

FILTRES A CAPACITES COMMUTEES

INTRODUCTION

Les filtres à capacités commutées se présentent sous la forme de circuits intégrés classiques (boîtiers DIL par exemple) ne nécessitant que peu de composants externes (principalement des résistances) et pouvant réaliser des filtres d'ordre élevé (ordre 2 pour un MF5, ordre 4 pour un MF10 : www.national.com et ordre 5 pour un MAX280 : www.maxim-ic.com). L'avantage de tels filtres est donc leur forte intégrabilité car ils ne nécessitent ni self ni de nombreux condensateurs (1 ou 2 au maximum). On peut de plus accorder la fréquence de coupure de ces filtres en modifiant la fréquence d'une horloge.

Ces filtres sont traditionnellement basés sur des structures universelles (comme pour les circuits intégrés MF5 et MF10, ce dernier étant utilisé dans le TP) constituées d'additionneurs, (utilisant des AOP intégrés et des résistances externes) et de deux intégrateurs (eux aussi intégrés dans le boîtier du filtre). Les intégrateurs sont réalisés par des structures R-C-AOP dans lesquelles les résistances sont « simulées » par un procédé de commutation de capacités, très précis et pouvant être accordable par variation de la fréquence de commutation des capacités, appelée fréquence d'horloge.

OBJECTIFS DU T.L.

Cette manipulation doit vous permettre :

- ✓ d'aborder la mise en œuvre de filtre à capacités commutées (MF10 dont un extrait de documentation est donné en ANNEXE 1),
- ✓ de voir (ou de revoir !) les techniques de caractérisation des performances de filtres passe bas, du 2nd et du 4^{ième} ordre ayant des caractéristiques différentes,
- ✓ de comparer différentes réalisations (les plus classiquement rencontrées) de filtres : Butterworth, Bessel, Tchebychev.

Le paragraphe I de ce texte présente l'intégrateur à capacité commutée, le paragraphe II décrit la structure universelle utilisée par la suite. La maquette et la manipulation sont détaillées au paragraphe III.

Ce TL est directement en rapport avec les enseignements d'Electronique Analogique.

I - PRINCIPE DE L'INTEGRATEUR A CAPACITES COMMUTEES :

Vous verrez (ou avez vu) en électronique l'équivalence entre les trois schémas électriques de la figure 1 ci-dessous. Le résultat est que l'on peut réaliser un intégrateur à l'aide d'un interrupteur (à transistor par exemple), de deux capacités et d'un AOP qui peuvent tous être intégrés en circuit CMOS.

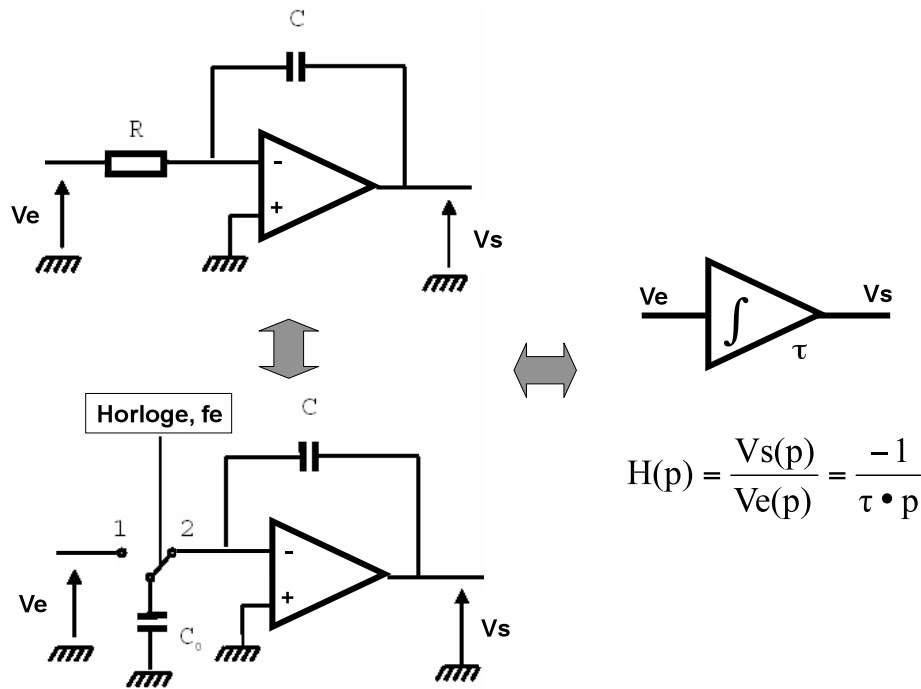


Figure 1

On démontre que la constante d'intégration vaut :

$$\tau = R \cdot C = \frac{C}{C_0 f_e}$$

Remarques :

- On parle de résistance simulée car on a l'équivalence suivante : $R = \frac{1}{C_0 f_e}$
- On peut accorder la constante d'intégration (comme si on avait une résistance variable) en faisant varier la fréquence de cadencement de l'interrupteur : f_e (fréquence d'échantillonnage). Il faut néanmoins, comme tout système échantillonné, respecter la règle donnée par le théorème de Shannon : $f_e > 2 \times f_{MAX}$ ou f_{MAX} est la fréquence la plus grande des signaux à traiter (c'est la borne supérieure du spectre des signaux).

II - STRUCTURE DU FILTRE UNIVERSEL :

A partir de l'intégrateur à capacités commutées, on peut alors réaliser tous les types de filtrage (passe bas, passe haut, passe bande et réjecteur) à l'aide d'une structure de filtre universelle (on parle aussi de filtre à variables d'état). L'exemple de la figure 2 montre une telle structure permettant d'obtenir un filtre soit passe bas, soit passe bande, soit réjecteur du second ordre suivant la sortie choisie. C'est cette structure qui est intégrée deux fois dans le MF 10 que vous allez mettre en œuvre dans ce TP.

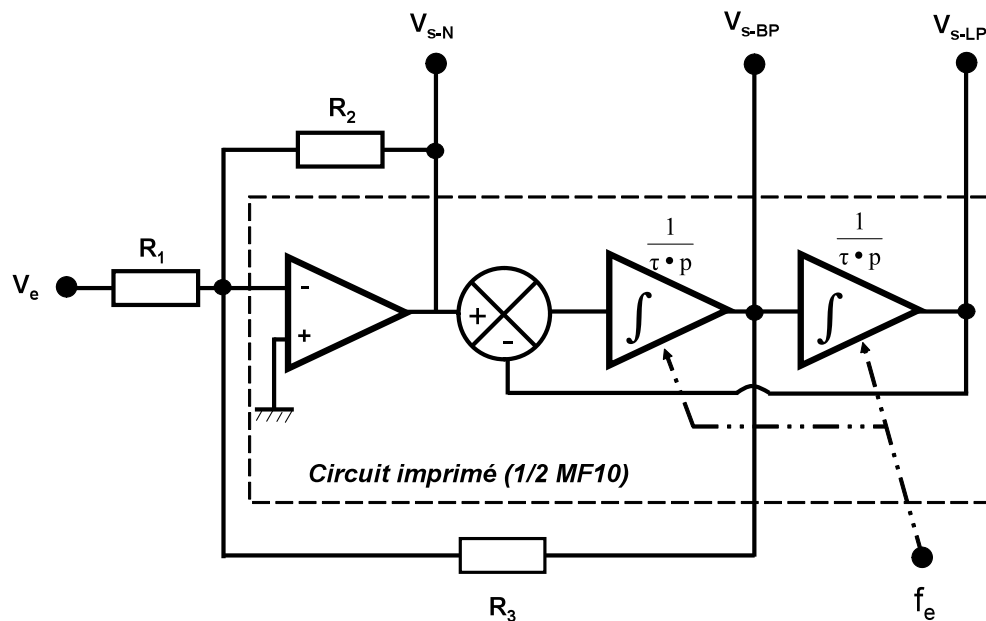


Figure 2

Les fonctions de transfert obtenues à l'aide de cette structure sont les suivantes :

Passé bas du second ordre	Passé bande du second ordre	Réjecteur du second ordre
$\frac{V_{s-LP}}{V_e}(p) = \frac{-\frac{R_2}{R_1}}{1 + \frac{p}{Q_0\omega_n} + \frac{p^2}{\omega_n^2}}$	$\frac{V_{s-BP}}{V_e}(p) = \frac{-\frac{R_3}{R_1} \times \frac{p}{Q_0\omega_n}}{1 + \frac{p}{Q_0\omega_n} + \frac{p^2}{\omega_n^2}}$	$\frac{V_{s-N}}{V_e}(p) = \frac{-\frac{R_2}{R_1} \times \left(1 + \frac{p^2}{\omega_n^2}\right)}{1 + \frac{p}{Q_0\omega_n} + \frac{p^2}{\omega_n^2}}$

Tableau 1

Les paramètres sont :

- Les trois résistances R1, R2 et R3 qui sont des composants externes à câbler qui fixent les gains dans la bande passante,
- Le coefficient de qualité est: $Q_0 = \frac{R_3}{R_2}$,
- La pulsation propre vaut: $\omega_n = \frac{\omega_e}{100}$ ou 50 . ω_e étant la pulsation d'horloge que l'on réglera en externe au MF10 et le facteur 50 ou 100 dépendra de l'état d'un broche du circuit intégré (mise à l'état haut= V_{cc} ou bas= $0V$)

La figure ci-dessous donne les diagrammes de Bode (Gain et phase) pour différents types de filtres (passe bas, passe bande, ...). L'axe des abscisses correspond à la fréquence normalisée par f_n : $x=f/f_n$ et les courbes sont tracées pour différentes valeur de Q_0 .

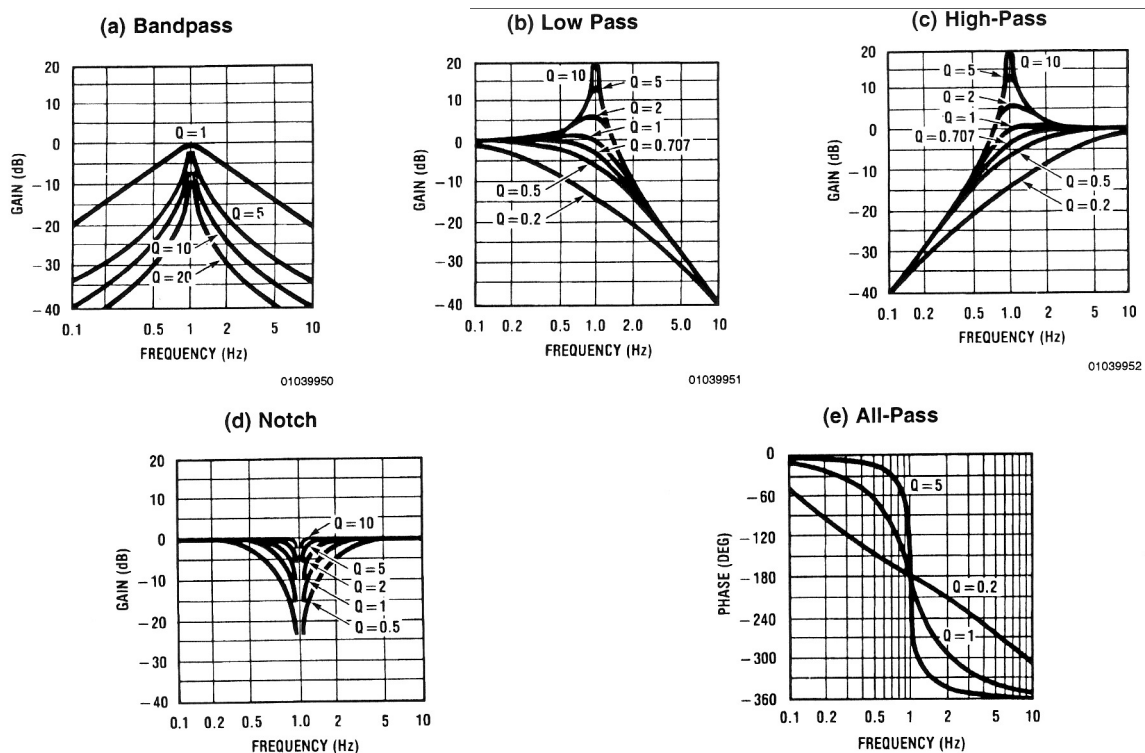


figure 3

Conclusion : lorsque vous réalisez un filtre passe bas (par exemple) du 2nd ou du 4^{ème} ordre, la fréquence de coupure (à -3dB) et le gain sont imposés par le système dans lequel est intégré le filtre. Par contre la fréquence propre et le coefficient de qualité sont à fixer par le concepteur. Ces deux paramètres doivent être déterminés à l'aide de tables établies par Bessel, Butterworth, Techebychev ou autres. Nous allons voir dans ce TP la différence des résultats obtenus en fonction de la famille de filtre choisie.

III- MANIPULATION

- **Présentation**

Le circuit utilisé dans la manipulation est le filtre universel MF 10 qui comporte 2 blocs du second ordre décrit à la figure 2. Dans la maquette chacun des 2 blocs est câblé de façon à pouvoir réaliser un filtre passe-bas du second ordre. Nous pourrions donc obtenir un filtre du 4ème ordre par la mise en cascade des 2 blocs.

La manipulation consiste à réaliser, étudier et comparer les réponses de divers filtres passe-bas (d'approximation différentes) décrits dans le tableau ci-dessous :

Nombre de pôles	BUTTERWORTH		BESSEL		TCHEBYTCHEV Ondulation=2dB	
	fn/fc	Q ₀	fn/fc	Q ₀	fn/fc	Q ₀
2	1	0.7071	1.2742	0.57735	0.907227	1.1286
4	1	0.5118	1.43241	0.52193	0.4707	0.9294
	1	1.3065	1.60594	0.80554	0.96367	4.5938

Tableau 2

Avec :

f_c : fréquence de coupure à - 3dB

f'_c : (pour les filtres de Tchebytchev) fréquence à partir de laquelle la courbe d'amplitude sort de la bande d'ondulation.

f_n : fréquence propre non amortie.

- **Description de la maquette**

La broche 50/100/CL permet de fixer la valeur du rapport C/C0 :

- Si 50/100/CL est à 0V : alors : $f_n = \frac{f_e}{100} \left(\frac{C_0}{C} = \frac{2\pi}{100} \right)$

- Si 50/100/CL est à +5V : alors : $f_n = \frac{f_e}{50} \left(\frac{C_0}{C} = \frac{2\pi}{50} \right)$

Dans le TL, on mettra la sortie 50/100/CL à 0V correspondant à : $f_n = \frac{f_e}{100}$

Les résistances R_1 et R_2 sont déjà câblées et ont pour valeur : $R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$.

Le signal de commutation de fréquence réglable f_e est disponible sur la maquette. Le réglage de f_e (tourner le potentiomètre correspondant et visualiser le signal de commutation à l'oscilloscope pour le réglage de f_e) se fera de façon à obtenir la valeur de f_n souhaitée, imposée par les valeurs dans le tableau 2.

Les valeurs de R_3 permettront d'obtenir la valeur du coefficient de qualité imposée par le tableau 2. On utilisera la formule :

$$Q_0 = \frac{R_3}{R_2}$$

La réalisation d'un filtre du 4ème ordre s'effectue par la mise en cascade de 2 blocs.

ATTENTION : les circuits étant fragiles, toute erreur de manipulation peut entraîner leur destruction.

En conséquence, **les points suivants doivent être scrupuleusement respectés** :

- alimentation +5V/-5V
- câblage et décâblage de la maquette hors tension
- mise sous tension de l'alimentation et ensuite du signal d'entrée.
- coupure du signal d'entrée puis de l'alimentation

• **Travail à effectuer** :

Au fur et à mesure des questions vous remplirez le tableau de la question 5. Vous allez devoir tracer plusieurs diagrammes de Bode pour des fréquences allant de 100Hz à 3 kHz, pour des raisons d'efficacité, vous effectuerez les mesures pour les points de fréquences suivants :

100Hz, 200Hz, 300Hz, 400Hz, 500Hz, 700Hz, 1kHz, 2kHz et 3kHz

1) Filtre de Butterworth du 2nd ordre

a) Réaliser un filtre de Butterworth du 2nd ordre ayant une fréquence de coupure de 500 Hz. L'ANNEXE 2 présente le processus de synthèse du filtre MF10.

Déterminer pour cela la valeur de $R_3 = \underline{\hspace{2cm}}$ et de la fréquence d'échantillonnage $f_e = \underline{\hspace{2cm}}$

b) Tracer la courbe de gain pour un signal d'entrée de fréquence comprise entre 100 Hz et 10 kHz (sur papier semi-log).

2) Filtre passe-bas de Butterworth d'ordre 4

a) Déterminer les 2 résistances R_3 et les fréquences f_e pour avoir une fréquence f_c de 500 Hz.

Filtre1 : $R_3 = \underline{\hspace{2cm}}$ / $f_e = \underline{\hspace{2cm}}$ Filtre2 : $R_3 = \underline{\hspace{2cm}}$ / $f_e = \underline{\hspace{2cm}}$

b) Tracer la courbe de gain sur le même papier semi-log utilisé à la question 1)

3) Filtre passe-bas de Bessel d'ordre 4

a) Déterminer les 2 résistances R_3 et les fréquences f_e pour avoir une fréquence f_c de 500 Hz.

Filtre1 : $R_3 = \underline{\hspace{2cm}}$ / $f_e = \underline{\hspace{2cm}}$ Filtre2 : $R_3 = \underline{\hspace{2cm}}$ / $f_e = \underline{\hspace{2cm}}$

b) Tracer la courbe de gain sur le même papier semi-log utilisé aux questions 1) et 2)

c) Relever le déphasage Φ pour $f=100\text{Hz}$, 200Hz , 300Hz et 400Hz . Calculer alors le temps de

propagation du filtre pour ces fréquences : $\tau = -\frac{\Phi}{\omega}$ (**faire un tableau**). Le temps de

propagation est-il constant dans la bande passante ?

4) Filtre passe-bas de Tchebytchev d'ordre 4 (2dB ripple)

a) Déterminer les 2 résistances R_3 et les fréquences f_e pour avoir une fréquence f_c de 500 Hz.

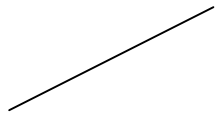
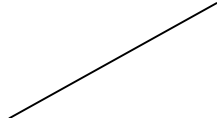
Filtre1 : $R_3 = \underline{\hspace{2cm}}$ / $f_e = \underline{\hspace{2cm}}$ Filtre2 : $R_3 = \underline{\hspace{2cm}}$ / $f_e = \underline{\hspace{2cm}}$

b) Tracer la courbe de gain sur le même papier semi-log utilisé aux questions 1) et 2). **Pour ce filtre uniquement ajouter les points de fréquence suivants : 150, 250, 350 et 450 Hz.**

c) Relever le déphasage Φ pour $f=100\text{Hz}$, 200Hz , 300Hz et 400Hz . Calculer alors le temps de propagation du filtre pour ces fréquences : $\tau = -\frac{\Phi}{\omega}$ (faire un tableau). Le temps de propagation est-il constant dans la bande passante ?

d) Vérifier que l'on retrouve bien le dépassement de 2 dB (ripple).

5) Conclusion

Type - ordre	Planéité du gain dans la B.P. ¹ et ondulation ²	Fréquence à -20dB ³	Selectivité, Raideur (k) ⁴	Constance du temps de propagation dans la B.P. ⁵
Butterworth – 2				
Butterworth – 4				
Bessel -4				
Tchebychev -4				

Notes :

¹ le gain est-il plat ou non dans la bande passante ? mettre ++,+,- et - -

² notez la valeur de l'ondulation si nécessaire.

³ Fréquence pour laquelle la gain vaut -20dB.

⁴ on calcule la sélectivité par : $k = \frac{f_{-3dB}}{f_{-20dB}} = \frac{500\text{Hz}}{f_{-20dB}}$ où f_{-20dB} est détaillé à la note 3.

⁵ le temps de propagation est-il constant dans la bande passante ou non ? mettre ++,+,- et - -. Dans les systèmes audio, les temps de propagation des circuits doivent être constant afin d'éviter toute altération de l'information (c'est-à-dire des paroles).

6) Impact de la fréquence d'échantillonnage

a) Reprendre le dernier filtre câblé (peut importe lequel) et relevé la fréquence de coupure à -3dB (f_{-3dB}) pour $f_e=10$, 20 et 40 kHz.

b) Tracer f_{-3dB} en fonction de f_e , conclusion.

c) Relever l'allure du signal de sortie .

On place à la sortie un filtre analogique passe-bas de fréquence de coupure 32 kHz.

Quelle est l'amélioration qu'il apporte, pourquoi ?

ANNEXE 1: Extrait de la documentation du MF10

MF10

Universal Monolithic Dual Switched Capacitor Filter

General Description

The MF10 consists of 2 independent and extremely easy to use, general purpose CMOS active filter building blocks. Each block, together with an external clock and 3 to 4 resistors, can produce various 2nd order functions. Each building block has 3 output pins. One of the outputs can be configured to perform either an allpass, highpass or a notch function; the remaining 2 output pins perform lowpass and bandpass functions. The center frequency of the lowpass and bandpass 2nd order functions can be either directly dependent on the clock frequency, or they can depend on both clock frequency and external resistor ratios. The center frequency of the notch and allpass functions is directly dependent on the clock frequency, while the highpass center frequency depends on both resistor ratio and clock. Up to 4th order functions can be performed by cascading the two 2nd order building blocks of the MF10; higher than 4th order functions can be obtained by cascading MF10 packages.

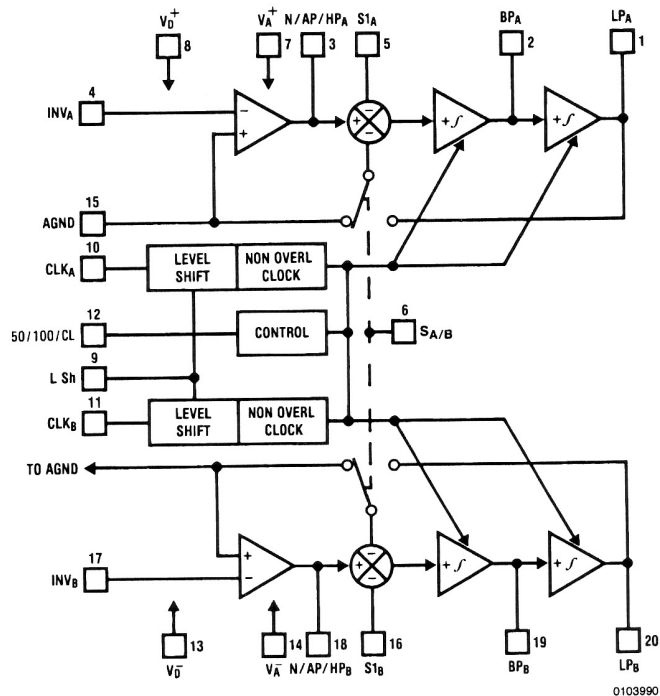
Any of the classical filter configurations (such as Butterworth, Bessel, Cauer and Chebyshev) can be formed.

For pin-compatible device with improved performance refer to LMF100 datasheet.

Features

- Easy to use
- Clock to center frequency ratio accuracy $\pm 0.6\%$
- Filter cutoff frequency stability directly dependent on external clock quality
- Low sensitivity to external component variation
- Separate highpass (or notch or allpass), bandpass, lowpass outputs
- $f_o \times Q$ range up to 200 kHz
- Operation up to 30 kHz
- 20-pin 0.3" wide Dual-In-Line package
- 20-pin Surface Mount (SO) wide-body package

System Block Diagram



Package in 20 pin molded wide body surface mount and 20 pin molded DIP.

01039901

