

TP n° 1 Réalisation d'un filtre passe-bas de Bessel avec des Structure de Sallen-Key (p11) :

SYNTHESE DE FILTRES

RAPPELS

TP : théorie et pratique

p1 à p10

p11 à p13

Annexe1 :

Analyse de Monte Carlo

Annexe2 :

Analyse Worst Case

GENERALITES

Les définitions terminologiques qui caractérisent un filtre sont les suivantes :

La *forme* définit le polynôme de la réponse, donc une éventuelle ondulation dans la bande transmise. Ainsi, les polynômes de Butterworth, de Chebyshev, de Bessel et de Causer décrivent les formes de réponses les plus couramment utilisées.

Le *type* de filtre caractérise la position relative en fréquence, de la bande transmise à amplitude constante (passe-bas, passe-haut, passe-bande, coupe-bande). L'obtention d'un gabarit complexe exigera souvent l'utilisation de plusieurs filtres de réponses élémentaires (premier ou second ordre).

La *structure* du filtre décrit la méthode de réalisation choisie (contre-réaction simple ou multiple, gyrateur, etc...).

GABARIT D'UN FILTRE REEL

Le gabarit est la représentation graphique des conditions limites amplitude-fréquence nécessaires pour réaliser une fonction de filtrage donnée.

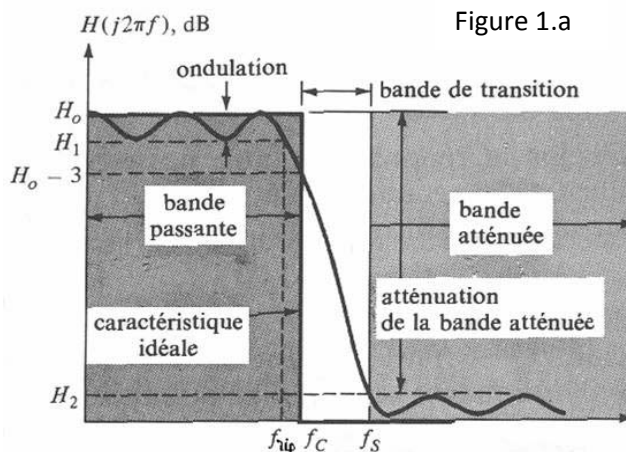


Figure 1.a

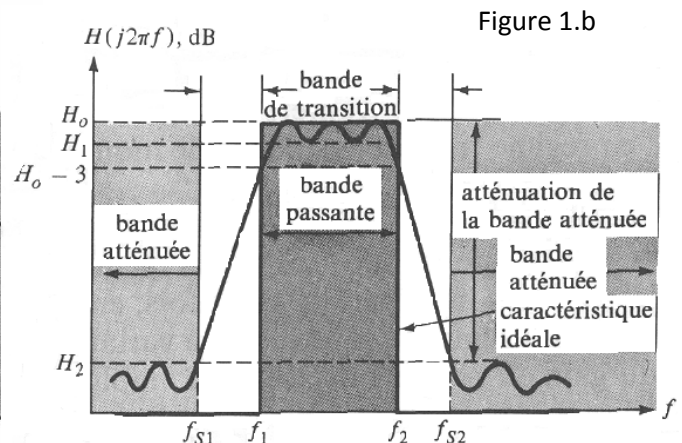


Figure 1.b

La **figure 1.a** représente la réponse d'un filtre passe-bas réel.

La bande passante est la gamme de fréquence transmise sans atténuation excessive, la différence $H_0 - H_1$ est appelée l'ondulation γ .

La fréquence de coupure f_c à laquelle $H = H_0 - 3\text{dB}$ définit le bord de la bande passante. La fréquence de coupure f_{rip} , fréquence maximale à laquelle $H = H_1$, est appelée la bande passante "d'ondulation".

La fréquence f_s est la fréquence minimale à laquelle il y a atténuation $H_0 - H_2$, la bande atténuée s'étalant à partir de cette valeur.

La variation entre la bande passante et la bande atténuée d'un filtre réel n'est pas abrupte comme la caractéristique idéale. La différence entre les fréquences de bande atténuée et de coupure à -3dB est appelée la bande de transition ($f_s - f_c$).

La réponse d'un filtre passe-bande représentée à la **figure 1.b** comporte une bande atténuée et une bande de transition au-dessus et au-dessous des fréquences de coupure f_1 et f_2 et qui définissent la bande passante. On

peut tracer des caractéristiques semblables pour des filtres passe-haut et coupe-bande réels et identifier ces diverses bandes de fréquence. On remarquera plus loin qu'il peut y avoir ondulation ou non suivant les réponses mises en œuvre.

Dans un contexte général, le concepteur d'un filtre doit connaître certaines spécifications qui seraient, pour un passe-bas par exemple :

- la fréquence de coupure f_c c'est-à-dire la gamme de fréquence de la bande passante;
- l'atténuation $H_0 - H_2$ de la bande atténuée;
- la gamme de fréquence de la bande atténuée, autrement dit f_s ;
- l'ondulation $\gamma = H_0 - H_1$ admissible dans la bande passante (s'il n'y a pas d'ondulation, $\gamma=0$ et $H_1 = H_0$).

Il faut ajouter aussi que le temps de propagation de groupe (retard) et la réponse en régime transitoire (temps de montée, dépassement) du filtre sont aussi des spécifications déterminantes.

FONCTION DE TRANSFERT

La fonction de transfert est la représentation mathématique des mêmes conditions limites amplitude-fréquence sur le gabarit. Elle est l'intermédiaire indispensable entre l'établissement du gabarit et le calcul des composants passifs. Ce calcul s'opère non pas à partir du gabarit, mais à partir des paramètres de la (ou des) fonction de transfert qui s'inscrit à l'intérieur de ce gabarit.

L'ordre du filtre correspond à la valeur la plus élevée de l'exposant qui affecte p au dénominateur de la fonction de transfert $F(p)$. Un ordre plus élevé va de pair avec une possibilité de coupure plus rapide (en dB par décade) à partir d'une fréquence donnée.

Quelle que soit sa forme, sa structure ou son type, la fonction de transfert de second ordre, par sa facilité de réalisation à l'aide d'un seul amplificateur opérationnel, constitue l'élément de base qui servira à synthétiser les filtres les plus complexes. L'association en série de n de ces cellules de second ordre permettra de constituer dans des conditions d'assemblage très précises n'importe quel filtre d'ordre $2n$.

Ceci n'est possible que dans la mesure où le transfert global est égal au produit des transferts de chacune des sections. Cela implique que l'impédance de sortie de chacune des cellules de second ordre soit beaucoup plus réduite que l'impédance d'entrée de la cellule suivante.

Cet aspect de décomposition en fonctions élémentaires n'a aucun équivalent dans les techniques de réalisation passive où l'ensemble du filtre doit être traité dès le départ de l'étude en raison des interactions inévitables entre cellules successives.

L'ordre n du filtre définit également la pente asymptotique P du circuit à la coupure. Pour des types passe-bas ou passe-haut les plus classiques, P vérifie la relation

$$P=20.n \text{ (Db par décade)}$$

Soit à réaliser, par exemple, un filtre devant couper à 160 dB par décade, n doit donc être égal à 8, ce qui correspond à une succession de quatre cellules élémentaires de second ordre. De la même façon, une décroissance de 100 dB par décade aurait nécessité une fonction de transfert globale du 5^e ordre, soit deux cellules de second ordre et un circuit RC qui réalise une fonction de transfert d'ordre 1. A noter que s'il y avait un problème d'adaptation d'impédance (interactions entre cellules successives), on élimine l'influence de charge sur le transfert par la présence d'un amplificateur opérationnel monté en suiveur de tension.

Un autre exemple pourrait être un filtre passe-bas d'ordre 4 défini par sa fonction de transfert :

$$F(p) = \frac{H_0}{1 + ap + bp^2 + cp^3 + dp^4}$$

Ce filtre est caractérisé par quatre paramètres différents a , b , c et d . La décomposition en fonctions du second ordre (mise sous forme quadratique) conduit à l'écriture suivante :

$$F(p) = \frac{H_0}{\left(1 + \frac{2\zeta_1}{\omega_{n1}}p + \frac{p^2}{\omega_{n1}^2}\right)\left(1 + \frac{2\zeta_2}{\omega_{n2}}p + \frac{p^2}{\omega_{n2}^2}\right)}$$

Les paramètres ζ_j et ω_{nj} , respectivement coefficient d'amortissement et pulsation propre, ne dépendent que des valeurs des composants passifs. C'est donc la seule valeur des composants passifs qui définit la forme de la réponse en amplitude dans une structure de filtre donnée.

SENSIBILITE D'UN CIRCUIT

Le filtre passif est un circuit "naturellement stable". En effet, quelle que soit la qualité de ses composants, le coefficient de surtension restera toujours de valeur finie. Ceci n'est pas nécessairement le cas avec un filtre actif dans lequel une petite variation dans la valeur d'un composant passif peut entraîner un important déplacement des pôles pouvant aller jusqu'à l'oscillation du montage. C'est là tout le problème de la sensibilité.

La sensibilité d'un filtre est le rapport de la variation relative X d'une fonction performance (gain, coefficient d'amortissement, pulsation propre, ...) à la variation relative c de la valeur du composant qui lui a donné naissance. La sensibilité est notée conventionnellement par S en se référant à la définition :

$$S_c^X = \frac{dX}{X} / \frac{dc}{c} \quad (1)$$

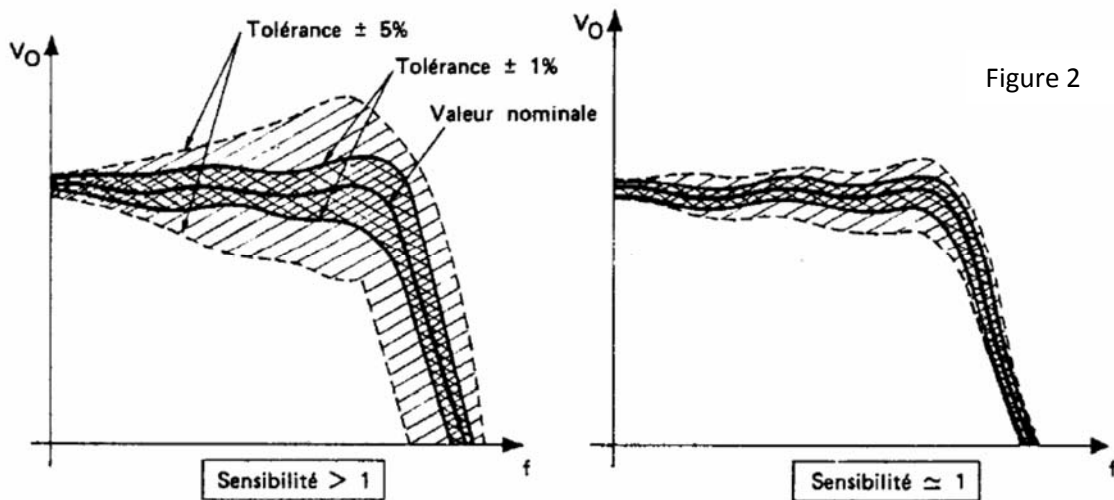
Exemple :

$$S_R^Q = \frac{dQ}{Q} / \frac{dR}{R}$$

Dans un filtre actif, la sensibilité dépend en premier lieu du montage utilisé. Plus grand sera le nombre de circuits actifs utilisés, plus réduite sera la sensibilité. Dans la plupart des cas, les sensibilités de la fréquence (S_c^f) seront comparables entre un filtre actif et un filtre passif. Par contre, les sensibilités du coefficient de surtension (S_c^Q) et celle du gain K dans la bande transmise (S_c^K) dépendent, dans beaucoup de structures actives, du coefficient de surtension et d'autant plus que celui-ci est plus élevé.

Les filtres à coupure rapide, qui requiert des surtensions importantes, nécessitent donc des composants passifs à caractérisation très serrée.

La figure 2 illustre les réponses de deux filtres passe-bas ayant les mêmes fonctions de transfert mais des sensibilités différentes. Les enveloppes des réponses "pire-cas" pour des tolérances de $\pm 1\%$ et $\pm 5\%$ sur les composants passifs sont également figurées. L'aire de ces enveloppes est directement liée à la sensibilité du montage choisi.



DIFFERENTES FORMES DE REPONSE

Les formes de réponses parmi les plus usuelles sont les réponses de Butterworth, de Chebyshev, de Bessel et de Cauer.

Réponse de Butterworth

C'est une réponse qui ne présente pas d'ondulation dans la bande transmise et le module de la fonction de transfert répond à la relation générale

$$F = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^{2n}}} \quad (2)$$

au sein de laquelle n et f_c sont respectivement l'ordre et la fréquence de coupure à -3 dB du filtre considéré. La réponse en amplitude se rapproche d'autant plus d'un gabarit rectangulaire que n est plus élevé. Quelle que soit la valeur de n , la définition de la fréquence de coupure se fait toujours pour une atténuation de 3 dB. Les courbes sont donc normalisées par rapport à la fréquence de coupure à -3 dB ($f_0 = f_c$).

Tableau 1 : Polynômes normalisés des filtres de Butterworth

n	Facteurs des polynômes
1	$p+1$
2	$p^2+1.414p+1$
3	$(p+1)(p^2+p+1)$
4	$(p^2+0.765p+1)(p^2+1.848p+1)$
5	$(p+1)(p^2+0.618p+1)(p^2+1.618p+1)$
6	$(p^2+0.518p+1)(p^2+1.414p+1)(p^2+1.932p+1)$
7	$(p+1)(p^2+0.445p+1)(p^2+1.247p+1)(p^2+1.802p+1)$
8	$(p^2+0.390p+1)(p^2+1.111p+1)(p^2+1.663p+1)(p^2+1.962p+1)$

La réponse de Butterworth est caractérisée par un polynôme particulier à un ordre donné (tableau 1).

Réponse de Chebyshev

C'est une réponse à coupure plus rapide, au voisinage de la fréquence de coupure, qu'une réponse de Butterworth, pour un ordre donné.

Le module de la réponse en amplitude vérifie la relation générale de la forme :

$$F = \frac{1}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 (C_n^2(\frac{f}{f_{rip}}))}} \quad (3)$$

dans laquelle ε est un nombre réel positif et beaucoup plus petit que 1, la fréquence f_{rip} est ici la bande passante d'ondulation et $C_n(\frac{f}{f_{rip}})$ sont les polynômes de Chebyshev. Par définition,

$$\begin{aligned} C_n\left(\frac{f}{f_{rip}}\right) &= \cos\left[n \cos^{-1}\left(\frac{f}{f_{rip}}\right)\right] & 0 \leq \frac{f}{f_{rip}} \leq 1 \\ C_n\left(\frac{f}{f_{rip}}\right) &= \cosh\left[n \cosh^{-1}\left(\frac{f}{f_{rip}}\right)\right] & \frac{f}{f_{rip}} > 1 \end{aligned} \quad (4)$$

La réponse en amplitude présentera une certaine ondulation dans la région $f/f_c < 1$ comme on le voit sur les abaques. Les courbes sont donc normalisées par rapport à la bande passante d'ondulation ($f_0 = f_{rip}$).

L'équation suivante lie le paramètre ε à l'ondulation γ en décibels :

$$\varepsilon^2 = 10^{\gamma/10} - 1 \quad (5)$$

La fréquence de coupure f_c à 3 dB est donnée par l'expression

$$f_c = f_{rip} \cosh\left[\frac{1}{n} \cosh^{-1}\left(\frac{1}{\varepsilon}\right)\right] \quad (6)$$

TPCESI ELECTRONIQUE ANALOGIQUE

Cette coupure est d'autant plus rapide que le taux d'ondulation accepté dans la bande transmise est plus important, là également pour un ordre donné. La définition de la fréquence de coupure est différente de sa définition en Butterworth.

Des polynômes particuliers caractérisent la réponse de Chebyshev. A chaque valeur du taux d'ondulation est associée une suite de polynômes, chacun d'eux caractéristique d'un ordre donné (tableau 2).

Tableau 2 : Polynômes normalisés des filtres de Chebyshev

n Facteurs des polynômes

ondulation de 0.5 dB ($\epsilon = 0.3493$)

1	$p+2.863$
2	$p^2+1.425p+1.516$
3	$(p+0.626)(p^2+0.626p+1.142)$
4	$(p^2+0.351p+1.064)(p^2+1.845p+0.356)$
5	$(p+0.362)(p^2+0.224p+1.036)(p^2+0.586p+0.477)$
6	$(p^2+0.1554p+1.024)(p^2+0.4142p+0.5475)(p^2+0.5796p+0.157)$
7	$(p+0.2562)(p^2+0.1014p+1.015)(p^2+0.3194p+0.6657)(p^2+0.4616p+0.2539)$
8	$(p^2+0.0872p+1.012)(p^2+0.2484p+0.7413)(p^2+0.3718p+0.3872)(p^2+0.4386p+0.08805)$

ondulation de 1.0 dB ($\epsilon = 0.5089$)

1	$p+1.965$
2	$p^2+1.098p+1.103$
3	$(p+0.494)(p^2+0.494p+0.994)$
4	$(p^2+0.279p+0.987)(p^2+0.674p+0.279)$
5	$(p+0.289)(p^2+0.179p+0.988)(p^2+0.468p+0.429)$
6	$(p^2+0.1244p+0.9907)(p^2+0.3398p+0.5577)(p^2+0.4642p+0.1247)$
7	$(p+0.2054)(p^2+0.0914p+0.9927)(p^2+0.2562p+0.6535)(p^2+0.3702p+0.2304)$
8	$(p^2+0.07p+0.9942)(p^2+0.1994p+0.7236)(p^2+0.2994p+0.3408)(p^2+0.3518p+0.0702)$

Réponse de Bessel

Cette réponse est moins caractérisée par l'allure de la tension de sortie en fonction de la fréquence que par sa réponse impulsionnelle. En effet, la réponse transitoire présente une absence de suroscillations et un temps de propagation constant. Elle est également définie par une évolution linéaire de la phase entrée-sortie en fonction de la fréquence.

Réponse de Caer

Cette réponse présente un ou plusieurs zéros de transmission dans la région de coupure. Elle est utilisée pour éliminer une fréquence indésirable ou pour augmenter la pente de coupure à partir d'une fréquence donnée au prix d'une certaine ondulation dans la bande atténuée.

REALISATION DE FILTRES ACTIFS

Il faut, maintenant, mettre en œuvre une méthode simple et pratique permettant de réaliser un filtre actif de bon rapport prix/performance répondant à un problème donné.

La connaissance des données du problème permet de définir un gabarit, semblable à ceux de la figure 1, à l'intérieur duquel doit passer la courbe de réponse du filtre.

Un certain nombre de types de filtres permet d'obtenir cette réponse, mais les qualités et la complexité de ces filtres ne sont pas les mêmes. Le choix du type repose sur des critères tels que la raideur de coupure, la régularité de la courbe de réponse, le comportement en régime transitoire, la régularité du temps de

propagation de groupe, la complexité de la réalisation, etc... . Les abaques et tableaux proposés limitent ici le choix aux filtres de Butterworth et de Chebyshev.

Une fois le type de filtre choisi, il faut déterminer sa fonction de transfert. Pour y parvenir, il faut déterminer le degré de cette fonction, c'est-à-dire l'ordre du filtre et obtenir la fonction de transfert du filtre normalisé (forme canonique). La détermination de l'ordre du filtre se fait suivant l'allure du gabarit. On remarquera que, grâce à l'ondulation ou au détriment d'une ondulation, un filtre de Chebyshev possède une raideur de la coupure plus importante qu'un filtre de Butterworth pour un ordre donné.

Lorsque l'on connaît la fonction de transfert d'un filtre sous forme d'un produit de facteurs du premier et du deuxième degré, on peut aisément réaliser ce filtre en plaçant en cascade autant de cellules élémentaires du premier et second ordre correspondant à chacun de ces facteurs.

Une cellule du premier ordre peut être obtenue à l'aide d'un simple circuit RC (nécessaire uniquement pour des filtres d'ordre impair). Une cellule du second ordre est choisie suivant les critères tels que le nombre minimum de composants actifs et passifs, la facilité de réglage, la possibilité de mise en cascade sans élément séparateur, la sensibilité aux variations des éléments passifs et actifs. Le choix de la tolérance des composants passifs est donc fondamental pour chacune des cellules.

LE CHOIX DE LA CELLULE DU SECOND ORDRE

De nombreuses structures permettent de réaliser autour de un ou plusieurs amplificateurs opérationnels, les synthèses des fonctions de second ordre :

- circuit à contre-réaction simple,
- réseau à variable d'état,
- circuit à contre-réaction multiple (structure de Rauch),
- circuits à source contrôlée (structures de Sallen et Key),
- convertisseur à immittance négative (N.I.C. et autres),
- gyrateur.

Toutes ces structures présentent des avantages et des inconvénients qui leur sont propres.

LA TOLERANCE DES COMPOSANTS PASSIFS

Si l'on suppose que les éléments actifs sont des amplificateurs opérationnels idéaux, la courbe de réponse expérimentale du filtre réalisé est susceptible de rentrer dans le gabarit à condition de choisir des tolérances adéquates pour les composants passifs. De ce fait, le gabarit doit présenter une certaine souplesse afin de tenir compte de la sensibilité des paramètres (ζ , ω_n , K pour une cellule du second ordre) en fonction des variations relatives des résistances et des condensateurs par rapport à leur valeur nominale ($R=10K\Omega$ à 1%).

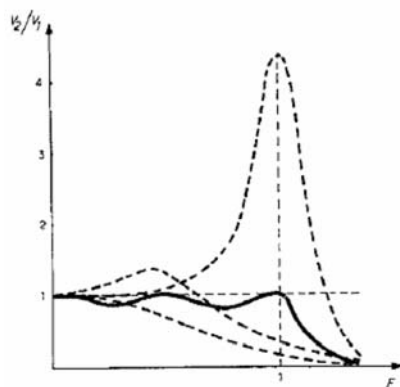


Figure 3

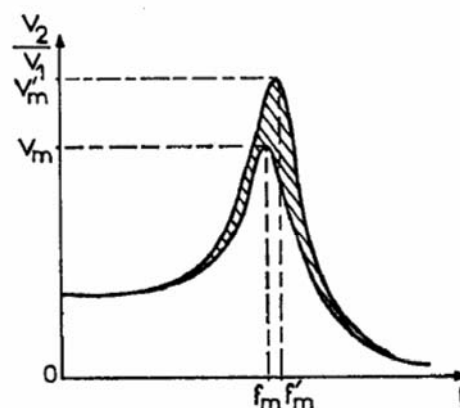


Figure 4

Ainsi, d'après ce qui a été dit sur les fonctions de transfert, un filtre polynomial réalisé par la mise en cascade de circuits élémentaires, présente une courbe de réponse obtenue en faisant le produit d'un certain nombre de courbes du second ordre et éventuellement d'un premier ordre.

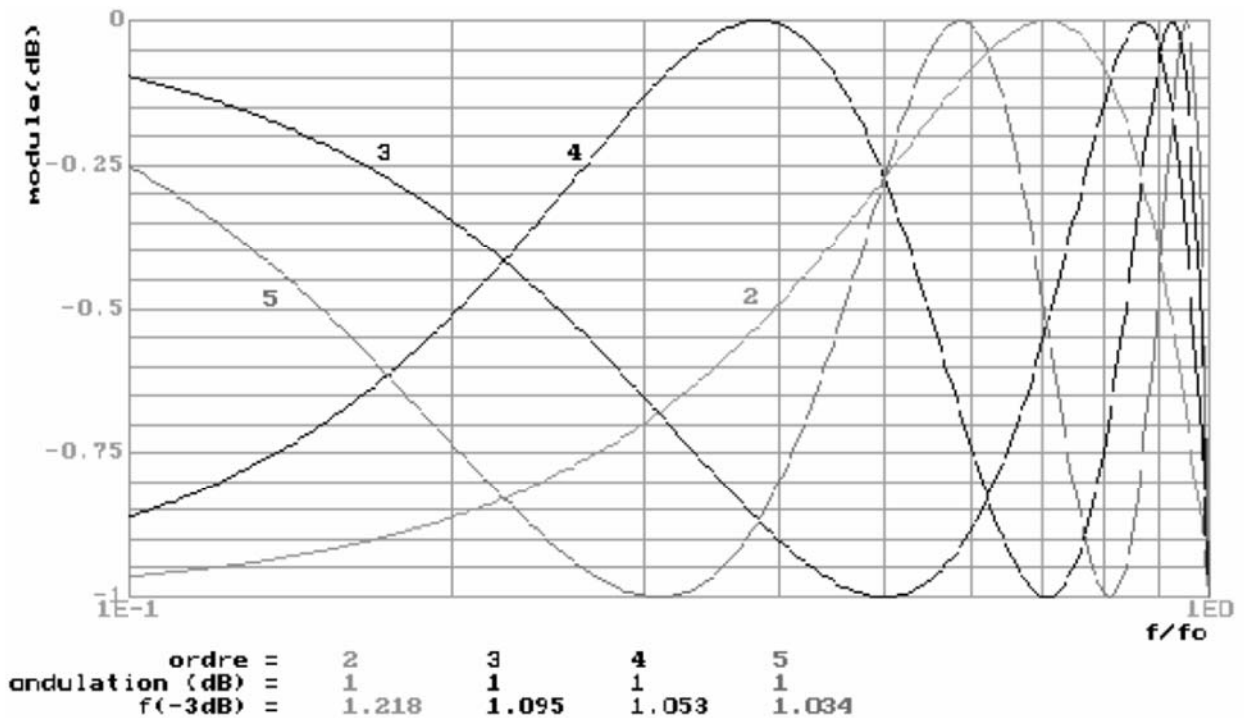
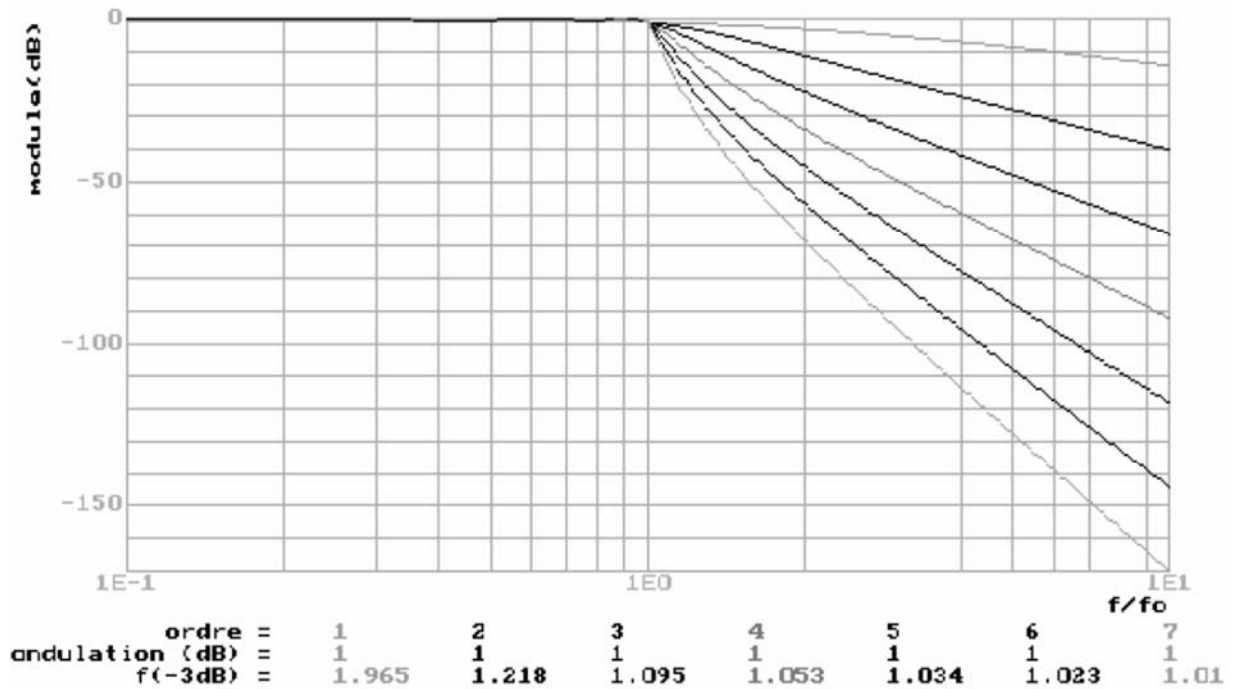
Par exemple, la figure 3 montre la réponse d'un filtre passe-bas de Chebyshev d'ordre 5 qui est en fait le produit de trois courbes de réponse du premier et du second ordre. On peut observer qu'une ondulation du filtre global nécessite un circuit de second ordre à coefficient de surtension de plus en plus élevé que celle-ci se situe vers la droite. Cette remarque implique que la cellule élémentaire sera d'autant plus sensible qu'elle possède un coefficient d'amortissement faible.

TPCESI ELECTRONIQUE ANALOGIQUE

Si l'on choisit un réseau passe-bas à source contrôlée à gain K (structure de Sallen et Key), on peut chiffrer la sensibilité des paramètres du filtre (voir formules). On constate que la sensibilité sur le coefficient d'amortissement en fonction d'un composant passif est inversement proportionnelle à ζ . De plus, le gain K de la source commandée n'intervient que dans le terme d'amortissement, si bien que le réglage de K agira uniquement sur le coefficient ζ sans modifier la valeur de la fréquence propre du circuit.

La figure 4 montre la déformation de la réponse du filtre lorsque ses éléments varient.

Ainsi, il paraît plus simple de définir la tolérance des composants passifs par une analyse indépendante sur chaque cellule élémentaire avant de considérer l'analyse globale.



Abaques : Filtres de Chebyshev et zoom

QUESTIONNAIRE

- 1- Donnez l'expression analytique des facteurs de sensibilités $S_R^{f_n}$ et $S_C^{f_n}$ d'un circuit RC de type passe-bas et évaluez ces derniers.
- 2- Démontrez les expressions (7) et (8).
- 3- Donnez l'expression analytique des facteurs de sensibilités $S_{R_1}^K$, $S_{R_1}^\zeta$, $S_{R_1}^{f_n}$ pour le filtre du second ordre à source contrôlée avec gain K et évaluez ces derniers.
- 4- Effectuez le travail de préparation de la synthèse du filtre de Chebyshev.

Formulaire : $\zeta = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{1 - \frac{1}{K_0^2}}}{2}}$ avec $K_0 = \frac{K_{res}}{K} = \frac{1}{2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}}$, $f_n = \frac{f_{res}}{\sqrt{1-2\zeta^2}}$.

(K_0 gain en tension normalisé)

Exemple de cahier des charges et de réalisation d'un filtre de Chebyshev

L'objectif est de concevoir un filtre actif à coupure rapide ne comprenant que des résistances, des condensateurs et des amplificateurs opérationnels. A partir d'un gabarit donné, on réalise ce filtre à l'aide d'une étude de synthèse reposant sur la connaissance de différentes formes de réponse et diverses topologies de circuits.

CAHIER DES CHARGES D'UN FILTRE DE CHEBYSHEV

Le filtre de Chebyshev, de type passe-bas, conforme au gabarit de la figure 5, sera tel que :

- $H_0 = 20dB$ (gain du transfert en tension),
- $\gamma = 1dB$ (ondulation admissible dans la bande passante),
- $H_0 - H_2 = 40dB$ (atténuation de la bande atténuée),
- $f_s = 2 \cdot f_{rip}$ (séparation d'un octave),
- $f_{rip} = 2kHz$ (largeur de la bande passante d'ondulation).

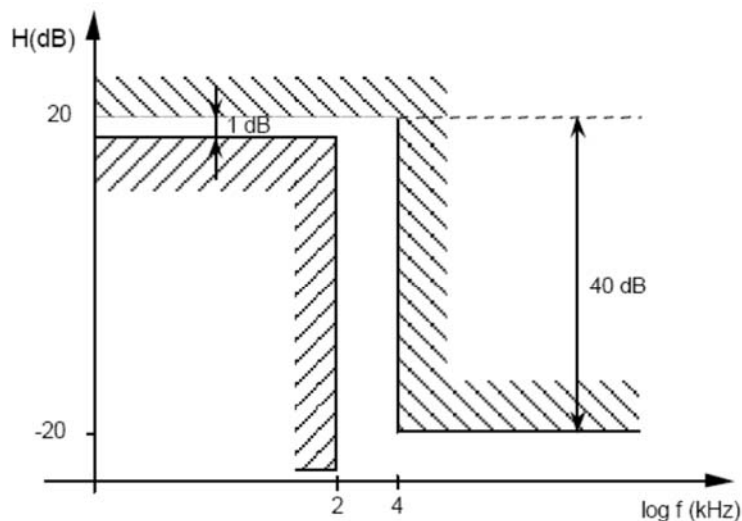


Figure 5

Remarque : Lors de la réalisation, la courbe de réponse en fréquence du filtre empiètera sur ce gabarit idéal. Il faut donc se ménager une marge suffisante dans la bande passante afin de tenir compte des dispersions sur les composants actifs et passifs.

CHOIX DES STRUCTURES DE CELLULES

Si le filtre est d'ordre impair, un réseau RC est choisi pour la cellule du premier ordre. Quant à la cellule du second ordre, le circuit à source contrôlée avec gain est retenu, la topologie étant indiquée ci-dessous.

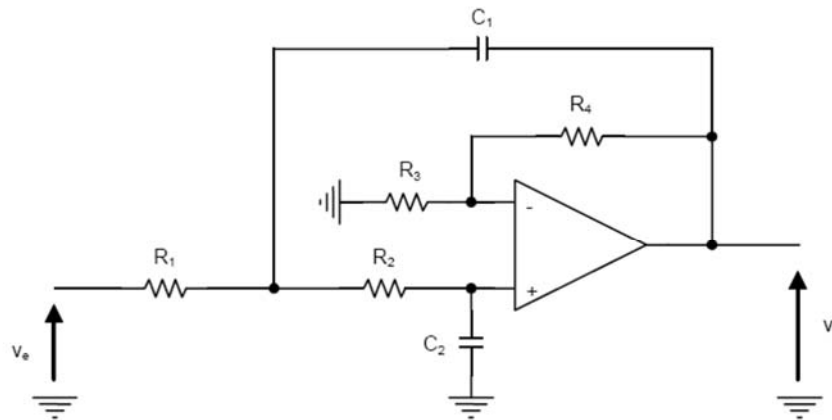


Figure 6

Les fonctions performances sont les suivantes :

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}, \quad \zeta = \frac{R_1 C_1 (1-K) + (R_1 + R_2) C_2}{2\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}, \quad K = 1 + \frac{R_4}{R_3} \quad (7)$$

En prenant comme valeurs $R_1 = R_2 = R$ et $C_1 = C_2 = C$, les équations (7) deviennent :

$$\omega_n = \frac{1}{RC}, \quad \zeta = \frac{3-K}{2} \quad (8)$$

Les sensibilités de ce réseau sont :

$$\begin{aligned} S_{C_1}^{\omega_n} &= S_{C_2}^{\omega_n} = S_{R_1}^{\omega_n} = S_{R_2}^{\omega_n} = -0.5 \\ S_{R_1}^{\zeta} &= -\frac{1}{2} + \frac{R_1 [C_1(1-K) + C_2] \omega_n}{2\zeta}, \quad S_{R_2}^{\zeta} = -\frac{1}{2} + \frac{R_2 C_2 \omega_n}{2\zeta} \\ S_{C_1}^{\zeta} &= -\frac{1}{2} + \frac{R_1 C_1 (1-K) \omega_n}{2\zeta}, \quad S_{C_2}^{\zeta} = -\frac{1}{2} + \frac{(R_1 + R_2) C_2 \omega_n}{2\zeta} \\ S_K^{\zeta} &= \frac{-K}{2\zeta \omega_n R_2 C_2}, \quad S_{R_3}^{\zeta} = -S_{R_4}^{\zeta} = \frac{R_1 C_1 \omega_n (K-1)}{2\zeta} \end{aligned} \quad (9)$$

SYNTHESE DU FILTRE

1. Déterminez l'ordre minimum du filtre à partir des abaques 2.
2. Calculez la fréquence de coupure f_c à 3 dB.
3. Prenez le polynôme normalisé correspondant aux données du problème dans le tableau 2 et écrivez l'expression de la fonction de transfert $H(p)$ sous la forme d'un produit de fonctions de transfert élémentaires (premier et second ordre).
4. Pour chacune des fonctions de transfert élémentaires, exécutez les étapes suivantes.
 - 4.a. Ecrivez la fonction sous sa forme canonique

$$\frac{1}{1 + \frac{p}{\omega_{n_i}}} \quad \text{ou} \quad \frac{1}{1 + \frac{2\zeta_i p}{\omega_{n_i}} + \frac{p^2}{\omega_{n_i}^2}}$$

- 4.b. Calculez les paramètres ζ_i et f_{ni} en tenant compte de la normalisation en fréquence des abaques (la fréquence f_0 sur les abaques s'identifie à la fréquence f_{rip} pour les réponses de Chebyshev),
- 4.c. Le choix de la structure à source contrôlée avec gain est retenu. Les valeurs de toutes les capacités sont prises à 47 nF. Évaluez toutes les résistances calculées avec 4 chiffres significatifs. Calculez le paramètre K et déterminez les valeurs des résistances R_3 et R_4 (il est conseillé, dans le choix arbitraire d'une résistance, de prendre soin à ce que l'étalement des grandeurs de toutes les résistances soit minimal).
- 4.d. Concevez un amplificateur de tension dans la chaîne tel que son gain fasse que le gain total H_0 soit égal à 10 (+20 dB).
5. Assemblez les cellules de façon à satisfaire les conditions d'adaptation d'impédances. Dessinez le schéma électrique et donnez une explication sur l'ordonnement des cellules.
6. Évaluez les sensibilités $S_{R_1}^\zeta$, $S_{R_1}^{f_n}$, $S_{R_1}^K$, $S_{R_2}^\zeta$, $S_{R_2}^{f_n}$ pour les cellules du second ordre.

SIMULATION DU FILTRE

La simulation du filtre utilise le logiciel *PSPIICE* et les éléments du schéma sont des amplificateurs linéaires intégrés (AOI ou $\mu A741$), des résistances de tolérance définie par l'expérimentateur, des condensateurs de tolérances à 1%, des alimentations symétriques de 15 V chacune.

Vérifiez que la courbe de réponse obtenue avec des AOI est à l'image de l'étude mathématique. Constatez les caractéristiques du filtre (gain, ordre, fréquence de coupure à 3 dB, ondulation).

Les AOI sont remplacés par les modèles bibliothèque $\mu A741$. Deux analyses sont à disposition :

- la réponse transitoire à un échelon de tension de 1 V à l'entrée afin de caractériser la dynamique du filtre (temps de montée, dépassement en %, fréquence des oscillations amorties).
- l'étude fréquentielle pour une analyse de Monte-Carlo de 15 runs sur la fonction *YMAX* à partir des tolérances des composants passifs afin de visualiser l'enveloppe correspondant au pire-cas.

REALISATION DU FILTRE

L'étude porte, tout d'abord, sur la sensibilité d'une résistance influençant la réponse en fréquence d'une cellule élémentaire.

Etude de la cellule du premier ordre

- ✓ Réglez la résistance R à sa valeur nominale et mesurez la fréquence de coupure f_n .
- ✓ Augmentez de 10% la valeur de R (R') et mesurez la nouvelle fréquence de coupure f'_n .
- ✓ Évaluez le rapport $\frac{\Delta f / f_n}{\Delta R / R}$ avec $\Delta f = f'_n - f_n$, $\Delta R = R' - R$.
- ✓ Comparez cette valeur à celle du facteur de sensibilité $S_R^{f_n}$ (voir questionnaire) et interprétez ce résultat.

Etude de la cellule du second ordre (prendre la plus sensible)

- ✓ Réglez les résistances à leur valeur nominale et relevez les valeurs du gain K et des coordonnées de la surtension (amplitude du maximum K_{res} et la fréquence de résonance f_{res}).
- ✓ Effectuez à nouveau cette même analyse pour une variation de 5 % de la valeur nominale de la résistance R_1 .
- ✓ Évaluez à partir de ces mesures les rapports $\frac{\Delta K / K}{\Delta R_1 / R_1}$, $\frac{\Delta \zeta / \zeta}{\Delta R_1 / R_1}$, $\frac{\Delta f / f_n}{\Delta R_1 / R_1}$.
- ✓ Comparez ces valeurs aux valeurs des facteurs $S_{R_1}^K$, $S_{R_1}^\zeta$, $S_{R_1}^{f_n}$ (voir questionnaire) et interprétez ces résultats.
- ✓ Effectuez à nouveau cette même analyse pour une variation simultanée de 5% de la valeur nominale des résistances R_1 et R_2 . Constatez l'incidence sur f_n et ζ et expliquez le phénomène.

Le filtre est maintenant câblé en respectant l'ordre des cellules, les résistances étant réglées à leurs valeurs nominales à 4 chiffres significatifs (respect des tolérances à 1 % de la simulation).

- ✓ Effectuez une analyse transitoire du filtre en réponse à un échelon de tension de 1V_{pp} à l'entrée (valeur moyenne nulle). Mesurez le temps de montée, le dépassement et la fréquence des oscillations amorties et comparez aux résultats fournis par la simulation.
- ✓ Tracez la réponse en fréquence du filtre.
- ✓ Comparez ce tracé aux résultats fournis par l'analyse de Monte-Carlo en rapportant, sur le tracé expérimental, les points critiques de spécifications en fréquence. Commentez le résultat obtenu.

TP n°1 ELN ANAL CESI

Réalisation d'un filtre passe-bas de Bessel avec des Structure de Sallen-Key :

Théorie :

1 Etude de la structure :

- Donner la fonction de transfert du montage en précisant les expressions de la pulsation propre et de l'amortissement. S/E ; $W0$; m .

2 Filtre passe-bas de Bessel :

On désire réaliser un filtre possédant une **fréquence de coupure de 10Khz et une atténuation de 40 db à 40Khz.**

- Déterminer l'ordre du filtre, en déduire la fonction de transfert normalisée.
- Dénormaliser, identifier et dimensionner.
- Donner le schéma de câblage complet du filtre.

Pratique :

Expérimentation :

- *Câbler chacune des cellules et comparer les points particuliers au tableau de Bessel.*
- *Câbler et tracer la réponse en fréquence du filtre obtenu (gain et phase).*

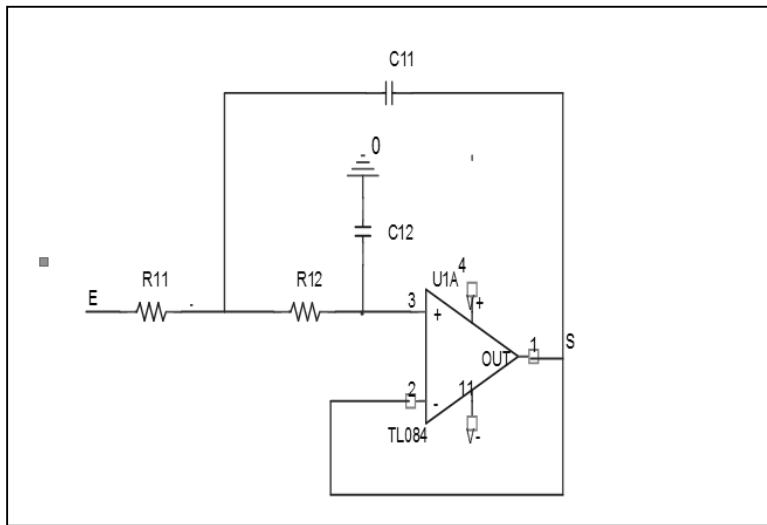
Simulation :

- **Réaliser la simulation du filtre en utilisant PSPICE (LTSPICE) : (TL082,uA741)**
 - Donner la réponse transitoire à un échelon de tension de 1 V à l'entrée afin de caractériser la dynamique du filtre (temps de montée, dépassement en %, fréquence des oscillations amorties).

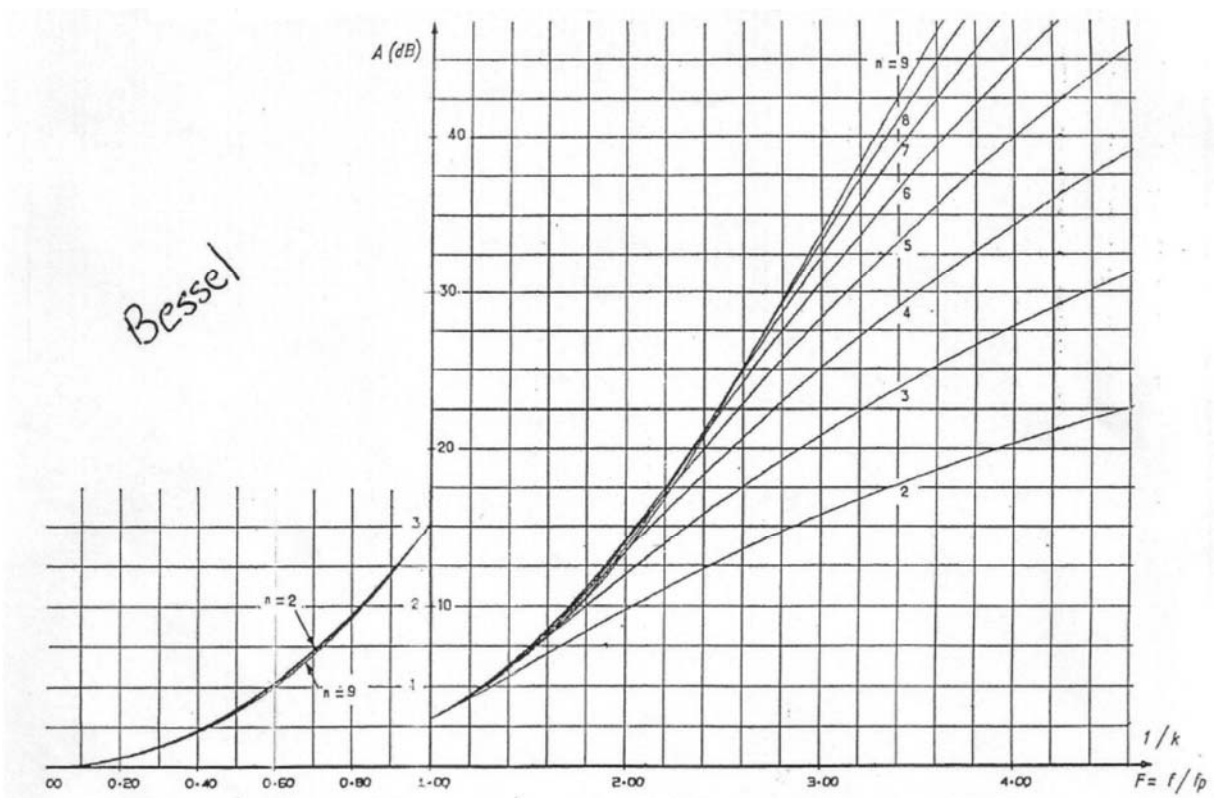
La tolérance sur les résistances sera prise à 10% et celle sur les condensateurs à 20%.

- Faire l'étude fréquentielle pour une analyse de Monte-Carlo de 15 runs sur la fonction YMAX à partir des tolérances des composants passifs afin de visualiser l'enveloppe correspondant au pire-cas.

- Faire l'analyse Worst Case.



STRUCTURE DE SALLEN-KEY
S/E = 1



TPCESI ELECTRONIQUE ANALOGIQUE

N	CIRCUIT	m	q	V _m	F _m	FONCTION DE TRANSMISSION
2	1	0.6808	0.9077	-	-	(0.6180P ² +1.3616P+1)
3	1 2	0.4998 0.7560	0.9547	-	-	(0.4771P ² +0.9996P+1) (0.756P+1)
4	1 2	0.3871 0.6698	1.0048 0.7298	1.02 -	0.768 -	(0.3889P ² +0.7742P+1) (0.4989P ² +1.3396P+1)
5	1 2 3	0.5700 0.3107 0.6656	0.7241 1.0441	- 1.09	- 1.116	(0.4128P ² +1.1401P+1) (0.3245P ² +0.6215P+1) (0.665P+1)
6	1 2 3	0.6108 0.4843 0.2565	0.6363 0.7236 1.0745	- - 1.17	- - 1.376	(0.3887P ² +1.2217P+1) (0.3504P ² +0.9686P+1) (0.2756P ² +0.5130P+1)
7	1 2 3 4	0.5472 0.4151 0.7166 0.5936	0.6203 0.7252 1.0990	- - 1.26	- - 1.595	(0.3394P ² +1.0944P+1) (0.3010P ² +0.8303P+1) (0.2380P ² +0.4332P+1) (0.593P+1)
8	1 2 3 4	0.5556 0.4876 0.3601 0.1863	0.5690 0.6108 0.7278 1.1199	- - - 1.34	- - - 1.787	(0.3161P ² +1.1112P+1) (0.2979P ² +0.9753P+1) (0.2621P ² +0.7202P+1) (0.2087P ² +0.3727P+1)
9	1 2 3 4 5	0.5121 0.4355 0.1628 0.3159 0.5386	0.5533 0.6051 1.1384 0.7312	- - 1.42 -	- - 1.962 -	(0.2834P ² +1.0243P+1) (0.2635P ² +0.8710P+1) (0.1854P ² +0.3257P+1) (0.2310P ² +0.5319P+1) (0.538P+1)

— Filtres passe-bas de Bessel. Valeur des éléments et des grandeurs de réglage.