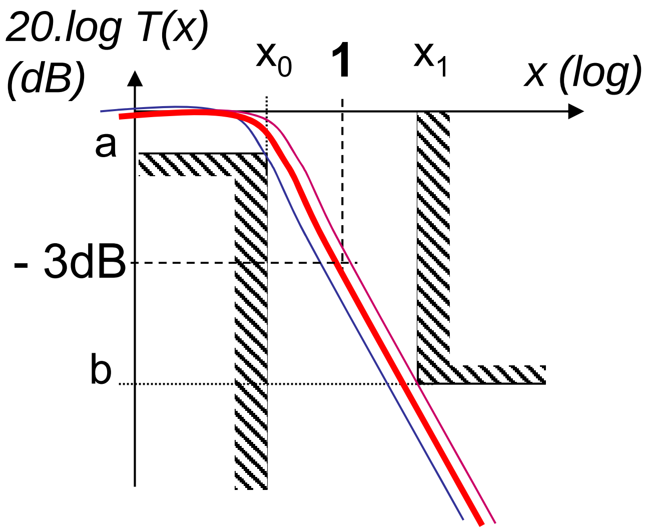
Pour x=1 : 20.logT(x)= - 3dB

Quel que soit n, toutes les courbes passent par -3dB pour x=1, soit $f=f_c$

Pour x<1 : 20.logT(x)>- 3 dB

La fréquence de coupure est définie à - 3dB quel que soit n

Détermination de n et fc : cas général



$x = f / f_c$
n = ordre du filtre
a ≥ - 3 dB

$$T(x) = \frac{1}{\sqrt{1 + x^{2n}}}$$

Conditions limites :

$$\begin{cases} 20.\log T(x_0) > a \\ 20.\log T(x_1) < b \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} x_0^{2n} < 10^{-a/10} - 1 & (1) \\ x_1^{2n} > 10^{-b/10} - 1 & (2) \end{cases}$$

(2) divisé par (1) donne la valeur de n minimum.
En pratique on prend la plus petite valeur entière de n qui satisfait :

$$\mathbf{n} \geq \frac{1}{2} \frac{\log\left(\frac{10^{-a/10} - 1}{10^{-b/10} - 1}\right)}{\log\left(f_0 / f_1\right)}$$

On calcule alors avec (1) et (2) les fréquences de coupure limites :

$$f_{c,0} = \frac{f_0}{\left(10^{-a/10} - 1\right)^{1/2n}} \qquad f_{c,1} = \frac{f_1}{\left(10^{-b/10} - 1\right)^{1/2n}}$$

On choisit la fréquence de coupure au « milieu » (moyenne géométrique) : $f_c = \sqrt{f_{c,0} f_{c,1}}$

Fonction de transfert

But : trouver une fraction rationnelle complexe $\underline{T}(\underline{s})$ (avec $\underline{s}=jx$) qui admette T(x) comme module.

$$\mathbf{T}(\mathbf{x}) = \frac{1}{\sqrt{1+\mathbf{x}^{2\mathbf{n}}}}$$

Méthode : on factorise le polynôme $P(x) = 1 + x^{2n}$

On montre que P(x) apparaît ainsi comme le carré du module du polynôme $\underline{\mathbf{P}}(\underline{\mathbf{s}})$ suivant (n impair) :
$\underline{\mathbf{P}}(\underline{\mathbf{s}}) = (1+\underline{s})(a^2+b^2+2b\underline{s}+\underline{s}^2)(\ldots$

La fonction de transfert normalisée s'écrit alors :

$$\underline{\mathbf{T}}(\underline{\mathbf{s}}) = \frac{1}{\underbrace{(1+\underline{\mathbf{s}})}_{\text{si n est impair}}\left(\mathbf{a}^2+\mathbf{b}^2+2\mathbf{b}\underline{\mathbf{s}}+\underline{\mathbf{s}}^2\right)(\ldots}$$

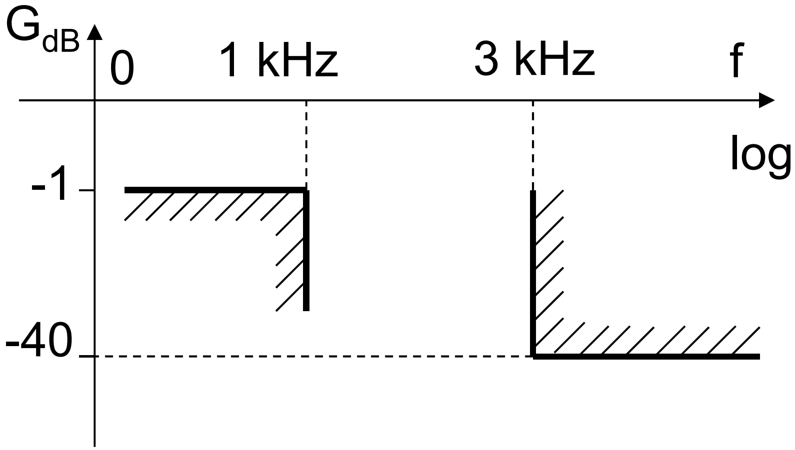
En pratique, l'expression de $\underline{P}(\underline{s})$ donc de $\underline{T}(\underline{s})$ ne dépend que de l'ordre n du filtre => utilisation de tables pour les coefficients

Quelques polynômes de Butterworth

n	$P(s)$
1	$(1+s)$
2	$(1+1.414s+s^2)$
3	$(1+s)(1+1.000s+s^2)$
4	$(1+1.848s+s^2)(1+0.765s+s^2)$
5	$(1+s)(1+1.618s+s^2)(1+0.618s+s^2)$
6	$(1+1.932s+s^2)(1+1.414s+s^2)(1+0.518s+s^2)$
7	$(1+s)(1+1.802s+s^2)(1+1.247s+s^2)(1+0.445s+s^2)$
8	$(1+1.962s+s^2)(1+1.663s+s^2)(1+1.111s+s^2)(1+0.390s+s^2)$
9	$(1+s)(1+1.879s+s^2)(1+1.532s+s^2)(1+1.000s+s^2)(1+0347s+s^2)$
10	$(1+1.975s+s^2)(1+1.782s+s^2)(1+1.414s+s^2)(1+0.908s+s^2)(1+0.313s+s^2)$

Exemple récapitulatif

Déterminer la fonction de transfert du filtre passe-bas de Butterworth qui satisfait au gabarit suivant :



1) Détermination de l'ordre : n>4,8 donc on choisit n=5

2) Fréquences de coupure : $f_{c,0}$=1,145 kHZ ; $f_{c,1}$=1,194 kHZ d'où f_c=1,17 kHZ

3) Détermination de la fonction de transfert normalisée à partir de la table :

$$\underline{\mathbf{T}}(\underline{\mathbf{s}}) = \frac{1}{(1+\underline{\mathbf{s}})\left(1+1,618\underline{\mathbf{s}}+\underline{\mathbf{s}}^2\right)\left(1+0,618\underline{\mathbf{s}}+\underline{\mathbf{s}}^2\right)}$$

4) Fonction de transfert : $\underline{\mathbf{T}}(\mathbf{j}\omega) = \dfrac{1}{\left(1+\mathbf{j}\dfrac{\omega}{\omega_c}\right)\left(1+1,618\mathbf{j}\dfrac{\omega}{\omega_c}+\left(\mathbf{j}\dfrac{\omega}{\omega_c}\right)^2\right)\left(1+0,618\mathbf{j}\dfrac{\omega}{\omega_c}+\left(\mathbf{j}\dfrac{\omega}{\omega_c}\right)^2\right)}$

$$\underline{\mathbf{T}}(\mathbf{jf}) = \frac{1}{\left(1+\mathbf{j}.8,5.10^{-4}\mathbf{f}\right)\left(1+\mathbf{j}.1,38.10^{-3}\mathbf{f}-7,3.10^{-7}\mathbf{f}^2\right)\left(1+\mathbf{j}.5,2.10^{-4}\mathbf{f}-7,3.10^{-7}\mathbf{f}^2\right)}$$

Filtres de Chebychev

Utilisé quand les spécifications du gabarit permettent une ondulation dans la BP

La fonction T(x) est cherchée sous la forme :

$$\mathbf{T}(\mathbf{x}) = \frac{1}{\sqrt{1+\varepsilon^2 \mathbf{C}_\mathbf{n}^2(\mathbf{x})}}$$

ε est un nombre

$C_n(x)$ est un polynôme défini par récurrence

$C_0(x) = 1$; $C_1(x) = x$;

$C_{n+1}(x) = 2 \times C_n(x) - C_{n-1}(x)$

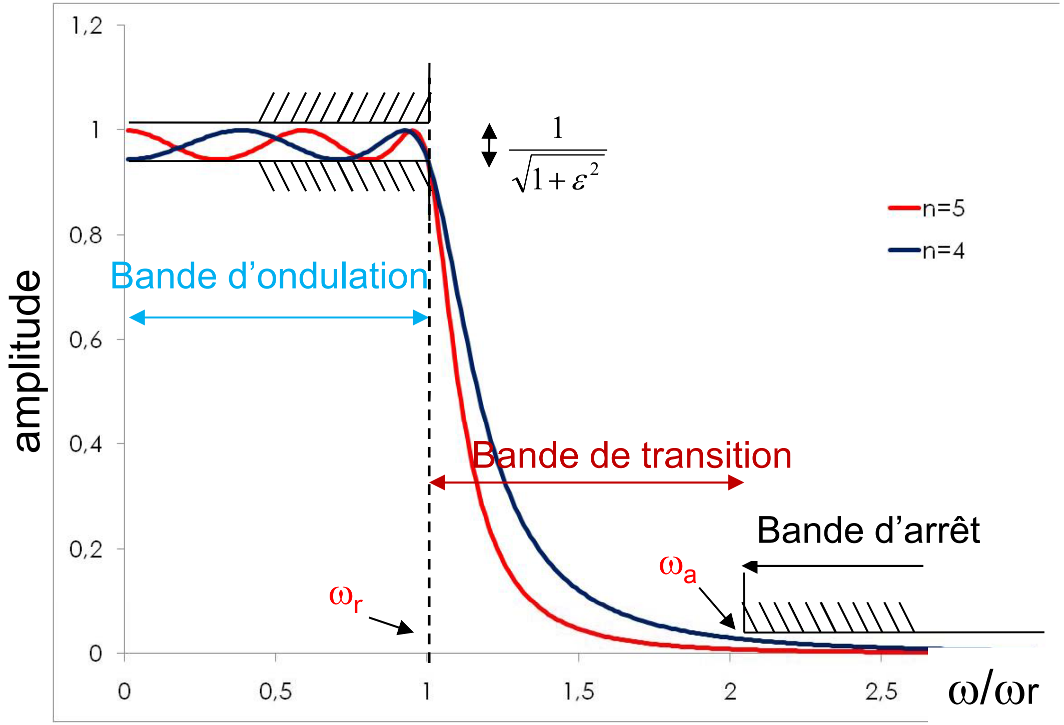
C_n est oscillante dans la BP et décroissante dans la bande d'arrêt

x=ω/ω_r où ω_r est la pulsation délimitant la bande dans laquelle on accepte une ondulation r définie par $r^2 = 1+\varepsilon^2$

Normalisation par rapport à ω_r

La fréquence de coupure ω_r est définie à $-10.\log(1+\varepsilon^2)$ dB qui vaut –3dB uniquement pour ε=1.

-Le nb d'extrema présents dans la bande d'ondulation est égal à n.



Calcul de l'ordre

La donnée de la largeur de la bande d'ondulation fixe ω_r.
Il suffit de connaître :
-un point de la bande d'arrêt (ω_a, $G_{dB}(\omega_a)=G_{dB,a}$)
-l'amplitude de l'ondulation admise
pour déterminer l'ordre n du filtre

$$n \geq \frac{\arg\cosh \sqrt{\dfrac{10^{-b/10}-1}{10^{-a/10}-1}}}{\arg\cosh \dfrac{\omega_a}{\omega_r}}$$

Polynômes de Chebychev

On détermine T(x) compte tenu de l'ondulation tolérable r et de l'ordre n

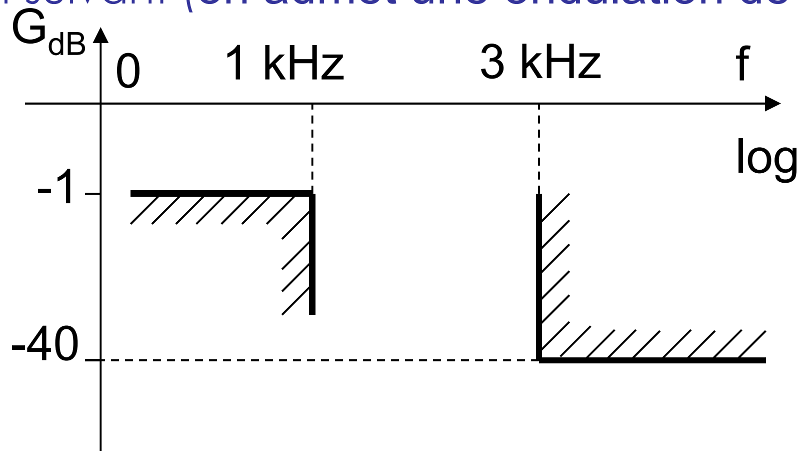
Voici quelques polynômes de Chebychev :

n	$P(s)$ pour $r = 0.5\,dB = 1.059$ ou $\varepsilon = 0.3493$
1	$(1+0.349s)$
2	$(1+0.940s+0.659s^2)$
3	$(1+1.596s)(1+0.548s+0.875s^2)$
4	$(1+2.376s+2.806s^2)(1+0.330s+0.940s^2)$
5	$(1+2.760s)(1+1.230s+2.097s^2)(1+0.216s+0.965s^2)$
6	$(1+3.692s+6.370s^2)(1+0.719s+1.695s^2)(1+0.152s+0.977s^2)$
7	$(1+3.904s)(1+1.818s+3.939s^2)(1+0.472s+1.477s^2)(1+0.112s0.984+s^2)$
8	$(1+4.981s+11.36s^2)(1+1.037s+2.788s^2)(1+0.335s+1.349s^2)(1+0.086s+0.988s^2)$

	$P(s)$ pour $r = 1.0\,dB = 1.122$ ou $\varepsilon = 0.5089$
1	$(1+0.509s)$
2	$(1+0.996s+0.907s^2)$
3	$(1+2.024s)(1+0.497s+1.006s^2)$
4	$(1+2.411s+3.579s^2)(1+0.283s+1.014s^2)$
5	$(1+3.454s)(1+1.091s+2.329s^2)(1+0.181s+1.012s^2)$
6	$(1+3.722s+8.019s^2)(1+0.609s+1.793s^2)(1+0.126s+1.009s^2)$
7	$(1+4.868s)(1+1.606s+4.339s^2)(1+0.392s+1.530s^2)(1+0.092s+1.007s^2)$
8	$(1+5.010s+14.23s^2)(1+0.876s+2.934s^2)(1+0.276s+1.382s^2)(1+0.070s+1.006s^2)$

Exemple récapitulatif

Déterminer la fonction de transfert du filtre passe-bas de Chebychev qui satisfait au gabarit suivant (on admet une ondulation de 1dB dans la BP) :



1) Détermination de l'ordre du gabarit : r=1 dB=1,122 donc ε=0,5089
D'où n>3,4 donc on choisit n=4

2) Détermination de la fonction de transfert normalisée à partir de la table :

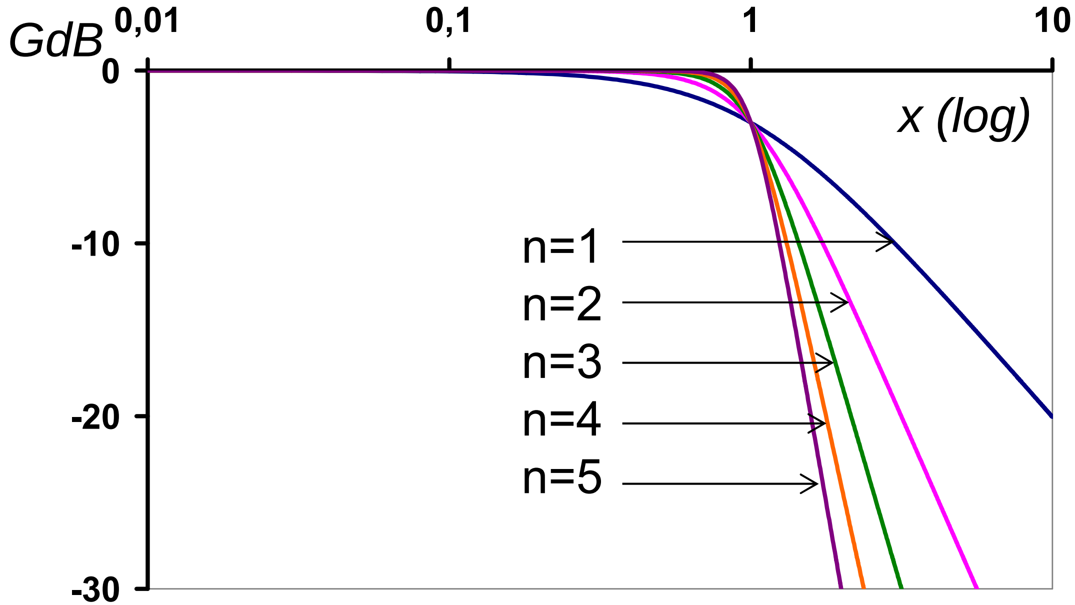
$$\underline{\mathbf{T}}(\underline{\mathbf{s}}) = \frac{1}{\left(1+2,411\underline{\mathbf{s}}+3,579\underline{\mathbf{s}}^2\right)\left(1+0,283\underline{\mathbf{s}}+1,014\underline{\mathbf{s}}^2\right)}$$

3) Fonction de transfert : $\underline{\mathbf{T}}(\mathbf{j}\omega) = \dfrac{1}{\left(1+2,411\mathbf{j}\dfrac{\omega}{\omega_r}+\left(\sqrt{3,579}\,\mathbf{j}\dfrac{\omega}{\omega_r}\right)^2\right)\left(1+0,283\mathbf{j}\dfrac{\omega}{\omega_r}+\left(\sqrt{1,014}\,\mathbf{j}\dfrac{\omega}{\omega_r}\right)^2\right)}$

Comparaison Butterworth - Chebychev

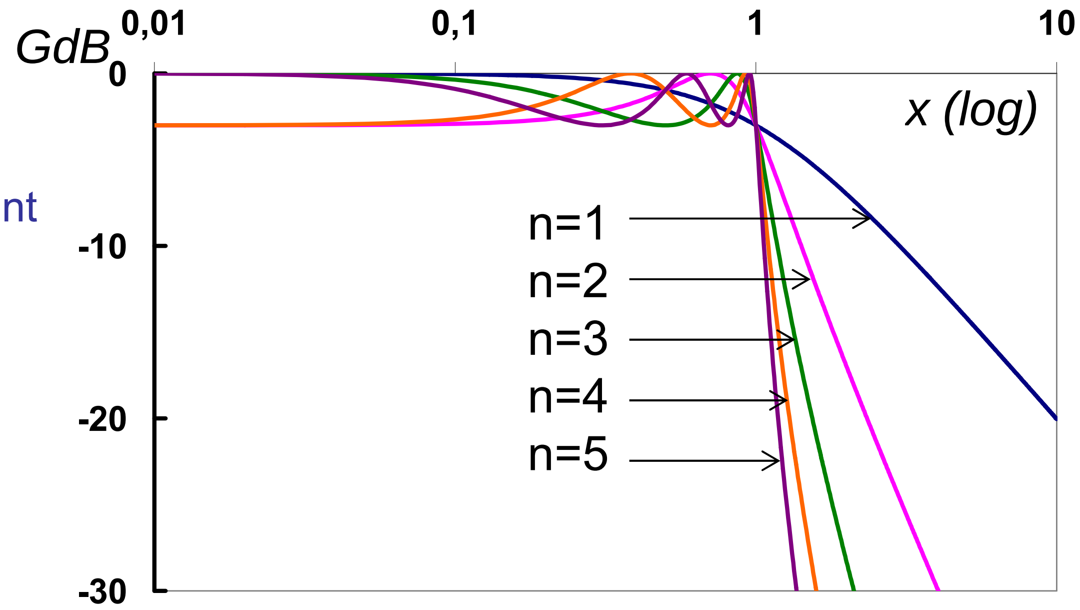
<u>Butterworth</u>

La fréquence de coupure est la même quel que soit n
Coupure de pente relativement faible (mais peut être augmentée avec n plus grand)
Réponse très plate dans la BP
Assez bien adapté aux signaux rapides

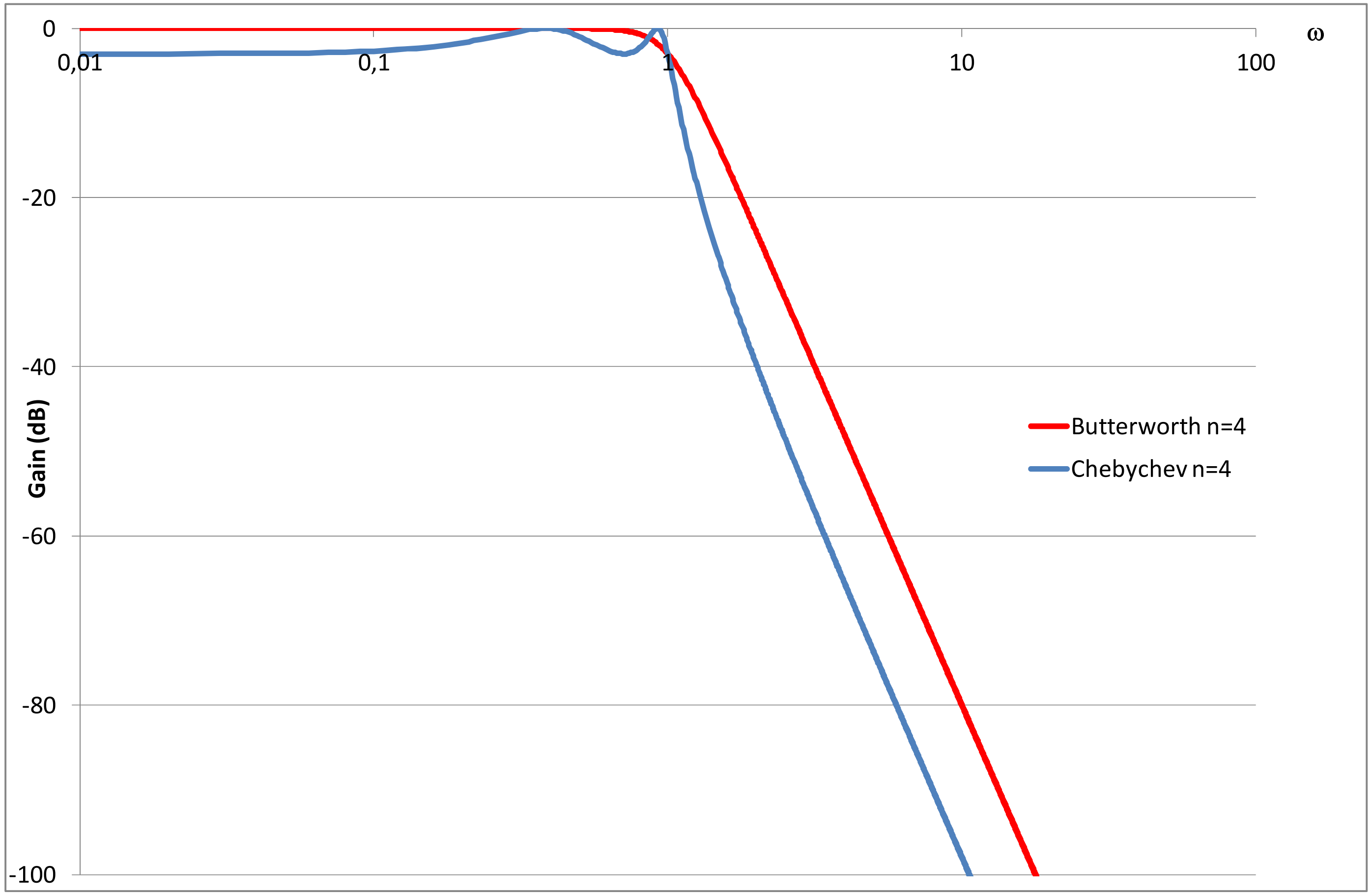


<u>Chebychev</u>

Coupe à ordre identique plus rapidement que Butterworth
Ondulations dans la BP
Déconseillé pour les signaux rapides (déformation importante)



Comparaison Butterworth - Chebychev



Autres formes de réponse

Filtres de Legendre :

-Il n’y a pas d’ondulation dans la bande passante.

-La coupure est plus raide que Butterworth, mais moins raide que Chebychev

Filtres de Bessel :

-La coupure n’est pas très raide

-La phase est très linéaire

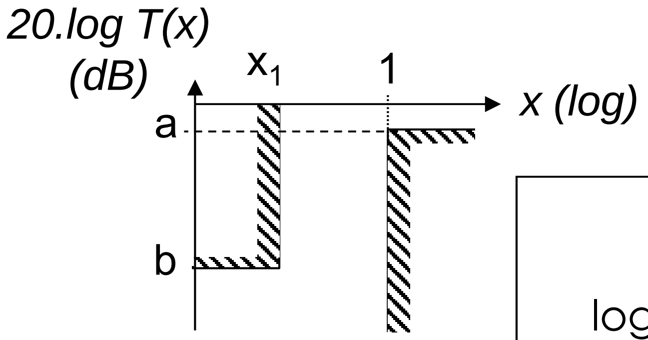
Filtres de Cauer (non polynômiaux) :

- Comportement de Chebychev en bande passante et en bande d’arrêt
- La coupure est très raide
- La phase n’est pas linéaire (les signaux sont assez déformés).

Transformations

Cas fréquent : a = -3dB et normalisation par rapport à ω_0

Passe-haut ⇔ passe-bas

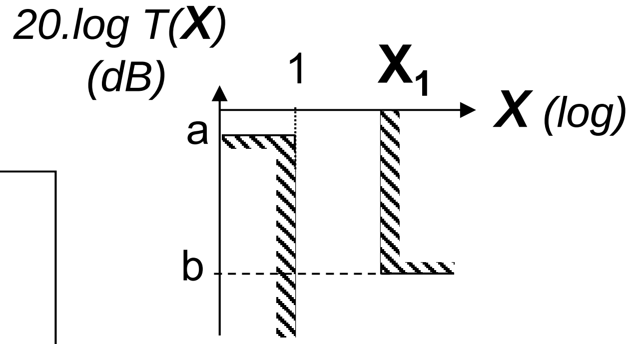


$\underline{s} \rightarrow \underline{S} = 1 / \underline{s}$

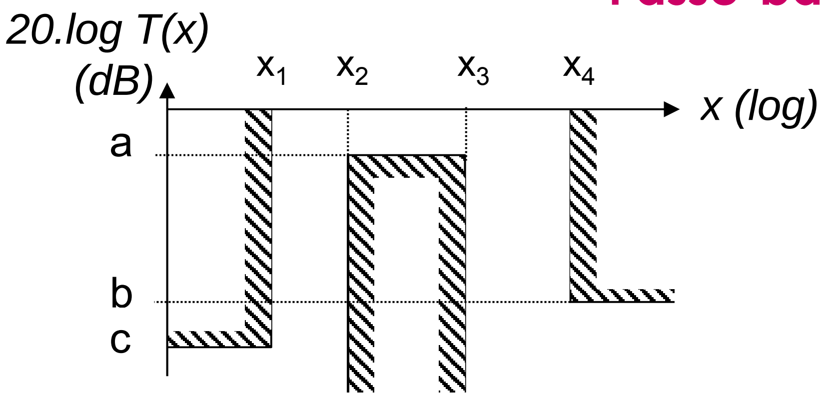
$x \rightarrow X = 1 / x$

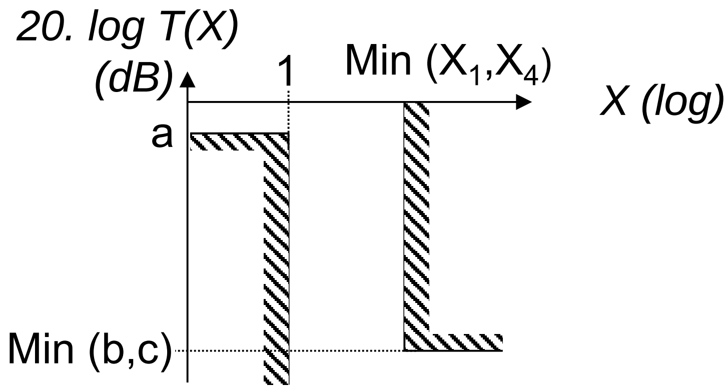
$\log x \rightarrow \log X = - \log x$

Symétrie par rapport à x = 1



Passe-bande ⇔ passe-bas



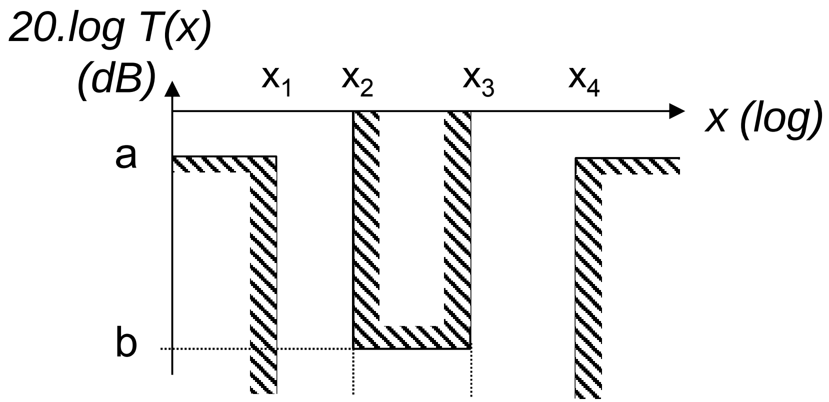


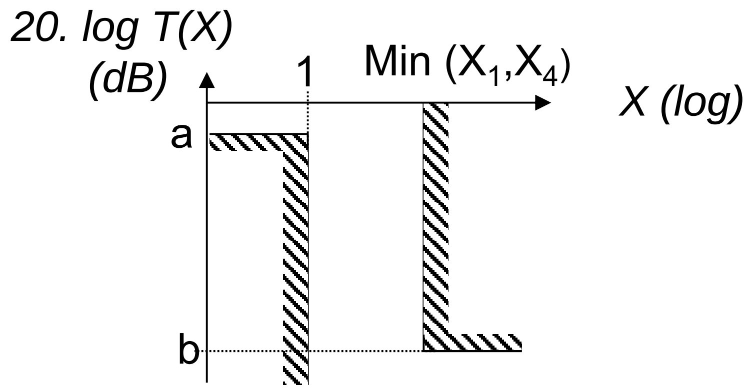
$\underline{s} \rightarrow \underline{S} = (\underline{s} + 1/\underline{s}) / \Delta x$ avec $\Delta x = (f_3 - f_2)/f_0$ et $f_0 = \sqrt{f_2 f_3}$

$$x \rightarrow \quad X = \frac{\left|f^2 - f_0{}^2\right|}{f\,(f_3 - f_2)}$$

Transformations

Coupe-bande ⇔ passe-bas

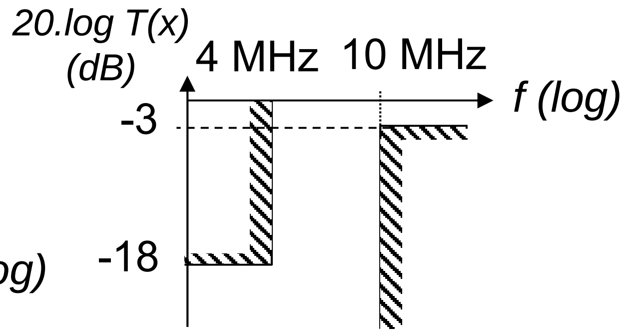




$\underline{s} \rightarrow \underline{S} = \Delta x / (\underline{s} + 1/\underline{s})$ avec $\Delta x = (f_3 - f_2)/f_0$ et $f_0 = \sqrt{f_2 f_3}$

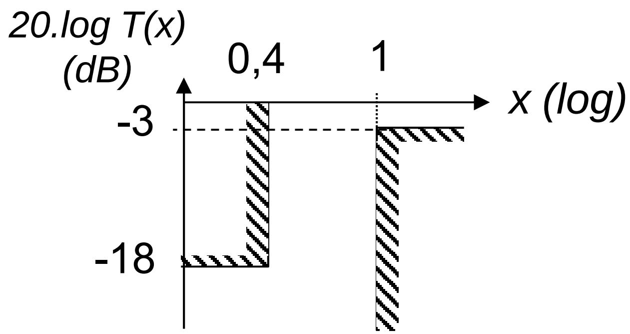
Exemple

Déterminer à l'aide d'un polynôme de Butterworth la fonction de transfert $\underline{T}(\underline{s})$ du filtre passe-haut défini par le gabarit ci-contre :

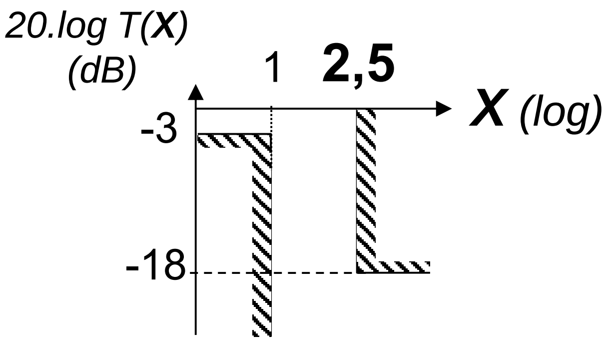


1) Normalisation du gabarit :

f_0=10 MHz



2) Transposition vers le passe-bas correspondant :



3) Étude du filtre passe-bas : n>2,25 donc n=3

$$\underline{T}(\underline{S}) = \frac{1}{(1+\underline{S})\left(1+\underline{S}+\underline{S}^2\right)} = \frac{1}{1+2\underline{S}+2\underline{S}^2+\underline{S}^3}$$

4) Transformation vers le passe-haut :

$$\underline{T}(\underline{s}) = \frac{\underline{s}^3}{1+2\underline{s}+2\underline{s}^2+\underline{s}^3}$$

soit

$$\boxed{\underline{T}(j\omega) = \frac{\left(\frac{j\omega}{\omega_0}\right)^3}{1+2\left(\frac{j\omega}{\omega_0}\right)+2\left(\frac{j\omega}{\omega_0}\right)^2+\left(\frac{j\omega}{\omega_0}\right)^3}}$$

Filtrage analogique

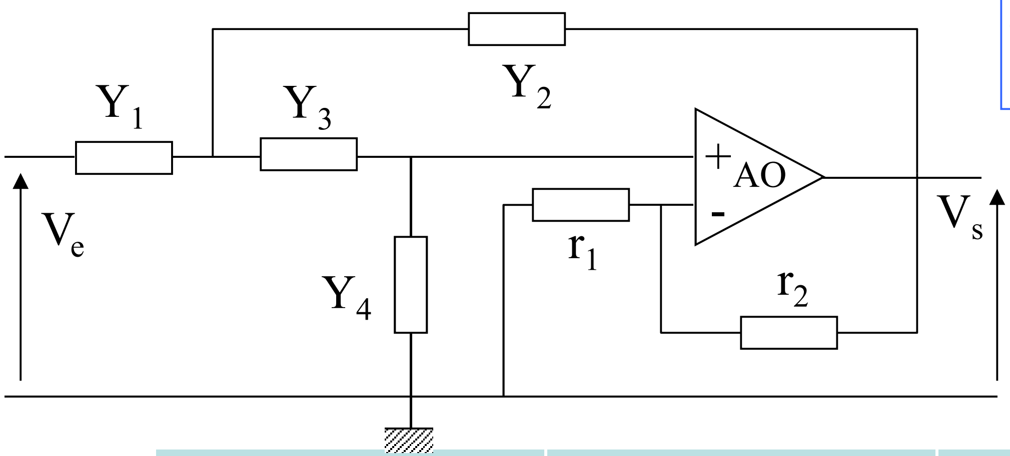
Filtrage actif

- Principe = mise en cascade de cellules élémentaires du second ordre à base d'ALI
- Intérêts
  - cellules élémentaires de faible impédance de sortie (et forte impédance d'entrée) => on peut utiliser la mise en facteur de $\underline{T}(\underline{s})$
  - Conception et mise en œuvre simplifiée
  - Intégration possible (car pas d'inductance)

- Limitations
  - Sensibilité aux variations des valeurs des composants
  - Distorsion du signal : saturation -> excursion limitée
slew rate -> bande passante limitée
  - Nécessite des alimentations continues pour les ALI (consommation d'énergie)
  - Bruit généré par les ALI
  - Risque d'instabilité (systèmes à contre-réaction)

Filtres de Sallen-Key

Cellule de Sallen-Key d'ordre 2



$$\frac{Vs}{Ve} = \frac{K\,Y_1Y_3}{(Y_1+Y_2)(Y_3+Y_4)+Y_3(Y_4-K\,Y_2)}$$

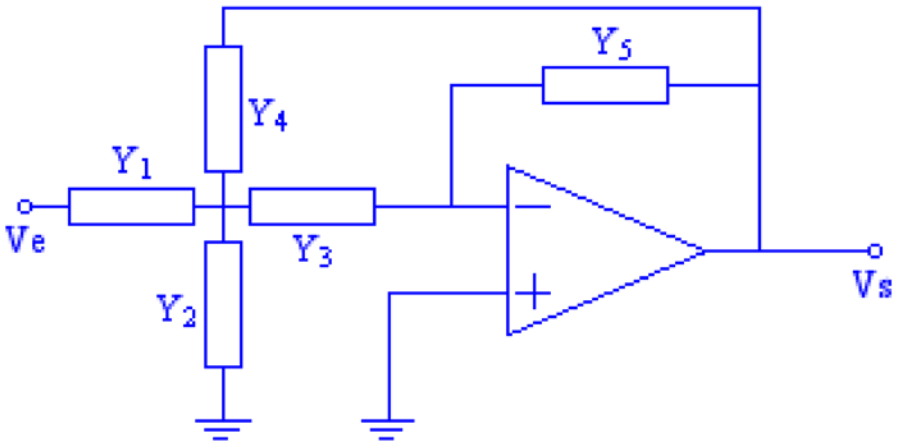
avec $K = 1+r_2/r_1$

On choisit les admittances Y_i (capacités ou résistances) suivant le type de filtre à réaliser

	Passe-bas	Passe-haut	Passe-bande
Résistances	Y_1 et Y_3	Y_2 et Y_4	Y_1, Y_2
Capacités	Y_2 et Y_4	Y_1 et Y_3	Y_3
			Y_4 = R // C

Filtres de Rauch

Cellule de Rauch d'ordre 2



$$\frac{Vs}{Ve} = \frac{-Y_1 Y_3}{Y_5\left(Y_1+Y_2+Y_3+Y_4\right)+Y_3 Y_4}$$

Voir TD pour le calcul

On choisit les admittances Y_i (capacités ou résistances) suivant le type de filtre à réaliser

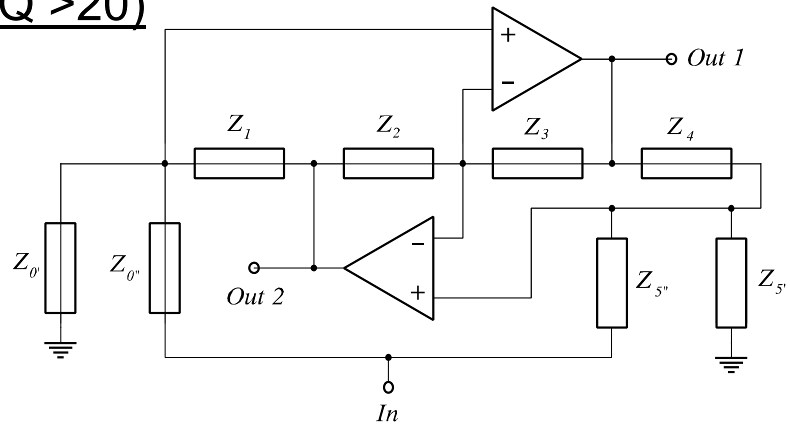
	Passe-bas	Passe-haut	Passe-bande
Résistances	Y_1, Y_3 et Y_4	Y_2 et Y_5	Y_1, Y_2 et Y_5
Capacités	Y_2 et Y_5	Y_1, Y_3 et Y_4	Y_3 et Y_4

Autres types de filtres

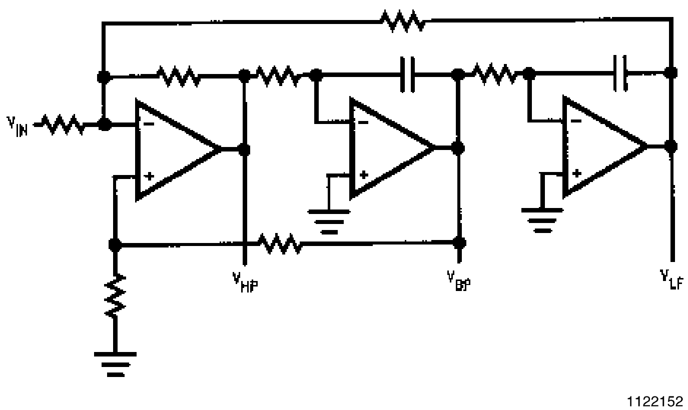
Filtres actifs à convertisseur d'impédance (Q >20)

Exemple : filtre à girateur d'Antoniou

Les impédances Z_i sont des C ou des R

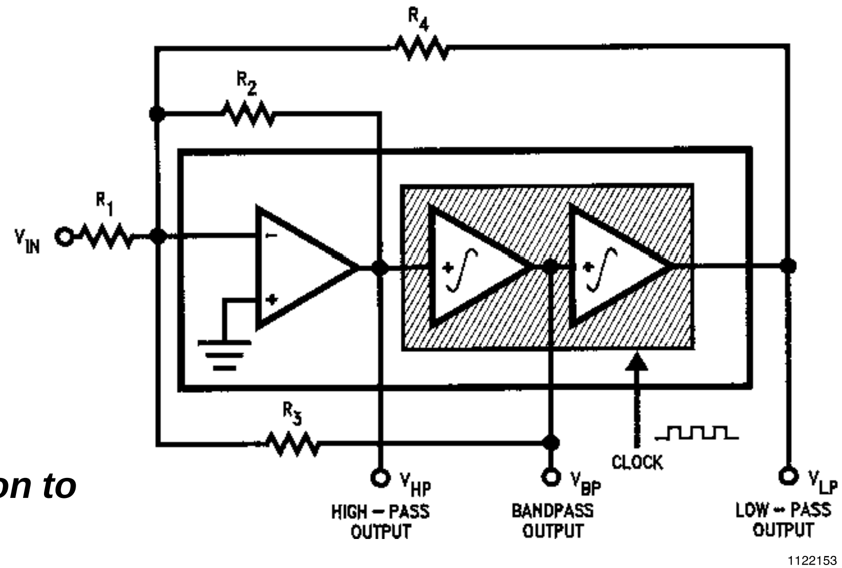


Filtres actifs à variables d'états



(d) Universal State-Variable 2nd-Order Active Filter

Filtres « Capa Com » à variables d'états (MF10)



From TI Application Note 779 A Basic Introduction to Filters - Active, Passive,and Switched Capacitor

Quelle technologie choisir ?

Technologie	Composants	Spécificités	Exemples d'application
Filtres **numériques** (voir cours STNS en 2A)	Circuits logiques intégrés (FPGA, microcontroleur, …)	Signaux numérisés (pré et post filtrage nécessaire !) F < 100MHz (re)programmable Production en grande série possible	
Filtres **passifs**	Composants discrets L et C, Quartz pour les HF	F élevée (< 500MHz) Pas d'alimentation Non intégrable	Anti-repliement Rejection du bruit d'alimentation
Filtres **actifs**	AO, R et C	F < 1 MHz Tension de sortie limitée	Anti-repliement Audio « High Fidelity »
Filtres à **capacité commutée**	AO, interrupteurs commandés MOS, R et C intégrés	F < qq MHz Intégrable Fréquence programmable et précise	Détection de « tonalité » Analyseur de spectre

Comparaison filtre actif - filtre passif

Filtre passif :

-Fonctionne sans alimentation et à des fréquences élevées
-L'utilisation de bobines et de capacités permet d'obtenir tous types de réponse
-Nécessite des bobines : cher (bobine à faible tolérance), encombrant, non-idéal (résistance => facteur de qualité faible en basses fréquences), risque de couplage parasite entre bobines
-Difficulté de mise en œuvre pour les filtres d'ordres élevés (étages dépendants)
-La fonction de transfert dépend de la charge qui doit donc être déterminée très précisément
-Performants jusque 500 MHz

Filtre actif :

-Moins cher en grandes quantités
-Petite taille => parasites moindres
-Intégration possible
-Nécessité d'alimentation de tension, consommation d'énergie
-Excursion du signal limité par la saturation des AO et par le bruit des AO
-Les imperfections des AO à hautes fréquences modifient la fonction de transfert du filtre
-La contre-réaction sur les AO peut conduire à l'instabilité du système
-Utilisation pour des fréquences inférieures à quelques 100 kHz