1

Polytech'Montpellier
Département Electronique, Robotique & Informatique Industrielle
$3^{ème}$ année

Electronique :

Filtrage Analogique

Mariane Comte – 2011-2012

comte@lirmm.fr

2

Plan des séances

- Séance 1 : Filtres passifs et filtres d'ordre élevé
- Séance 2 : Filtres actifs du premier ordre
- Séance 3 : Filtres actifs du 2^{nd} ordre (Sallen-Key 1)
- Séance 4 : Filtres actifs du 2^{nd} ordre (Sallen-Key 2)
- Séance 5 : Filtres actifs du 2^{nd} ordre (Cellule à retours multiples MFB)
- Séance 6 : Filtres biquadratiques et à variable d'état (TT & KHN)
- Séance 7 : Réalisation, caractérisation et validation d'une carte électronique

3

Plan de la séance 1

- Séance 1 : Filtres passifs et filtres d'ordre élevé
  - Introduction et objectifs du cours
  - Généralités sur les fonctions de transfert
  - Généralités sur le filtrage
  - Annexe : Rappels sur les Aop et les systèmes bouclés

4

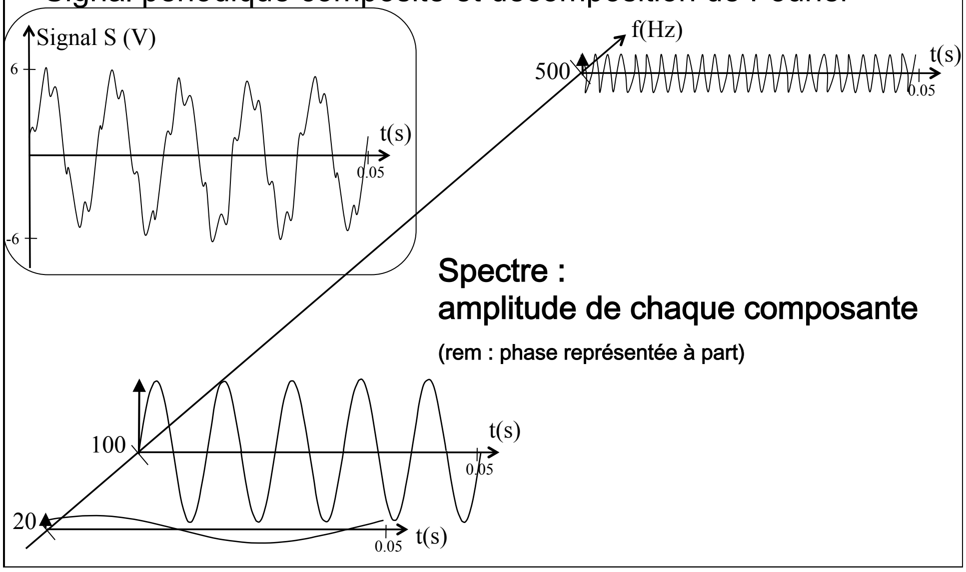
Plan de la séance 1

- Séance 1 : Filtres passifs et filtres d'ordre élevé
  - Introduction et objectifs du cours
  - Généralités sur les fonctions de transfert
  - Généralités sur le filtrage
  - Annexe : Rappels sur les Aop et les systèmes bouclés

5

Introduction

Signal périodique composite et décomposition de Fourier



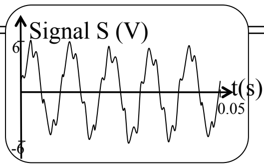
Spectre :
amplitude de chaque composante

(rem : phase représentée à part)

6

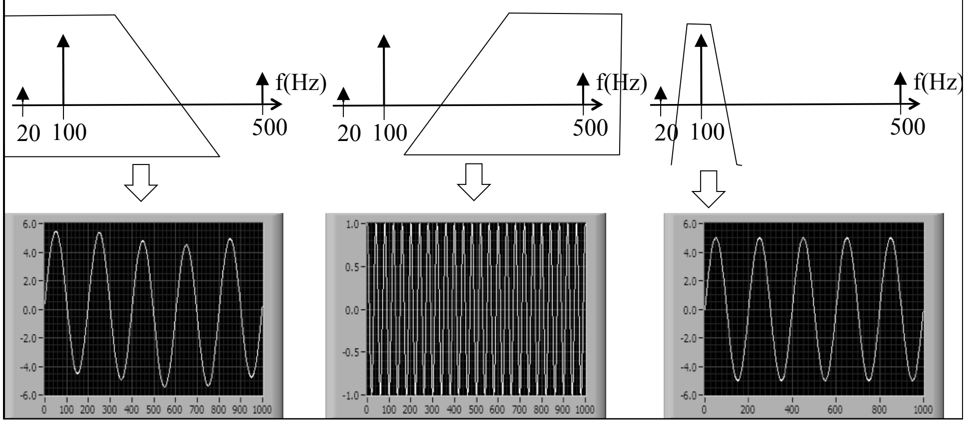
Introduction

A quoi sert le filtrage ?



Opération de traitement du signal :

Atténue certaines composantes d'un signal et en laisse passer d'autres, voire les amplifie.



Introduction

Les filtres que vous connaissez déjà : filtres passifs

- Composants R, L, C
- Types passe-bas, passe-haut, passe-bande, réjecteur, passe-tout (déphaseur)
- 1er ordre et 2ème ordre
- Gain maximal dans la bande passante = 1

Introduction

Les filtres que nous allons voir : filtres actifs

- Composants R, C, Amplificateur opérationnel
- Types passe-bas, passe-haut, passe-bande, réjecteur, passe-tout (déphaseur)
- 1er ordre, 2ème ordre, ordres > 2 (cascades blocs)
- Avantages : gain > 1, intégrables CI (pas de L)
- Inconvénients : BP limitée, sensibilité aux variations des composants, alimentation AOp

9

Introduction

Où trouve-t-on des filtres actifs ?

- Traitement audio (égaliseur…)
- Systèmes automatiques (PID…)
- Traitement signaux capteurs
- …

10

Objectifs du cours

- Savoir calculer et implanter un filtre analogique à base d'AOp, de résistances et de capacités.
- Les filtres d'ordre inférieur ou égal à 2
  - Généralités sur le filtrage
  - Connaître les différentes architectures de filtres actifs du 1er et du 2nd ordre
  - Etre capable de calculer les composants d'une cellule filtre actif à partir d'un cahier des charges
  - Maîtriser les diagrammes asymptotiques de Bode
- ERII 4 : la synthèse de filtres d'ordre supérieur à 2
  et les architectures de filtre pour les circuits intégrés

11

Plan de la séance 1

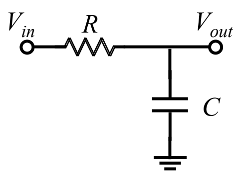
- Séance 1 : Filtres passifs et filtres d'ordre élevé
  - Introduction et objectifs du cours
  - Généralités sur les fonctions de transfert
    - Variable de Laplace et fonctions de transfert
    - Filtres passifs du 1er ordre
    - Fonctions de transfert du 2nd ordre
    - Généralisation
  - Généralités sur le filtrage
  - Annexe : Rappels sur les Aop et les systèmes bouclés

12

Transformation de Laplace

- Domaine temporel

$$V_{in}(t) = V_{out}(t) + RC\frac{dV_{out}(t)}{dt}$$



- Domaine de Laplace et fonction de transfert

$$V_{in}(p) = V_{out}(p) + RCp \cdot V_{out}(p) \Rightarrow F(p) = \frac{V_{out}(p)}{V_{in}(p)} = \frac{1}{1 + RCp}$$

- Régime harmonique :

$$F(j\omega) = \frac{V_{out}(j\omega)}{V_{in}(j\omega)} = \frac{1}{1 + jRC\omega}$$

Représentations d'une fonction de transfert

- Représentations d'un système
  - Polynomiale : $F(p) = k\dfrac{1 + a_1 p + a_2 p^2 + ... + a_n p^n}{1 + b_1 p + b_2 p^2 + ... + b_m p^m}$
    - k est le gain statique
  - Représentation des pôles et des zéros
$$F(p) = k\frac{\prod_{n}^{1}\left(1 - \frac{p}{z_i}\right)}{\prod_{m}^{1}\left(1 - \frac{p}{p_j}\right)}$$

Représentations d'une fonction de transfert

- Régime harmonique : p=jω
- Etude de F(jω)
- Diagramme de Bode
  - diagramme de gain (module en dB)

$$|F(j\omega)|_{dB} = 20 \cdot \log|F(j\omega)| \qquad |F \cdot G|_{dB} = 20 \cdot \log|F| + 20 \cdot \log|G|$$
$$|a + jb| = \sqrt{a^2 + b^2} \qquad |F / G|_{dB} = 20 \cdot \log|F| - 20 \cdot \log|G|$$

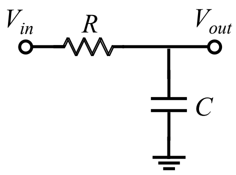
  - diagramme de phase (argument)

$$\Phi(a + jb) = Arctg\left(\frac{b}{a}\right)$$
$$\Phi(F \cdot G) = \Phi(F) + \Phi(G)$$
$$\Phi(F / G) = \Phi(F) - \Phi(G)$$

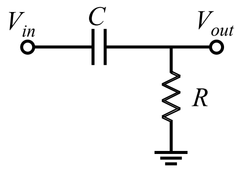
définie dans l'intervalle [-90°;+90°] modulo 180°

15

Filtres passifs du 1^er ordre (TD1-exo1)



$$F(j\omega) = \frac{V_{out}(j\omega)}{V_{in}(j\omega)} = \frac{1}{1 + j\dfrac{\omega}{\omega_0}}$$



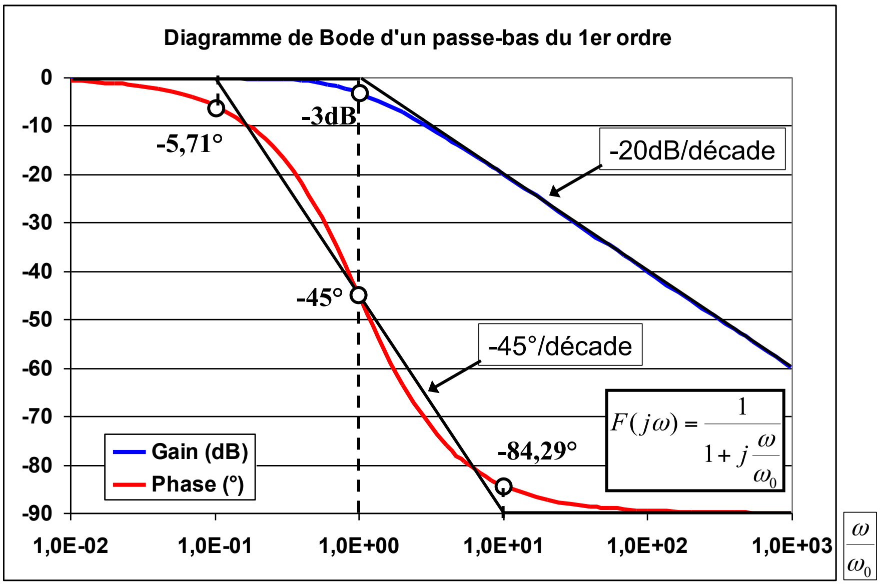
$$F(j\omega) = \frac{V_{out}(j\omega)}{V_{in}(j\omega)} = \frac{j\dfrac{\omega}{\omega_0}}{1 + j\dfrac{\omega}{\omega_0}}$$

Diagrammes asymptotiques de Bode ?

$$\frac{\omega}{\omega_0} \rightarrow 0 \qquad \frac{\omega}{\omega_0} = 1 \qquad \frac{\omega}{\omega_0} \rightarrow \infty$$

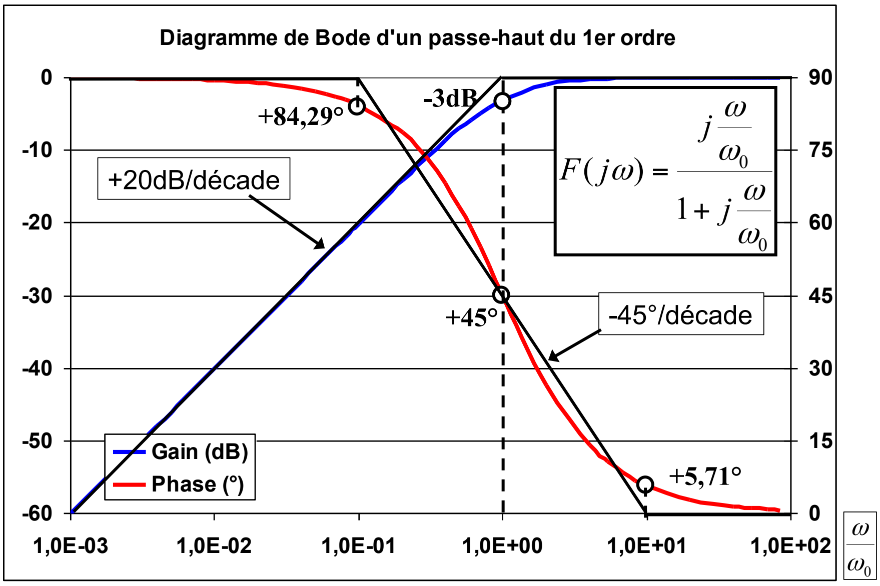
16

Passe-bas du 1^er ordre



17

Passe-haut du 1er ordre



18

Fonctions de transfert du 2nd ordre

- Forme générale d'un 2nd ordre

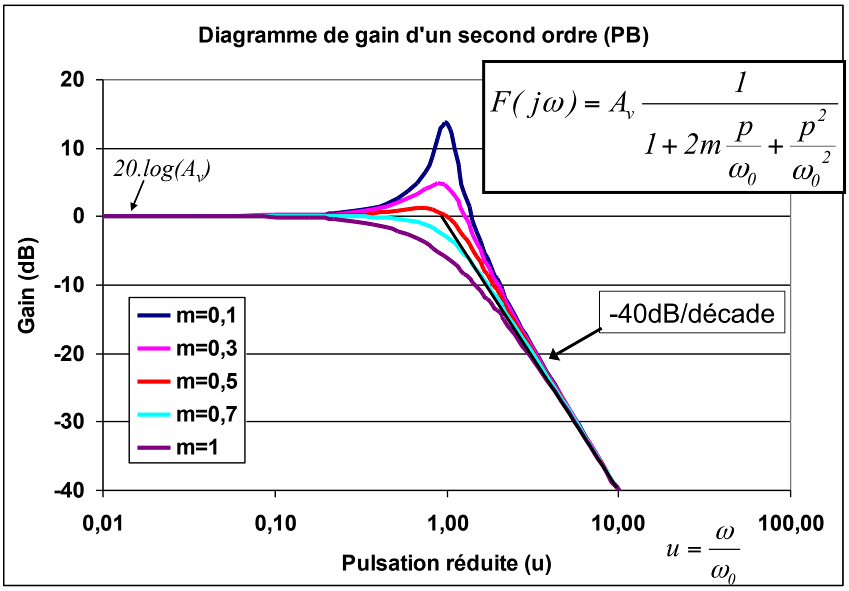
$$F(p)=\frac{V_{out}(p)}{V_{in}(p)}=A_v\frac{k_2p^2+k_1p+k_0}{\omega_0^2+2m\omega_0p+p^2}$$

- Passe-bas : $k_1=k_2=0$; $k_0=\omega_0^2$
- Passe-bande : $k_0=k_2=0$; $k_1=2m\omega_0$
- Passe-haut : $k_0=k_1=0$; $k_2=1$
- Réjecteur : $k_1=0$; $k_0=\omega_0^2$; $k_2=1$

Diagrammes asymptotiques de Bode ?

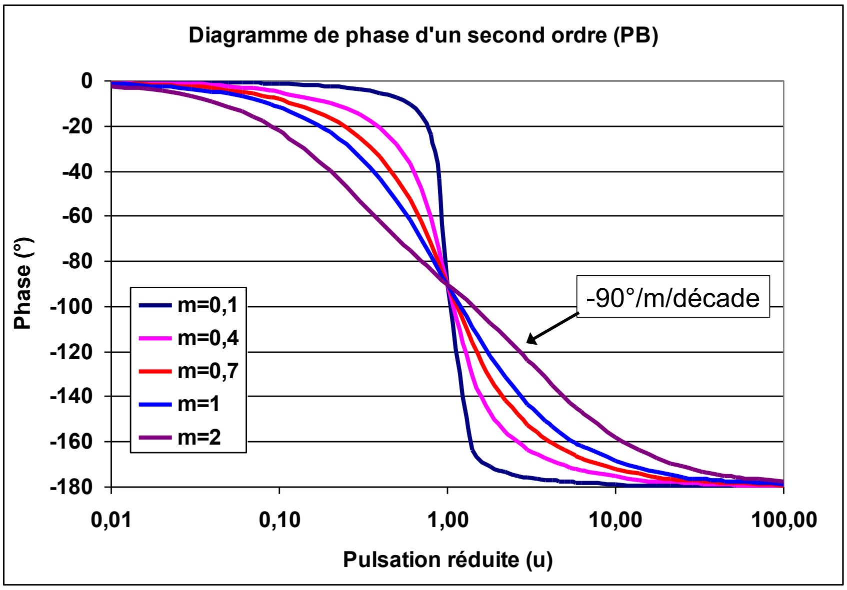
19

Passe-bas du 2nd ordre



20

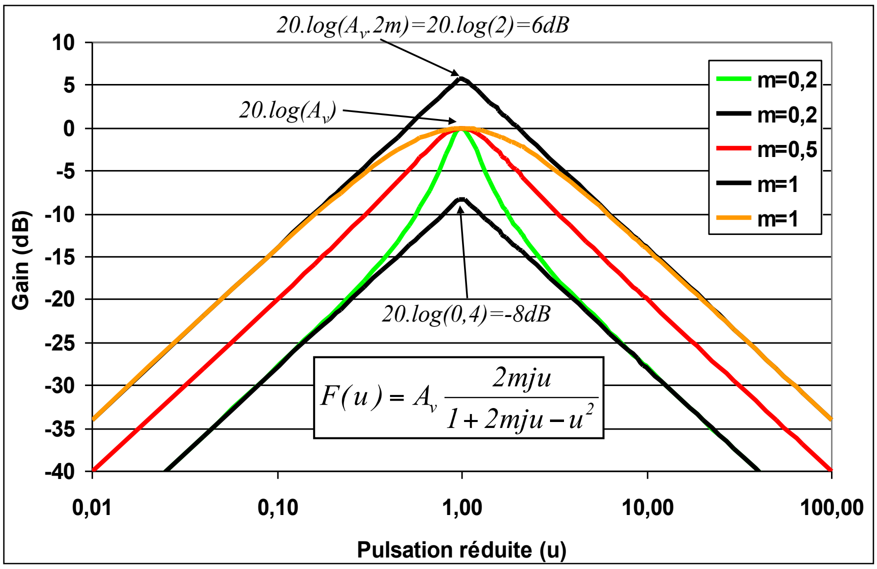
Passe-bas du 2nd ordre



21

Passe-bande du 2nd ordre

POLYTECH MONTPELLIER



22

Plan de la séance 1

POLYTECH MONTPELLIER

- Séance 1 : Filtres passifs et filtres d'ordre élevé
  - Introduction et objectifs du cours
  - Généralités sur les fonctions de transfert
  - Généralités sur le filtrage
    - Spectre et filtrage
    - Intérêt des filtres actifs
  - Annexe : Rappels sur les Aop et les systèmes bouclés

23

Spectre et filtrage

POLYTECH MONTPELLIER

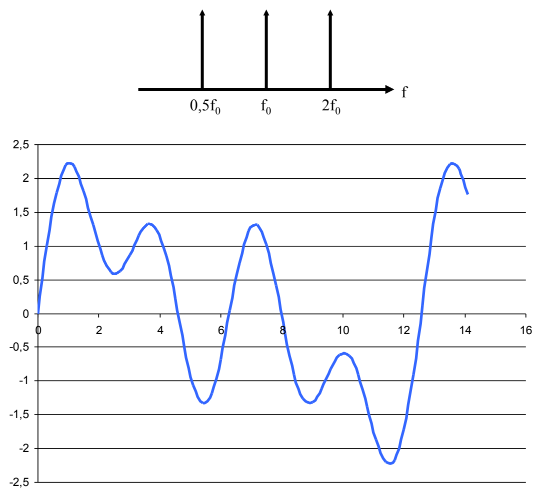
- Un filtre est défini par sa fonction de transfert qui permet de connaître
  - La réponse harmonique $Y(p)=F(p).X(p)$
  - La réponse temporelle $Y(t)=L^{-1}[F(p).X(p)]$

- Un filtre est dit linéaire s'il ne fait apparaître aucune composante spectrale dans le signal de sortie

24

Spectre et filtrage

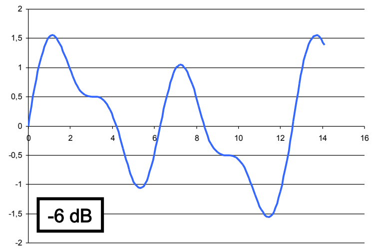
POLYTECH MONTPELLIER

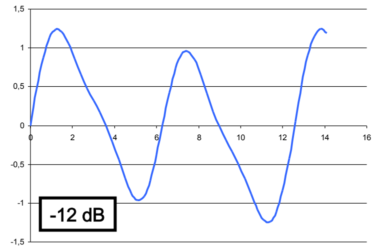


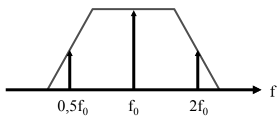
Récupérer la raie centrale => Atténuation des raies latérales

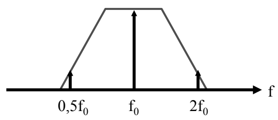
25

Spectre et filtrage





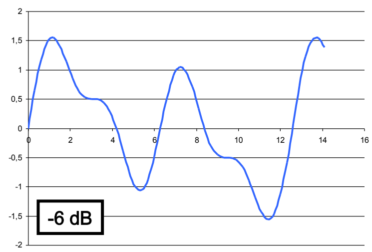


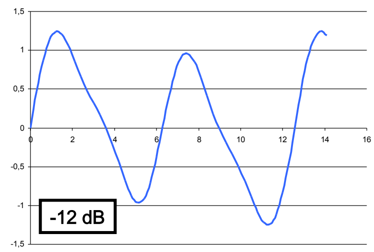


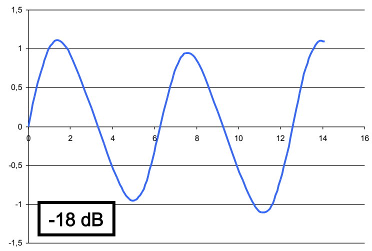
Filtrage => Atténuation des raies latérales + déphasage (retard ou avance)

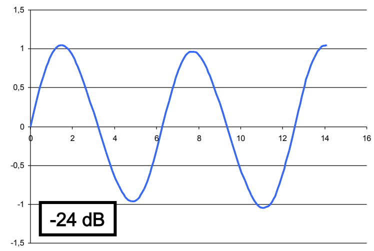
26

Spectre et filtrage









Filtrage => Atténuation des raies latérales + déphasage (retard ou avance)

27

Spectre et filtrage

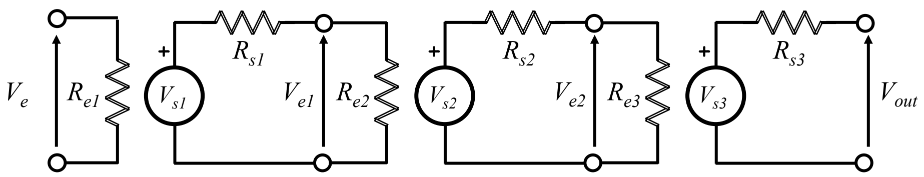
- Dans l'exemple précédent, on voit qu'il est nécessaire d'atténuer fortement les raies latérales pour obtenir un signal sinusoïdal pur en sortie du filtre

=> nécessité de réaliser des <u>filtres d'ordre élevé</u>

28

Intérêt des filtres actifs (TD1-exo2)

- Décrire la mise en cascade de 3 étages amplificateurs de tension représentés par le modèle classique « résistance d'entrée + générateur de Thévenin »



$V_{s1} = A_1 \cdot V_e \qquad V_{s2} = A_2 \cdot V_{e1} \qquad V_{s3} = A_3 \cdot V_{e2}$

$$\frac{V_{out}}{V_e} = ?$$

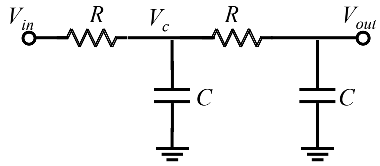
- Quelle est la condition nécessaire et suffisante pour que :

$$A = \frac{V_{out}}{V_e} = A_1 A_2 A_3\ ?$$

29

Intérêt des filtres actifs (TD1-exo3)

- Exemple :



  - Fonction de transfert obtenue ? $F(p) = \cancel{\dfrac{1}{(1+\tau p)^2}}$?
  - Condition d'impédance non vérifiée !!!

$$\frac{Z_{out}(p)}{Z_{in}(p)} = \frac{\tau p}{(1+\tau p)^2} \to \frac{1}{2} \qquad F(p) = \frac{1}{(1+\tau p)^2 + \tau p}$$

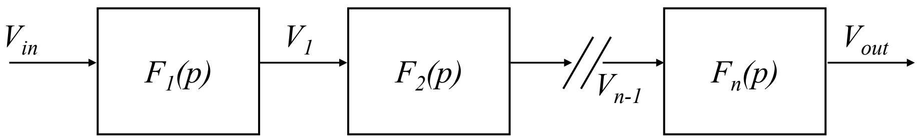
$$\omega \to \frac{1}{\tau}$$

Solution ?

30

Intérêt des filtres actifs

- Mise en cascade de systèmes



  - Résistances d'entrées élevées
  - Résistances de sorties nulles

$\left.\right\}$ Adaptation d'impédance

$$F(p) = \frac{V_{out}(p)}{V_{in}(p)} = \prod_{n}^{1} F_i(p)$$

31

Intérêt des filtres actifs

- Il est trop difficile de faire des filtres d'ordre élevé avec des filtres passifs (problème d'adaptation d'impédances : la fonction de transfert d'une cascade de cellules n'est pas le produit des fonctions des cellules)
- Les filtres passifs ne permettent pas d'introduire du gain

=> Intérêt des filtres actifs

32

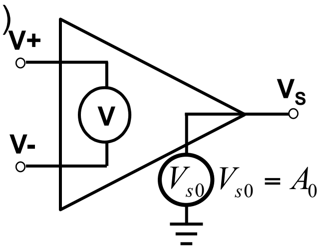
Plan de la séance 1

- Séance 1 : Filtres passifs et filtres d'ordre élevé
  - Introduction et objectifs du cours
  - Généralités sur les fonctions de transfert
  - Généralités sur le filtrage
  - Annexe : Rappels sur les Aop et les systèmes bouclés

33

Rappels : l'AOp idéal

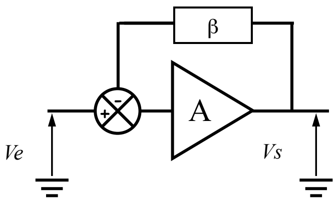
- Etage d'entrée
  - voltmètre idéal : différentiel, flottant, circuit ouvert (Re = ∞)
- Etage de sortie
  - générateur de tension
    - idéal (Rs = 0)
    - référencé (gnd)
  - gain différentiel A_0 infini
- Quelques limites
  - saturation, courants de polarisation en entrée, résistance de sortie non nulle, gain fini, produit gain-bande, slew-rate…



$$V_{s0} = A_0(V_+ - V_-)$$

34

Rappels : systèmes bouclés



$$G = \frac{A}{1+\beta A}$$

- Propriétés générales des systèmes bouclés
  - Stabilisation du gain, $\frac{dG}{G} = \frac{1}{1+\beta A}\frac{dA}{A}$
  - élargissement de la bande passante,
  - amélioration de la linéarité,
  - rapport signal sur bruit,
  - résistance d'entrée et résistance de sortie.

35

Polytech'Montpellier
Département Electronique, Robotique & Informatique Industrielle
3ème année

Electronique : Filtrage Analogique

Séance 2 : Filtres actifs du premier ordre

Mariane Comte – 2011-2012

comte@lirmm.fr

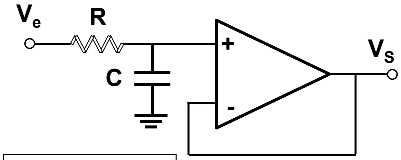
36

Plan de la séance 2

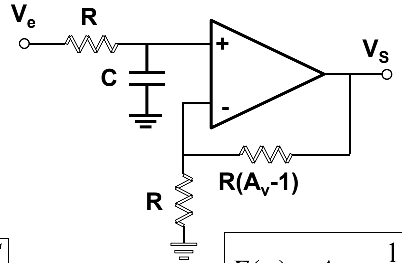
- Séance 2 : Filtres actifs du premier ordre
  - Passe-bas et passe-haut
    - Non-inverseur de gain unitaire
    - Non-inverseur avec gain
    - Inverseur avec gain
  - Intégrateur pur
  - Dérivateur pur
  - Décaleur de phase

37

Filtres actifs passe-bas du 1er ordre

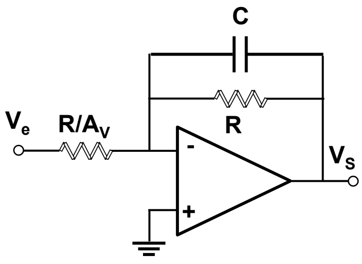


$$F(p) = \frac{1}{1+\tau p}$$



$$\tau = RC$$

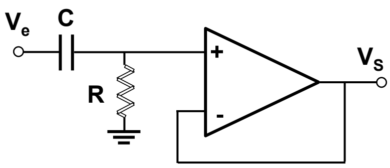
$$F(p) = A_V \cdot \frac{1}{1+\tau p}$$



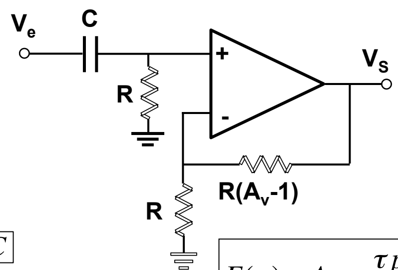
$$F(p) = -A_V \cdot \frac{1}{1+\tau p}$$

38

Filtres actifs passe-haut du 1er ordre

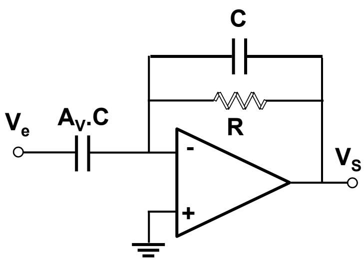


$$F(p) = \frac{\tau p}{1+\tau p}$$



$$\tau = RC$$

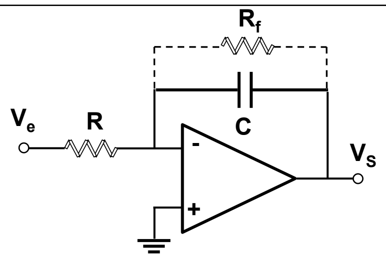
$$F(p) = A_V \cdot \frac{\tau p}{1+\tau p}$$



$$F(p) = -A_V \cdot \frac{\tau p}{1+\tau p}$$

Intégrateur pur

POLYTECH MONTPELLIER



$$\boxed{\tau = RC}$$

$$\boxed{F(p) = -\frac{1}{\tau p}}$$

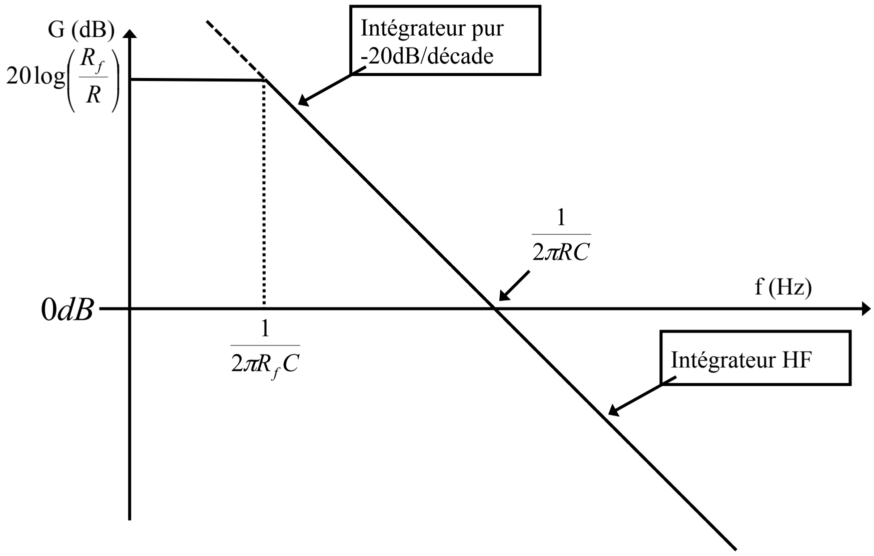
$$F(p) = -\frac{R_f}{R}\frac{1}{1+R_f C p}$$

- Intégration sur toute la bande de fréquence
- Offset ⇒ saturation
  - → Raz grâce à R_f >>R ou interrupteur

→ Limitation du gain BF
  - → Passe-bas avec gain (intégration HF)

Intégrateur : réponse en fréquence

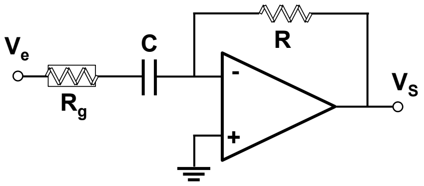
POLYTECH MONTPELLIER



41

Dérivateur pur

$\boxed{\tau = RC}$



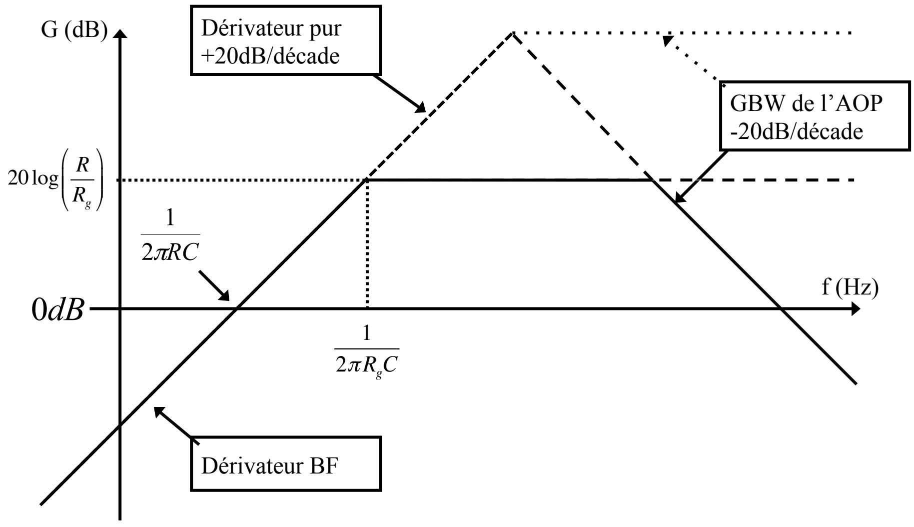
$$\boxed{F(p) = -\tau p}$$

$$F(p) = -\frac{R}{R_g}\frac{R_g C p}{1 + R_g C p}$$

- Dérivateur sur toute la bande de fréquence
- Limitations du gain HF
  1. Bande passante de l'AOP
     → Passe-haut avec gain (dérivation BF)
  2. Résistance de sortie R_g du générateur de tension V_e
     → Passe-bande avec gain (dérivation BF et intégration HF)

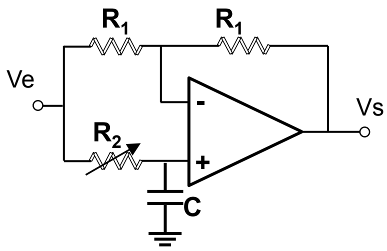
42

Dérivateurs : réponse en fréquence



43

Décaleurs de phase



- Pont diviseur en V^+
- Loi des nœuds en V^-
- $V^- = V^+$ et $\tau = R_2C$

$$V_+ = \frac{1}{1+R_2Cp} \cdot V_e$$

$$V- = \frac{V_e}{2} + \frac{V_s}{2} = V_+$$

$$\Rightarrow \frac{V_s}{V_e} = \frac{1-\tau p}{1+\tau p} \Leftrightarrow \frac{V_s(j\omega)}{V_e(j\omega)} = \frac{1-j\omega\tau}{1+j\omega\tau}$$

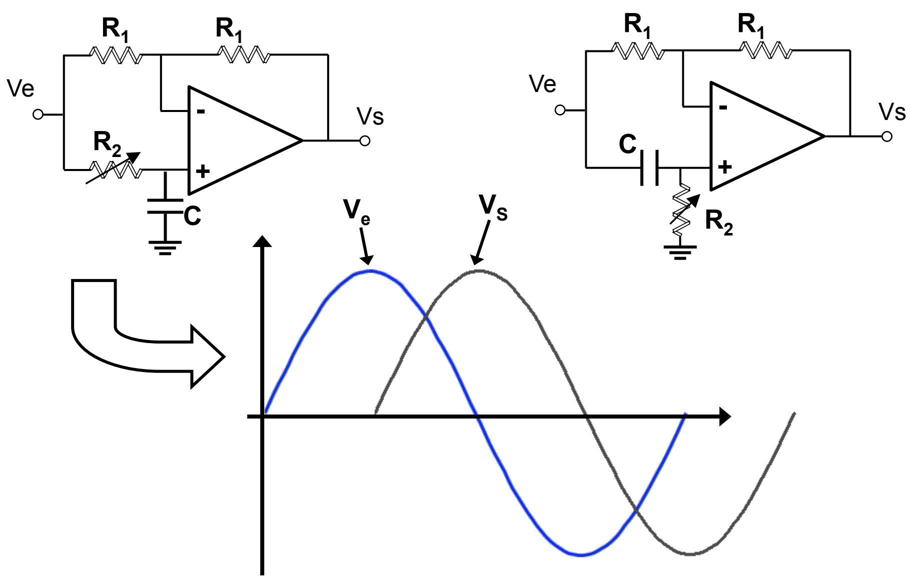
$$\left|\frac{V_s(j\omega)}{V_e(j\omega)}\right| = \frac{\sqrt{1+\omega^2\tau^2}}{\sqrt{1+\omega^2\tau^2}} = 1$$

$$\varphi\left(\frac{V_s(j\omega)}{V_e(j\omega)}\right) = Arctg(-\omega\tau) - Arctg(\omega\tau)$$

$$\Rightarrow \varphi\left(\frac{V_s(j\omega)}{V_e(j\omega)}\right) = -2Arctg\left(f/f_c\right)$$

44

Décaleurs de phase



Polytech'Montpellier
Département Electronique, Robotique & Informatique Industrielle
3ème année

Electronique : Filtrage Analogique

Séance 3 :
Filtres actifs du second ordre : Sallen-Key (1/2)

Mariane Comte – 2011-2012

comte@lirmm.fr

Limitation d'un filtre du 2nd ordre réalisé avec deux filtres du 1er ordre

- La mise en cascade de deux blocs du premier ordre conduit à une fonction de transfert du 2nd ordre :

$$F(p) = \frac{H(p)}{(1+\tau_1 p)(1+\tau_2 p)} = \frac{H(p)}{1+\frac{2m}{\omega_0}p+\frac{p^2}{\omega_0^{\,2}}}$$

- Ce qui donne par identification :

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{\tau_1\tau_2}} \quad et \ m = \frac{\tau_1+\tau_2}{2\sqrt{\tau_1\tau_2}} \quad \text{dont l'extremum est donné par } \frac{\partial m}{\partial \tau_1} = 0$$

$$\frac{\partial m}{\partial \tau_1} = \frac{\tau_1\tau_2 - \tau_2^2}{4\tau_1\tau_2\sqrt{\tau_1\tau_2}} = 0 \Rightarrow \tau_1 = \tau_2 \Rightarrow m = 1\,(\text{minimum})$$

=> Architectures dédiées pour filtres résonants / sélectifs

47

Filtres analogiques actifs du 2nd ordre

POLYTECH MONTPELLIER

- Filtres actifs du 2nd ordre
  - séance 3 / séance 4: – Filtres de Sallen-Key (passe-bas, passe-haut, passe-bande, réjecteur)
  - séance 5: – Filtres à retours multiples (passe-bande)
  - séance 6:
    – Filtre Biquadratique (deux fonctions)
    – Filtre à variable d'état (trois fonctions)
    – Résumé

48

Rappel

POLYTECH MONTPELLIER

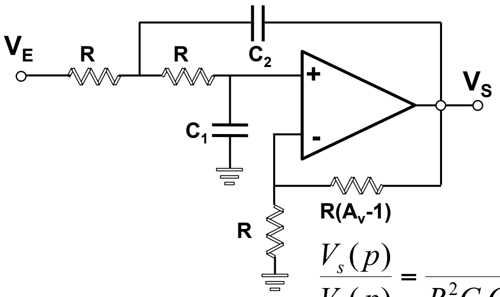
- Forme générale d'un 2nd ordre

$$H(p) = A_v.\frac{k_2 p^2 + k_1 p + k_0}{p^2 + \frac{\omega_0}{Q} p + \omega_0^{\ 2}}$$

- Passe-bas : $k_1=k_2=0$; $k_0=\omega_0^2$
- Passe-bande : $k_0=k_2=0$; $k_1=2m\omega_0=\omega_0/Q$
- Passe-haut : $k_0=k_1=0$; $k_2=1$
- Réjecteur : $k_1=0$; $k_0=\omega_0^2$; $k_2=1$

49

Cellule passe-bas de Sallen-Key



$$\frac{V_s(p)}{V_e(p)} = A_v \cdot \frac{\omega_0^2}{p^2 + \frac{\omega_0}{Q}p + \omega_0^2}$$

$$\frac{V_s(p)}{V_e(p)} = \frac{A_v}{R^2C_1C_2p^2 + (2RC_1 + RC_2 - A_vRC_2)p + 1}$$

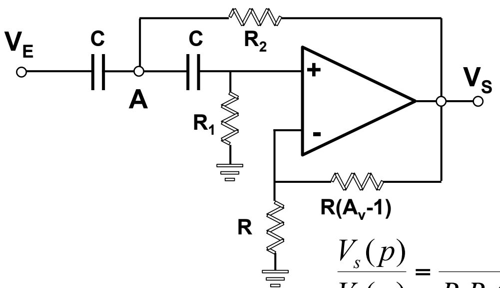
Deux types d'implantation :

1) $A_v = 1 \Rightarrow \omega_0^2 = \frac{1}{R^2C_1C_2} \Rightarrow \omega_0 = \frac{1}{R\sqrt{C_1C_2}}$ et $Q = \frac{1}{2m} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{C_2}{C_1}}$

2) $C_1 = C_2 \Rightarrow \omega_0 = \frac{1}{RC}$ et $Q = \frac{1}{2m} = \frac{1}{3 - A_v} \quad \Rightarrow \frac{\partial Q}{Q} = A_vQ\frac{\partial A_v}{A_v}$

50

Cellule passe-haut de Sallen-Key



$$\frac{V_s(p)}{V_e(p)} = A_v \cdot \frac{p^2}{p^2 + \frac{\omega_0}{Q}p + \omega_0^2}$$

$$\frac{V_s(p)}{V_e(p)} = \frac{A_vR_1R_2C^2p^2}{R_1R_2C^2p^2 + (2R_2C + R_1C - A_vR_1C)p + 1}$$

Deux types d'implantation :

1) $A_v = 1 \Rightarrow \omega_0 = \frac{1}{C\sqrt{R_1R_2}}$ et $Q = \frac{1}{2m} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{R_1}{R_2}}$

2) $R_1 = R_2 \Rightarrow \omega_0 = \frac{1}{R_1C}$ et $Q = \frac{1}{2m} = \frac{1}{3 - A_v}$

Polytech'Montpellier
Département Electronique, Robotique & Informatique Industrielle
3ème année

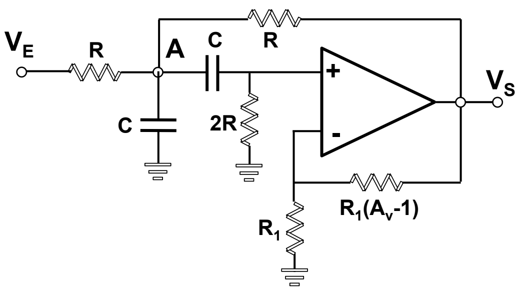
Electronique : Filtrage Analogique

Séance 4 :
Filtres actifs du second ordre : Sallen-Key (2/2)

Mariane Comte – 2011-2012

comte@lirmm.fr

Filtre passe-bande de Sallen-Key



- Pont diviseur en V^-
- Pont diviseur en V^+
- Loi des nœuds en A
- $V^- = V^+$ et $\tau = RC$

$$\frac{V_s(p)}{V_e(p)} = G \cdot \frac{\frac{\omega_0}{Q} p}{p^2 + \frac{\omega_0}{Q} p + \omega_0^2}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{RC} \text{ et } Q = \frac{1}{2m} = \frac{1}{3 - A_v}$$

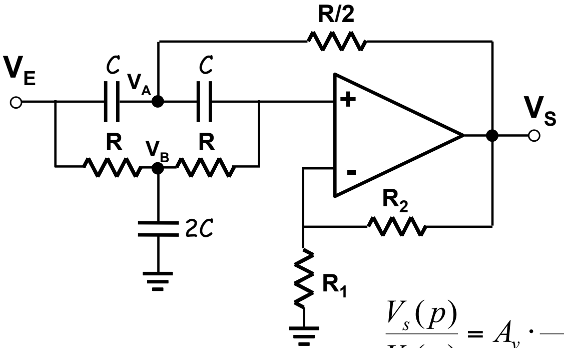
$$G = \frac{A_v}{3 - A_v} = A_v Q$$

53

Filtre réjecteur de Sallen-Key

- « Notch filter »
  - Rejeter une fréquence
  - Q < 10 donc A_v < 1.95

$$\frac{V_s(p)}{V_e(p)} = A_v \cdot \frac{p^2 + \omega_0^2}{p^2 + \frac{\omega_0}{Q} p + \omega_0^2}$$



$$A_v = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

$$Q = \frac{0{,}5}{2 - A_v}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$\frac{V_s(p)}{V_e(p)} = A_v \cdot \frac{p^2 + \frac{1}{\tau^2}}{p^2 + \frac{p}{\tau}(4 - 2A_v) + \frac{1}{\tau^2}}$$

54

Polytech'Montpellier
Département Electronique, Robotique & Informatique Industrielle
3ème année

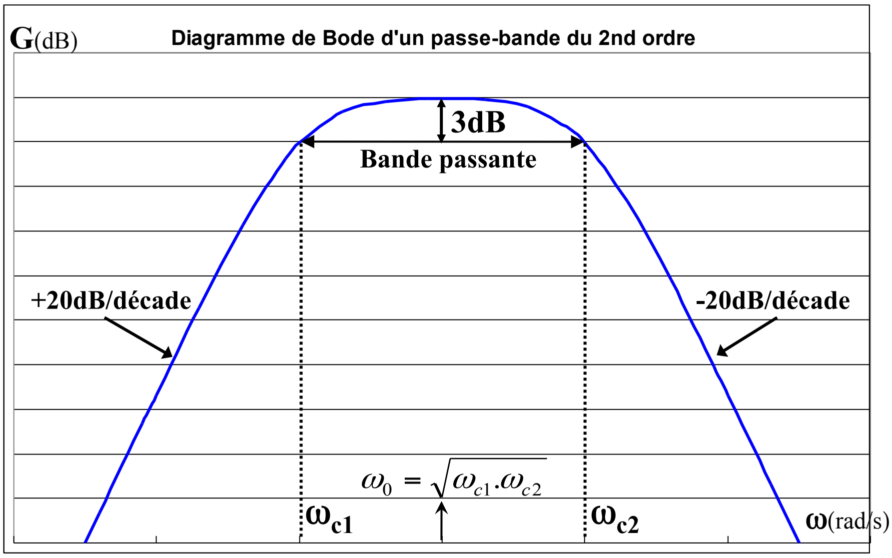
Electronique : Filtrage Analogique

Séance 5
Filtres actifs du second ordre :
Filtres à retours multiples (MFB) – passe-bande

Mariane Comte – 2011-2012
comte@lirmm.fr

55

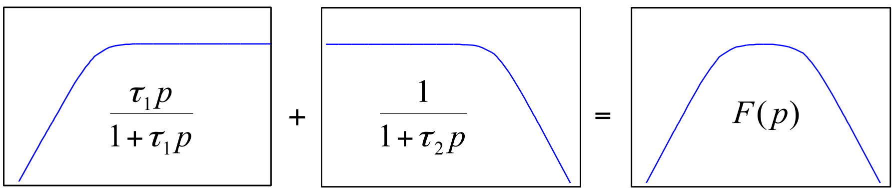
Filtres Passe-Bande du 2nd ordre



56

Filtres Passe-Bande du 2nd ordre

- Cas d'un filtre à large bande passante (m>1) : cascade de deux cellules du 1er ordre
  - Passe-haut de constante de temps τ_1
  - Passe-bas de constante de temps τ_2
  - Calcul de F(p) dans le cas général : $F(p) = \dfrac{\tau_1 p}{1+(\tau_1+\tau_2)p+\tau_1\tau_2 p^2}$



57

Filtres Passe-Bande du 2nd ordre

- Identification de la fonction de transfert

$$F(p)=\frac{\tau_1 p}{1+(\tau_1+\tau_2)p+\tau_1\tau_2 p^2}=\frac{G.\frac{\omega_0}{Q}p}{p^2+\frac{\omega_0}{Q}p+\omega_0^{\,2}}$$

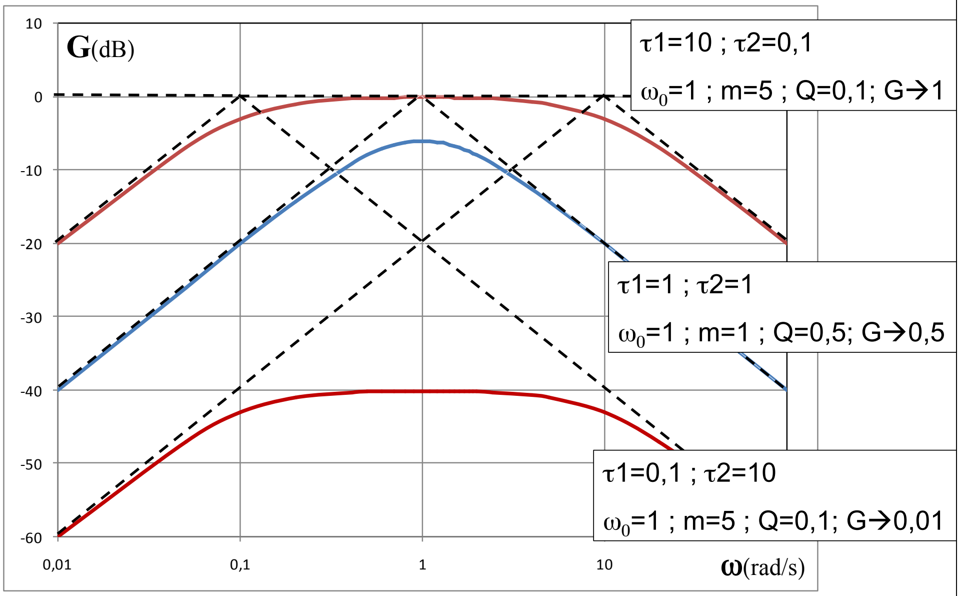
$$\Rightarrow \omega_0=\frac{1}{\sqrt{\tau_1\tau_2}} \Rightarrow m=\frac{\tau_1+\tau_2}{2\sqrt{\tau_1\tau_2}} \Rightarrow G=\frac{\tau_1}{\tau_1+\tau_2}$$

$$\Rightarrow m\geq 1 \Leftrightarrow Q\leq \frac{1}{2}$$

$$\Rightarrow G<1$$

58

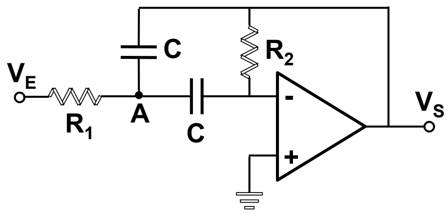
Filtres Passe-Bande du 2nd ordre



59

Filtre Passe-Bande à retours multiples

- Filtre à bande étroite (Q élevé), cellule du 2nd ordre à retours multiples (*Multiple FeedBack* ou MFB)



$$\frac{V_s(p)}{V_e(p)} = -\frac{\frac{p}{R_1 C}}{p^2 + 2\frac{p}{R_2 C} + \frac{1}{R_1 R_2 C^2}}$$

$$\frac{V_s(p)}{V_e(p)} = A_v \cdot \frac{\frac{\omega_0}{Q} p}{p^2 + \frac{\omega_0}{Q} p + \omega_0^2}$$

$$\begin{cases} A_v = -\dfrac{R_2}{2R_1} \\ \omega_0 = \dfrac{1}{C\sqrt{R_1 R_2}} \\ Q = \dfrac{1}{2m} = \dfrac{1}{2}\sqrt{\dfrac{R_2}{R_1}} \end{cases}$$

60

Filtre Passe-Bande à retours multiples

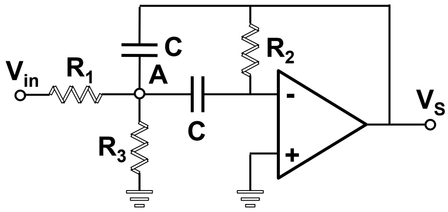
- Q et Av sont liés entre eux et dépendent du rapport de résistance. La fréquence centrale est réglable de manière indépendante.

$\frac{R_2}{R_1}$	¼	16	100	400
$A_v = -\frac{R_2}{2R_1}$	-1/8	-8	-50	-200
$Q = \frac{1}{2m} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{R_2}{R_1}}$	¼	2	5	10

61

Filtre Passe-Bande à retours multiples

- Structure alternative pour coefficient de qualité très élevé
  - Calcul du générateur de thévenin équivalent à V_{in}, R_1, R_3



$$V_{th} = V_{in}\frac{R_3}{R_1+R_3}$$

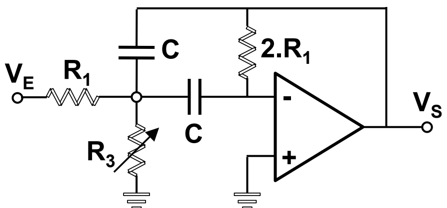
$$R_{th} = \frac{R_1 R_3}{R_1+R_3}$$

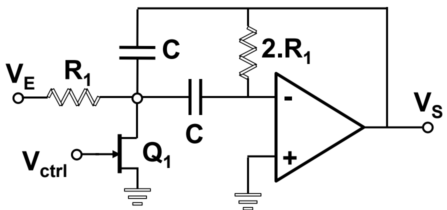
$$\begin{cases} \frac{V_S}{V_{th}} = -\frac{R_2}{2R_{th}} \Rightarrow \frac{V_S}{V_{in}} = -\frac{R_2}{2R_{th}}\cdot\frac{R_3}{R_1+R_3} = -\frac{R_2}{2R_1} \\ \omega_0 = \frac{1}{C\sqrt{R_{th}R_2}} = \frac{1}{C\sqrt{R_1R_2}}\sqrt{1+\frac{\mathrm{R}_1}{\mathrm{R}_3}} \\ Q = \frac{1}{2m} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{R_2}{R_{th}}} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{R_2}{R_1}}\sqrt{1+\frac{\mathrm{R}_1}{\mathrm{R}_3}} \end{cases}$$

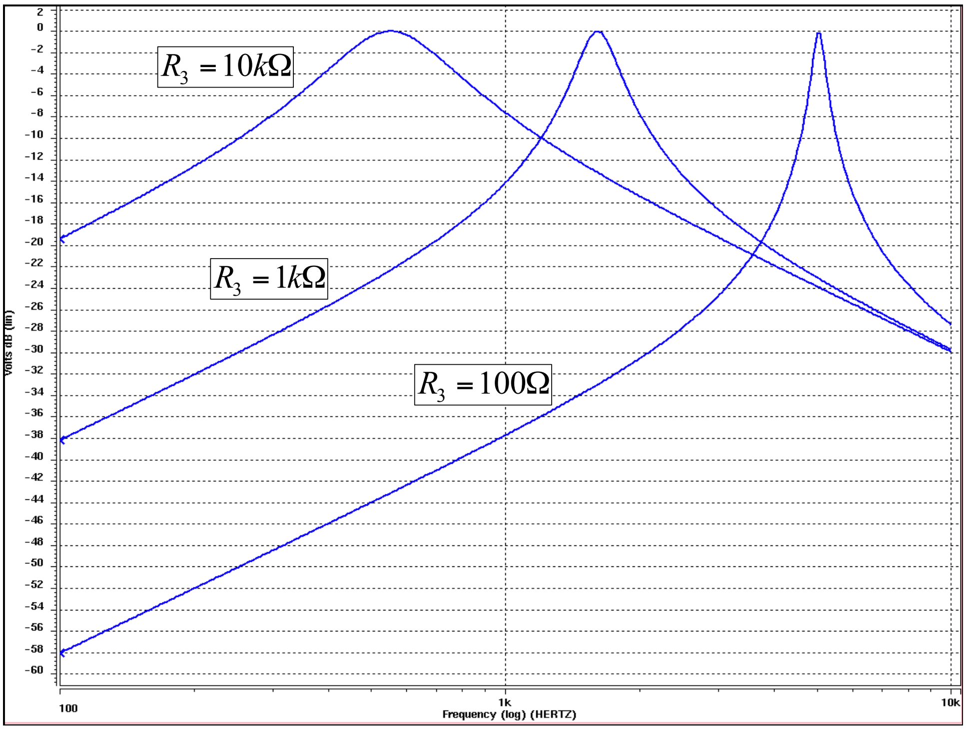
62

Filtre Passe-Bande à retours multiples

- Structures alternatives pour ajustement de la fréquence centrale.







64

Polytech'Montpellier
Département Electronique, Robotique & Informatique Industrielle
3ème année

Electronique : Filtrage Analogique

Séance 6
Filtres actifs du second ordre :
Filtres biquadratiques (TT) et à variable d'état (KHN)

Mariane Comte – 2011-2012
comte@lirmm.fr

65

Rappel

- Forme générale d'un 2^{nd} ordre

$$H(p) = A_V.\frac{k_0 + k_1 p + k_2 p^2}{1 + \frac{p}{\omega_0 Q} + \frac{p^2}{\omega_0^2}}$$

- Passe-bas : $k_1=k_2=0$; $k_0=1$
- Passe-bande : $k_0=k_2=0$; $k_1=\frac{1}{\omega_0 Q}$
- Passe-haut : $k_0=k_1=0$; $k_2=\frac{1}{\omega_0^2}$
- Réjecteur : $k_1=0$; $k_0=1$; $k_2=\frac{1}{\omega_0^2}$

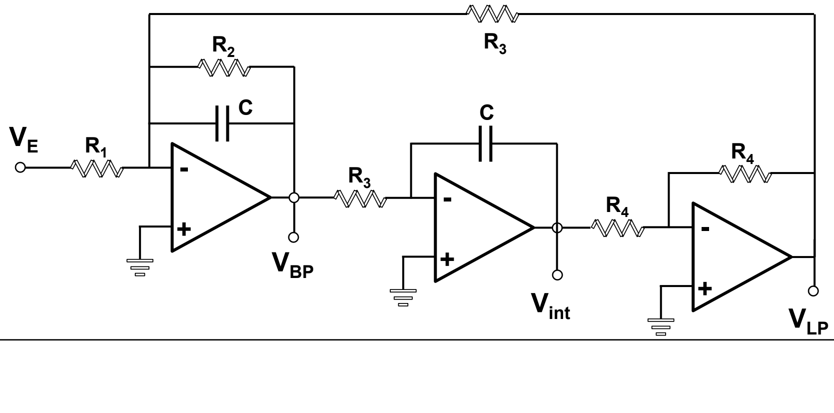
66

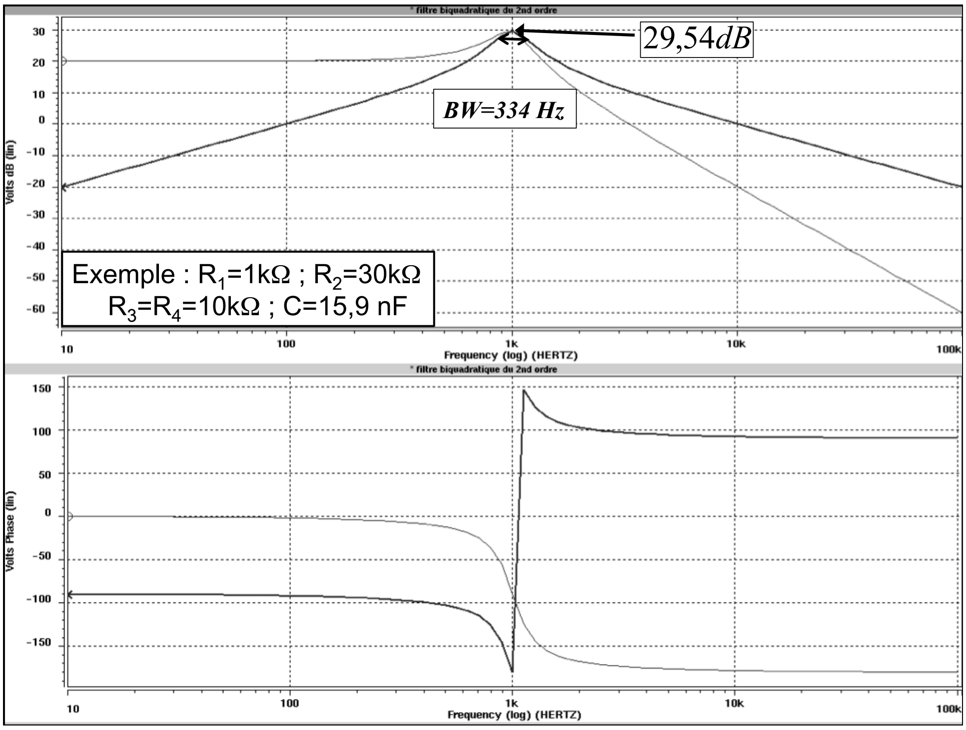
Filtre biquadratique du 2^{nd} ordre

- «Tow-Thomas, TT filter»

$$K = \frac{R_3}{R_1} \qquad Q = \frac{R_2}{R_3} \qquad f_0 = \frac{1}{2\pi R_3 C}$$

- Passe-bande (V_{BP}) $A_{V_{BP}} = -K.Q \qquad BW = \frac{1}{2\pi R_2 C}$
- Passe-bas (V_{LP}) $A_{V_{LP}} = -K$





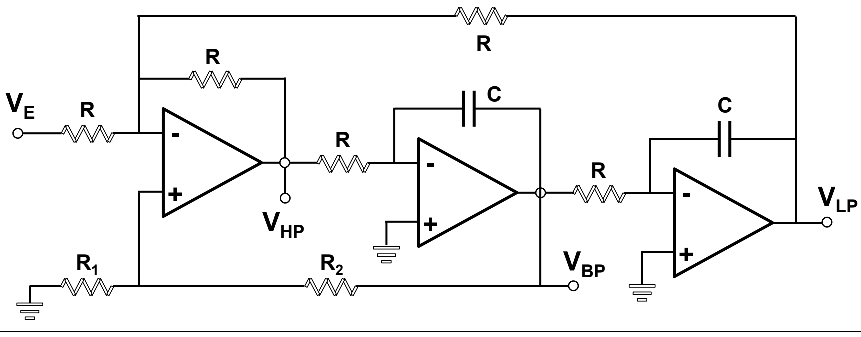
68

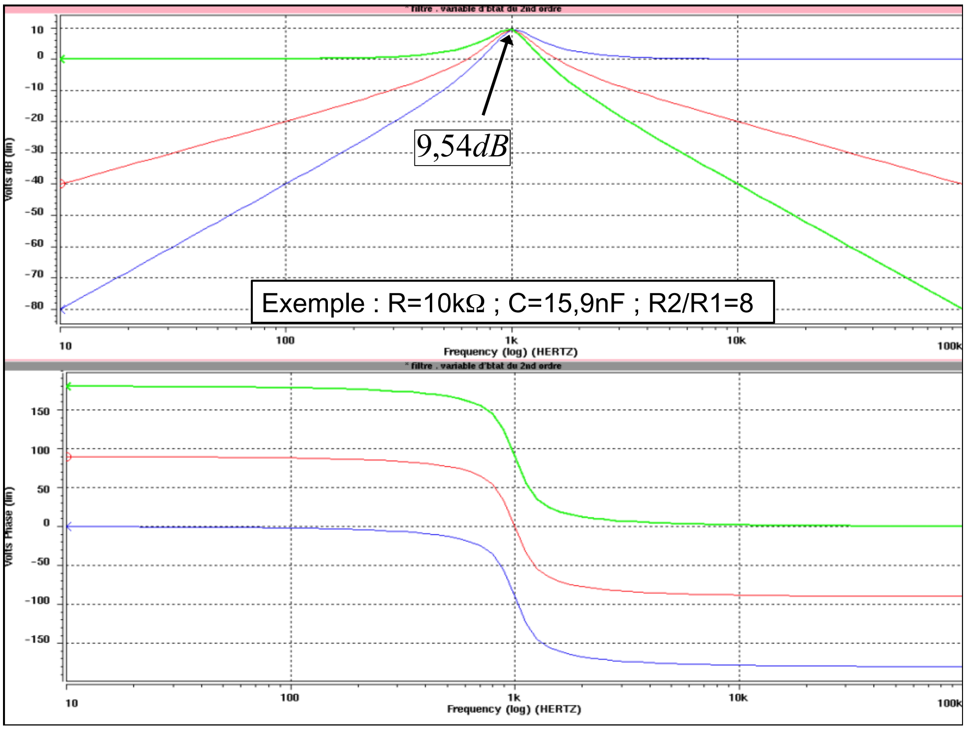
Filtre à variable d'état du 2nd ordre

- Kerwin-Huelsman-Newcomb, « KHN filter »

$$Q = \frac{1}{3}\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \qquad f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \qquad A_{V_{BP}} = Q \qquad A_{V_{LP}} = A_{V_{HP}} = -1$$

- Passe-haut (V_{HP}), passe-bande (V_{BP}) et passe-bas (V_{LP})





70

Filtrage analogique : Résumé

Type de filtre	Sallen-Key	à retour multiples	Biquadratique	à variable d'état
Autre nom	VCVS	MFB	TT	KHN
Complexité	Faible	Faible	Élevée	Élevée
Sensibilité	Élevée	Élevée	Faible	Faible
Réglage	Difficile	Difficile	Facile	Facile
Avantages	Simple, petit et non-inverseur	Simple, petit et inverseur	BW et f_0 indépendants, sorties multiples	Q et f_0 indépendants, sorties multiples