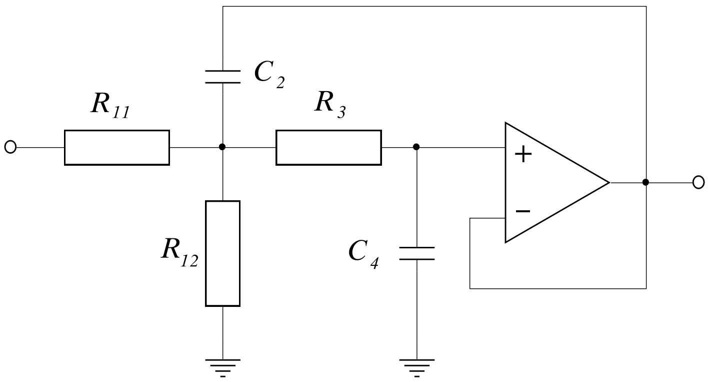
ANNEXE I
CELLULES NON INVERSEUSES, DITES DE *SALLEN-KEY*

I.1 Passe-bas de Sallen-Key pour Q<2



$$H(p) = K.\frac{\omega_p^2}{p^2 + (\omega_p / Q_p).p + \omega_p^2}$$

avec :

$$R_1 = \frac{R_{11}.R_{12}}{R_{11} + R_{12}} \qquad \omega_p^2 = \frac{1}{R_1.C_2.R_3.C_4}$$

$$K = \frac{R_{12}}{R_{11} + R_{12}} \qquad Q_p = \frac{\sqrt{(R_3.C_2)/(R_1.C_4)}}{1 + R_3 / R_1}$$

<u>Calcul des composants</u> :

- fournir en données : $f_p, Q_p, C_2, C_4 et K (\leq 1)$ *(!!! il faut* $C_2 \geq 4.Q_p^2.C_4$*)*
- calculer :

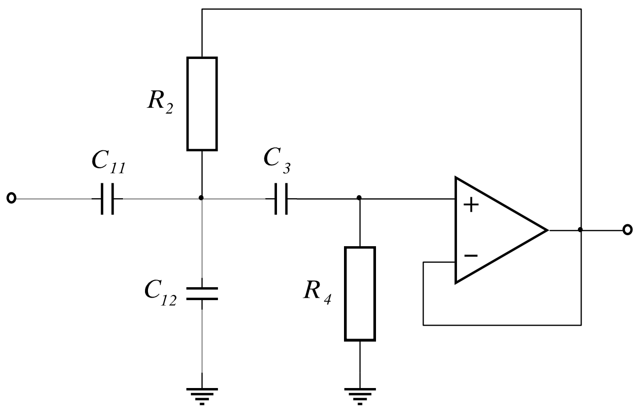
$$P = (\frac{1}{2Q_p^2}.\frac{C_2}{C_4} - 1) + \sqrt{(\frac{1}{2Q_p^2}.\frac{C_2}{C_4} - 1)^2 - 1}$$

$$R_1 = \frac{1}{2\pi f_p.\sqrt{P.C_2.C_4}} \quad R_3 = P.R_1$$

- si *K=1* alors $R_{11} = R_1 \quad R_{12} = \infty$

  sinon : $R_{11} = R_1 K \quad R_{12} = R_1 / (1 - K)$

I.2 Passe-haut de Sallen-Key pour Q<2



$$H(p) = K.\frac{p^2}{p^2 + (\omega_p / Q_p).p + \omega_p^2}$$

avec :

$$C_1 = C_{11} + C_{12} \qquad \omega_p^2 = \frac{1}{C_1.R_2.C_3.R_4}$$

$$K = \frac{C_{11}}{C_{11} + C_{12}} \qquad Q_p = \frac{\sqrt{(R_4.C_1)/(R_2.C_3)}}{1 + C_1 / C_3}$$

<u>Calcul des composants</u> :

- fournir en données: f_p, Q_p, C_{11}, C_{12} *(peut valoir 0) et* C_3
- calculer :

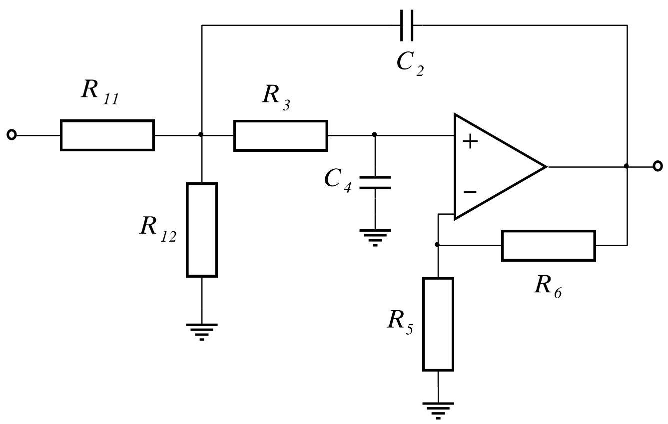
$$C_1 = C_{11} + C_{12}$$

$$P = Q_p^2.(2 + C_1 / C_3 + C_3 / C_1)$$

$$R_2 = \frac{1}{2\pi f_p.\sqrt{P.C_1.C_3}} \qquad R_4 = P.R_2$$

$$K = C_{11} / C_1$$

I.3 Passe-bas de Sallen-Key pour Q<5



$$H(p) = K.\frac{\omega_p^2}{p^2 + (\omega_p / Q_p).p + \omega_p^2}$$

$$R_1 = \frac{R_{11}.R_{12}}{R_{11} + R_{12}} \qquad \omega_p^2 = \frac{1}{R_1.C_2.R_3.C_4}$$

$$K = \frac{R_{12}}{R_{11} + R_{12}}.(1 + R_6 / R_5) \qquad Q_p = \frac{\sqrt{(R_3.C_2)/(R_1.C_4)}}{1 + R_3 / R_1 - R_6.C_2 /(R_5.C_4)}$$

Réglage : f_p par R_3 et Q_p par R_6

Calcul des composants :

- fournir en données: f_p, Q_p, C_2, C_4, K, R_5 *(en option)*
- pour obtenir une sensibilité minimum, utiliser la valeur de P suivante :

$$P = \frac{C_2 / C_4}{36Q_p^2}.\left[\sqrt{1 + 12Q_p^2.(1 + C_4 / C_2)} + 1\right]^2$$

- calculer **:**

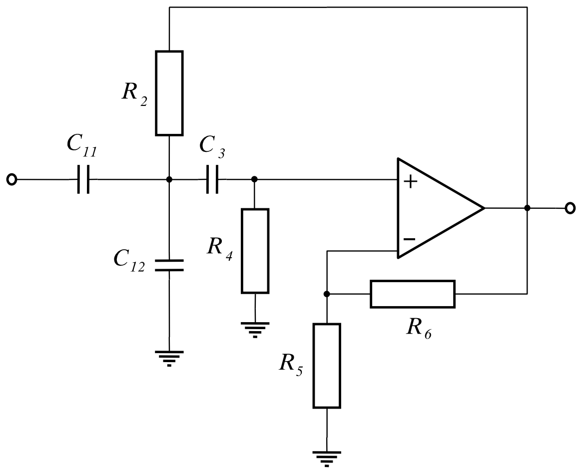
$$R_1 = \frac{1}{2\pi f_p.\sqrt{P.C_2.C_4}} \qquad R_3 = P.R_1$$

- affecter à R_5 la valeur nominale de résistance et calculer :

$$R_6 = R_5.\left[(1 + P).C_4 / C_2 - 1/ Q_p.\sqrt{P.C_4 / C_2}\right] \qquad K_0 = 1 + R_6 / R_5$$

- si $K = K_0$ ou $K>K_0$ alors $R_{11} = R_1$, $R_{12} = \infty$ et $K = K_0$
  sinon $R_{11} = R_1.K_0/K$, $R_{12} = R_1.K_0/(K_0 - K)$

I.4 Passe-haut de Sallen-Key pour Q<5



$$H(p) = K.\frac{p^2}{p^2 + (\omega_p / Q_p).p + \omega_p^2}$$

$$C_1 = C_{11} + C_{12} \qquad \omega_p^2 = \frac{1}{C_1.R_2.C_3.R_4}$$

$$K = \frac{C_{11}}{C_{11} + C_{12}}.(1 + R_6 / R_5) \qquad Q_p = \frac{\sqrt{(R_4.C_1(R_2.C_3)}}{1 + C_1 / C_3 - R_4.R_6 /(R_2.R_5)}$$

Réglage : f_p par R_2 ou R_3 et Q_p par R_5

Calcul des composants :

- fournir en données : f_p, Q_p, C_{11}, C_{12}, C_4, R_6 *(en option)*
- pour obtenir une sensibilité minimum, utiliser la valeur de *P* suivante :

$$C_1 = C_{11} + C_{12} \qquad P = \frac{C_1 / C_3}{4Q_p^2}.\left[\sqrt{1 + 12Q_p^2.(1 + C_3 / C_1)} - 1\right]^2$$

- calculer :

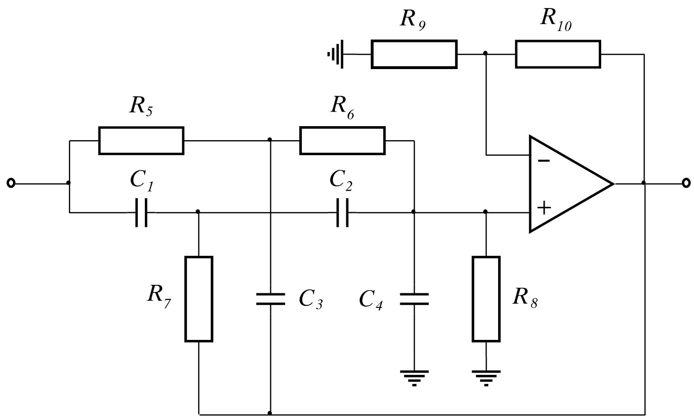
$$R_2 = \frac{1}{2\pi f_p.\sqrt{P.C_1.C_3}} \qquad R_4 = P.R_2$$

- affecter à R_5 la valeur nominale de résistance et calculer :

$$R_6 = R_5.\left[(1 + C_1 / C_3).1/ P - 1/ Q_p.\sqrt{C_1 /(P.C_3)}\right]$$

$$K = C_{11} / C_1.(1 + R_6 / R_5)$$

I.5 Réjecteur de fréquence de Sallen-Key (double T), pour Q<5



$$H(p) = K.\frac{p^2 + \omega_z^2}{p^2 + (\omega_p / Q_p).p + \omega_p^2}$$

$$C_S = \frac{C_1.C_2}{C_1 + C_2} \qquad R_S = R_5 + R_6 \qquad K = \frac{1 + R_{10} / R_9}{1 + C_4 / C_S}$$

$$\omega_z^2 = \frac{1}{R_5.R_6.C_S.C_3} = \frac{1}{R_S.R_7.C_1.C_2}$$

$$\omega_p = \omega_z.\sqrt{(1 + R_S / R_8)/(1 + C_4 / C_S)}$$

$$Q' = \frac{1}{2.\sqrt{(1 + C_2 / C_1).(1 + C_2 / C_3)}}$$

$$Q_p = Q'.\frac{(1 + C_4 / C_S).\omega_p / \omega_z}{Q'.(1/(R_8.C_S.\omega_z) + R_S.C_S.\omega_z) - R_{10} / R_9}$$

Réglage : f_z avec R_5, R_6 et R_7 itérativement; f_p avec R_8; Q_p avec R_{10}

Calcul des composants :

- fournir en données: f_z, f_p, Q_p, C_1, C_2, C_3, C_4, et R_9 *(en option)*

  !!! il faut :

  $$C_4 \geq \left| (f_z^2 / f_p^2 - 1).\frac{C_1.C_2}{C_1 + C_2} \right|$$ pour que H (voir ci-dessous) soit >=0

- calculer :

$$Q' = \frac{1}{2.\sqrt{(1+C_2/C_1).(1+C_2/C_3)}} \qquad C_S = \frac{C_1.C_2}{C_1+C_2}$$

$$R_5 = \frac{1}{2\omega_z.Q'.(C_2+C_3)} \qquad R_6 = \frac{(1+C_2/C_1)}{R_5.\omega_z^2.C_2.C_3}$$

$$R_S = R_5 + R_6 \qquad R_7 = \frac{1}{R_S.\omega_z^2.C_1.C_2}$$

$$H = (1+C_4/C_S).(\omega_p/\omega_z)^2 - 1$$

$$si\ H = 0\ alors\ R_8 = \infty$$

$$si\ H > 0\ alors\ R_8 = (R_5+R_6)/H$$

- Si R_9 n'a pas été fournie, on lui affecte une valeur nominale de 10 kΩ. Calculer alors :

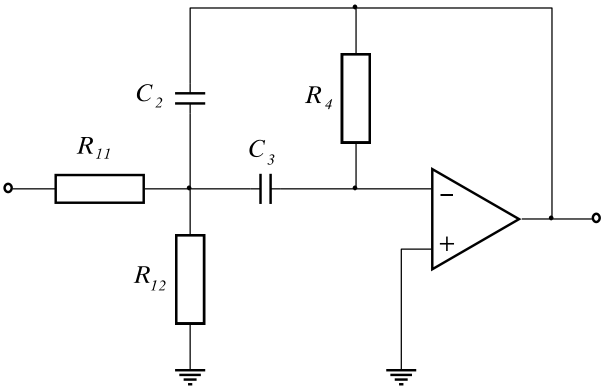
$$R_{10} = R_9.Q'\left[\frac{1}{R_8.C_S.\omega_z} + R_S.C_4.\omega_z - \frac{(1+C_4/C_S).\omega_p/\omega_z}{Q_p}\right]$$

$$K = \frac{1+R_{10}/R_9}{1+C_4/C_S}$$

- On constate en général que cette valeur de K n'est pas celle qu'on veut. On peut alors modifier la valeur des capacités imposées au départ pour obtenir finalement (par tâtonnement) la valeur de K imposée.

ANNEXE II
CELLULES INVERSEUSES, DITES DE *RAUCH* (OU MULTIPLE-FEEDBACK : *MFB*)

II.1 Passe-bande de Rauch (de type *R*) pour Q<2



$$H(p) = -K.\frac{(\omega_p / Q_p).p}{p^2 + (\omega_p / Q_p).p + \omega_p^2}$$

avec :

$$R_1 = \frac{R_{11}.R_{12}}{R_{11} + R_{12}} \qquad \omega_p^2 = \frac{1}{R_1.C_2.C_3.R_4}$$

$$K = \frac{R_{12}}{R_{11} + R_{12}}.K_0 \qquad Q_p = \frac{\sqrt{(R_4.C_2)/(R_1.C_3)}}{1 + C_2 / C_3}$$

$$K_0 = Q_p^2.(1 + C_3 / C_2)$$

<u>Calcul des composants</u> :

- fournir en données : f_p, Q_p, C_2, C_3 et K
- calculer :

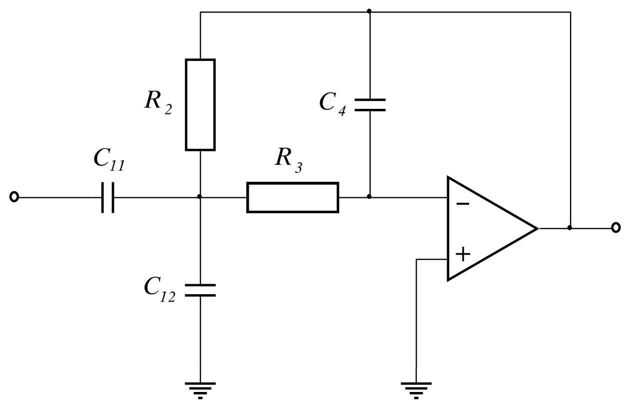
$$P = Q_p^2.(2 + C_2 / C_3 + C_3 / C_2)$$

$$R_1 = \frac{1}{2\pi f_p.\sqrt{P.C_2.C_3}} \qquad R_4 = P.R_1$$

$$K_0 = Q_p^2.(1 + C_3 / C_2)$$

- si $K = K_0$ ou $K > K_0$ alors $R_{11} = R_1$ $R_{12} = \infty$
  sinon : $R_{11} = R_1.K_0 / K$ $R_{12} = R_1.K_0 / (K_0 - K)$

II.2 Passe-bande de Rauch (de type *C*) pour Q<2



$$H(p) = -K.\frac{(\omega_p / Q_p).p}{p^2 + (\omega_p / Q_p).p + \omega_p^2}$$

avec :

$$C_1 = C_{11} + C_{12} \qquad \omega_p^2 = \frac{1}{C_1.R_2.R_3.C_4}$$

$$K = \frac{C_{11}}{C_{11} + C_{12}}.K_0 \qquad Q_p = \frac{\sqrt{(R_3.C_1)/(R_2.C_4)}}{1 + R_3 / R_2}$$

$$K_0 = Q_p.\sqrt{(C_1.R_2)/(C_4.R_3)}$$

Calcul des composants :

- fournir en données: *f_p, Q_p, C_{11}, C_{12} (peut valoir 0) et C_4* (*!!!* Il faut que $(C_{11} + C_{12}) \geq 4Q_p^2.C_4$)
- calculer:

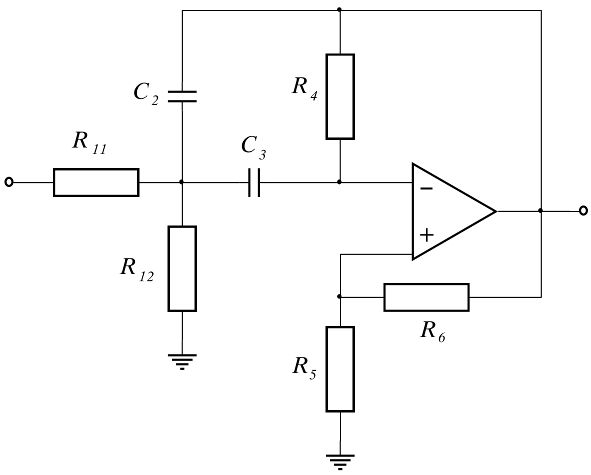
$$C_1 = C_{11} + C_{12}$$

$$P = (\frac{1}{2Q_p^2}.\frac{C_1}{C_4} - 1) + \sqrt{(\frac{1}{2Q_p^2}.\frac{C_1}{C_4} - 1)^2 - 1}$$

$$R_2 = \frac{1}{1\pi f_p.\sqrt{P.C_1.C_4}} \qquad R_3 = P.R_2$$

$$K_0 = Q_p.\sqrt{C_1/(P.C_4)} \qquad K = K_0.C_{11} / C_1$$

II.3 Passe-bande de Rauch (de type *R*) pour Q<10



$$H(p) = -K.\frac{(\omega_p / Q_p).p}{p^2 + (\omega_p / Q_p).p + \omega_p^2}$$

avec :

$$R_1 = \frac{R_{11}.R_{12}}{R_{11} + R_{12}} \qquad \omega_p^2 = \frac{1}{R_1.C_2.C_3.R_4}$$

$$K = \frac{R_{12}}{R_{11} + R_{12}}.Q_p.(1 + R_5 / R_6).\sqrt{(C_3.R_4)/(R_1.C_2)}$$

$$Q_p = \frac{\sqrt{(C_2.R_4)/(R_1.C_3)}}{1 + C_2 / C_3 - R_4.R_5 /(R_1.R_6)}$$

Réglage : f_p par R_4 et Q_p par R_5

Calcul des composants :

- fournir en données: f_p, Q_p, C_2, C_3, K, R_6 *(en option)*
- pour obtenir une sensibilité minimum, utiliser la valeur de *P* suivante :

$$P = \frac{C_2 / C_3}{4Q_p^2}.\left[\sqrt{1 + 12Q_p^2.(1 + C_3 / C_2)} - 1\right]^2$$

- calculer :

$$R_1 = \frac{1}{2\pi f_p.\sqrt{P.C_2.C_3}} \qquad R_4 = P.R_1$$

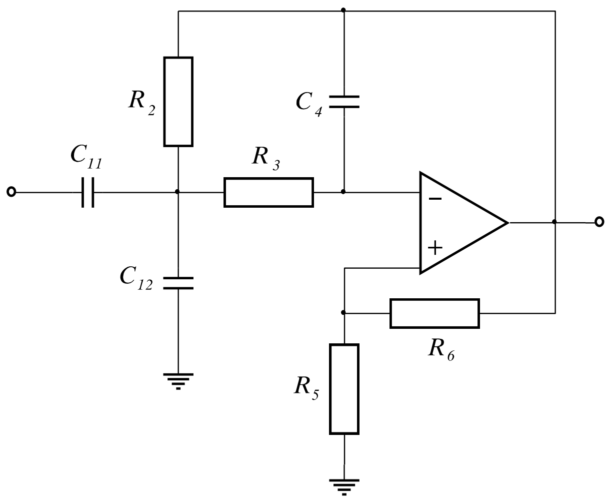
- affecter à R_6 la valeur nominale de résistance et calculer :

$$R_5 = R_6.\left[(1 + C_2 / C_3)/ P - 1/ Q_p.\sqrt{C_2 /(P.C_3)}\right]$$

$$K_0 = Q_p.(1 + R_5 / R_6).\sqrt{P.C_3 / C_2}$$

- si $K = K_0$ ou $K > K_0$, alors $R_{11} = R_1$, $R_{12} = \infty$ et $K = K_0$
  sinon $R_{11} = R_1.K_0/K$, $R_{12} = R_1.K_0/(K_0-K)$

II.4 Passe-bande de Rauch (de type *C*) pour Q<10



(même *H(p)* que pour la structure précédente)

$$C_1 = C_{11} + C_{12} \qquad \omega_p^2 = \frac{1}{C_1.R_2.R_3.C_4}$$

$$K = \frac{C_{11}}{C_{11} + C_{12}}.Q_p.(1 + R_5 / R_6).\sqrt{(C_1.R_2)/(R_3.C_4)}$$

$$Q_p = \frac{\sqrt{(R_3.C_1)/(R_2.C_4)}}{1 + R_3 / R_2 - C_1.R_5 /(C_4.R_6)}$$

$$\Gamma_A^{Q_p} = Q_p.\sqrt{(R_2.C_1)/(R_3.C_4)}.(1 + R_5 / R_6)^2$$

<u>Réglage</u> : f_p par R_2 ou R_3 et Q_p par R_5

<u>Calcul des composants</u> :

- fournir en données : f_p, Q_p, C_{11}, C_{12}, C_4, R_6 *(en option)*
- pour obtenir une sensibilité minimum, utiliser la valeur de *P* suivante:

$$C_1 = C_{11} + C_{12}$$

$$P = \frac{C_1 / C_4}{36Q_p^2}.\left[\sqrt{1 + 12Q_p^2.(1 + C_4 / C_1)} + 1\right]^2$$

- calculer :

$$R_2 = \frac{1}{2\pi f_p.\sqrt{P.C_1.C_4}} \qquad R_3 = P.R_2$$

- affecter à R_6 la valeur nominale de résistance et calculer :

$$R_5 = R_6.\left[(1 + P).C_4 / C_1 - 1/ Q_p.\sqrt{P.C_4 / C_1}\right]$$

$$K = C_{11} / C_1.(1 + R_5 / R_6).Q_p.\sqrt{C_1 /(P.C_4)}$$

ANNEXE III
CELLULE UNIVERSELLE DE *DELIYANNIS ET FRIEND*

III.1 Cellule de Deliyannis et Friend pour Q<30

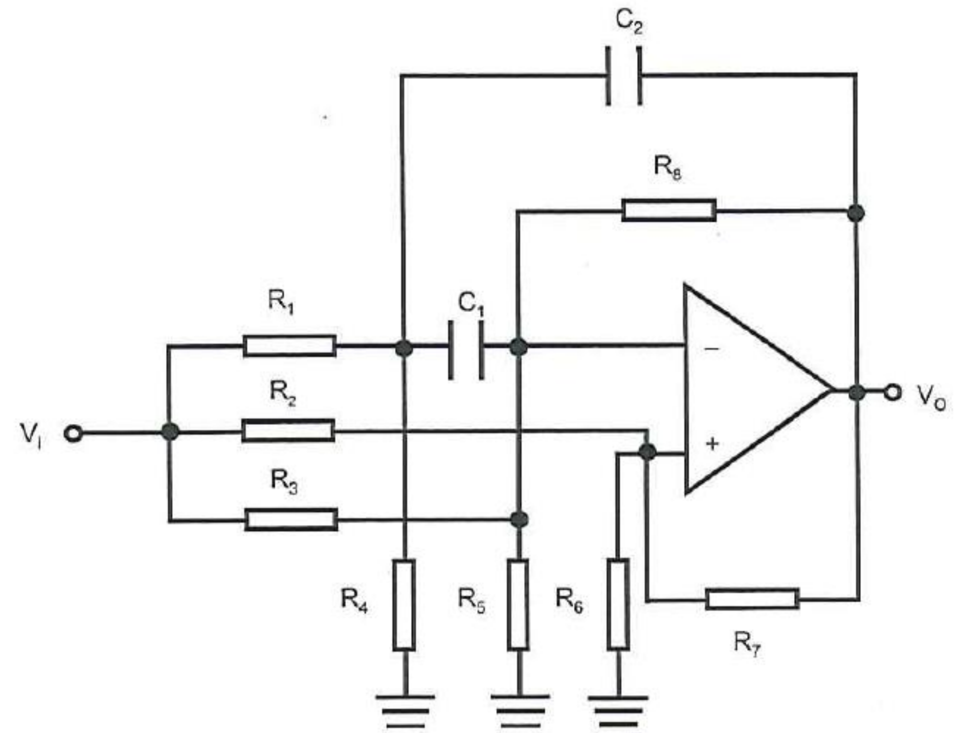


Figure 31 ■ Cellule universelle de Deliyannis et Friend

La fonction de transfert de la cellule universelle représentée figure 31 est de la forme :

$$H(p) = \frac{mp^2 + np + q}{ap^2 + bp + c} \qquad (8.145)$$

En supposant que le gain de l'amplificateur opérationnel est infini et en posant $C_1 = C_2 = C$, les coefficients de $H(p)$ sont donnés par les formules suivantes :

$$a = (G_3 + G_6)C^2 \qquad (8.146)$$

$$b = [2G_8(G_3 + G_6) - G_7(G_1 + 2G_2 + G_4 + 2G_5)]C \qquad (8.149)$$

$$c = (G_1 + G_4)[G_8(G_3 + G_6) - G_7(G_2 + G_5)] \qquad (8.150)$$

$$m = G_3C^2 \qquad (8.151)$$

$$n = G_3(G_1 + 2G_2 + G_4 + 2G_5 + 2G_8) - (G_1 + 2G_2)(G_3 + G_6 + G_7) \qquad (8.152)$$

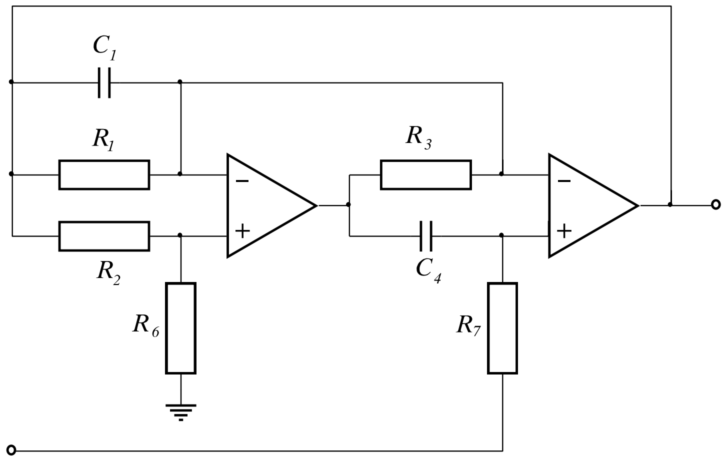
$$q = (G_1 + G_4)[G_3(G_2 + G_5 + G_8) - G_2(G_3 + G_6 + G_7)] \qquad (8.153)$$

où $G_n = 1 / R_n$.

(extrait de G. Mangiante, *Analyse et synthèse des filtres actifs analogiques*, Lavoisier, 2005).

ANNEXE IV CELLULES DE *FLIEGHE* OU D'*ANTONIOU*, BASEES SUR LE *CONVERTISSEUR D'IMPEDANCE GENERALISE* OU *GIC*

IV.1 Passe-bas de Flieghe, pour Q<30



$$H(p) = K.\frac{\omega_p^2}{p^2 + (\omega_p / Q_p).p + \omega_p^2}$$

avec :

$$K = 1 + R_2 / R_6 \quad \omega_p^2 = \frac{R_6}{R_2.R_3.R_7.C_1.C_4.} \quad Q_p = \omega_p.R_1.C_1$$

Réglage : f_p par R_7, Q_p par R_1.

Calcul des composants :

- fournir en données: f_p, Q_p, C
- calculer :

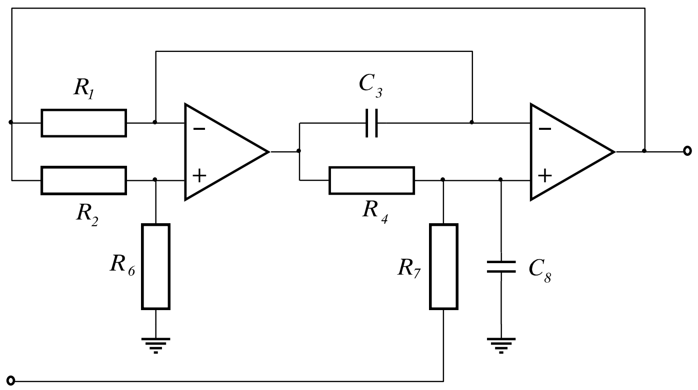
$$R_0 = \frac{1}{2\pi f_p.C}$$

- entrer en donnée : R_d la valeur discrète proche de R_0
- calculer :

$$C_1 = C_4 = C \qquad R_2 = R_3 = R_6 = R_d \Rightarrow K = 2$$

$$R_1 = Q_p.R_0 \qquad R_7 = R_0^2 / R_d$$

IV.2 Passe-bande de Flieghe, pour Q<30



$$H(p) = K.\frac{(\omega_p / Q_p).p}{p^2 + (\omega_p / Q_p).p + \omega_p^2}$$

avec :

$$K = 1 + R_2 / R_6 \qquad \omega_p^2 = \frac{R_2}{R_1.R_4.R_6.C_3.C_8} \qquad Q_p = \omega_p.R_7.C_8$$

Réglage : f_p par R_4, Q_p par R_7.

Calcul des composants :

- fournir en données: f_p, Q_p, C
- calculer :

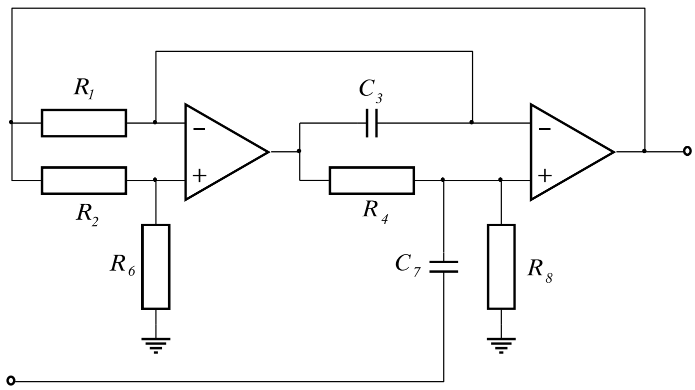
$$R_0 = \frac{1}{2\pi f_p.C}$$

- entrer en donnée : R_d la valeur discrète proche de R_0
- calculer :

$$C_3 = C_8 = C \qquad R_1 = R_2 = R_6 = R_d \Rightarrow K = 2$$

$$R_7 = Q_p.R_0 \qquad R_4 = R_0^2 / R_d$$

IV.3 Passe-haut de Flieghe, pour Q<30



$$H(p) = K.\frac{p^2}{p^2 + (\omega_p / Q_p).p + \omega_p^2}$$

avec :

$$K = 1 + R_2 / R_6 \qquad \omega_p^2 = \frac{R_2}{R_1.R_4.R_6.C_3.C_7} \qquad Q_p = \omega_p.R_8.C_7$$

Réglage : f_p par R_4, Q_p par R_8.

Calcul des composants :

fournir en données: *fp*, *Qp*, *C*

calculer :

$$R_0 = \frac{1}{2\pi f_p.C}$$

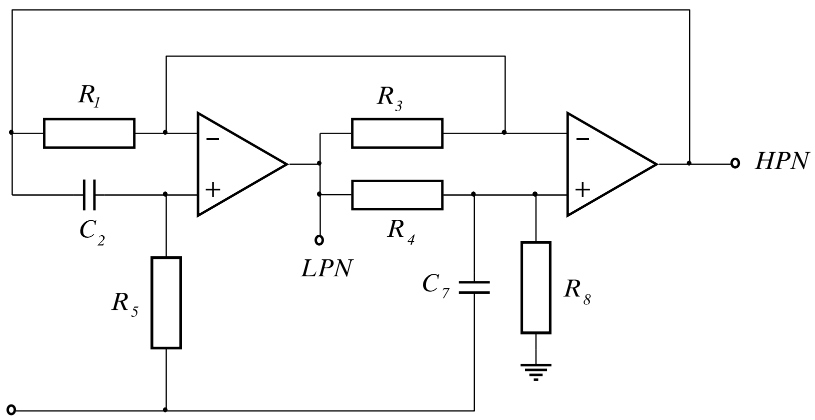
entrer en donnée : *Rd* la valeur discrète proche de *R0*

calculer :

$$C_3 = C_7 = C \qquad R_1 = R_2 = R_6 = R_d \Rightarrow K = 2$$

$$R_8 = Q_p.R_0 \qquad R_4 = R_0^2 / R_d$$

IV.4 Réjecteur de fréquence de Flieghe, pour Q<30



$$H(p) = \frac{p^2 + \omega_z^2}{p^2 + (\omega_p / Q_p).p + \omega_p^2}$$

avec :

$$\omega_p^2 = \frac{R_3}{R_1.R_4.R_5.C_2.C_7} \qquad Q_p = \omega_p.C_7.R_8$$

$$\omega_{zlpn} = \omega_p.\sqrt{1 + R_4 / R_8} \qquad \omega_{zhpn} = \omega_p.\sqrt{1 - R_1.R_4 / (R_3.R_8)}$$

Réglage : f_p par R_4, f_p par R_5, Q_p par R_8.

Calcul des composants :

- fournir en données: f_z, fp, Q_p, C
- calculer **:**

$$R_0 = \frac{1}{2\pi f_p.C}$$

- entrer en donnée : R_d la valeur discrète proche de R_0
- calculer **:**

$$C_2 = C_7 = C \quad R_1 = R_3 = R_d$$
$$R_8 = Q_p.R_0$$

- cas LPN (type passe-bas : $\omega_z > \omega_p$) : $R_4 = R_8.(1 - (\omega_z / \omega_p)^2)$
  cas HPN (type passe-haut : $\omega_z < \omega_p$) : $R_4 = R_8.((\omega_z / \omega_p)^2 - 1)$
- et finalement :

$$R_5 = R_0^2 / R_4$$

ANNEXE V
CELLULE UNIVERSELLE DE *TOW-THOMAS*

V.1 Cellule de Tow-Thomas pour Q<100

La cellule de Tow et Thomas peut être modifiée de façon à obtenir une cellule universelle permettant d'obtenir toutes les fonctions de filtrage (figure 24).

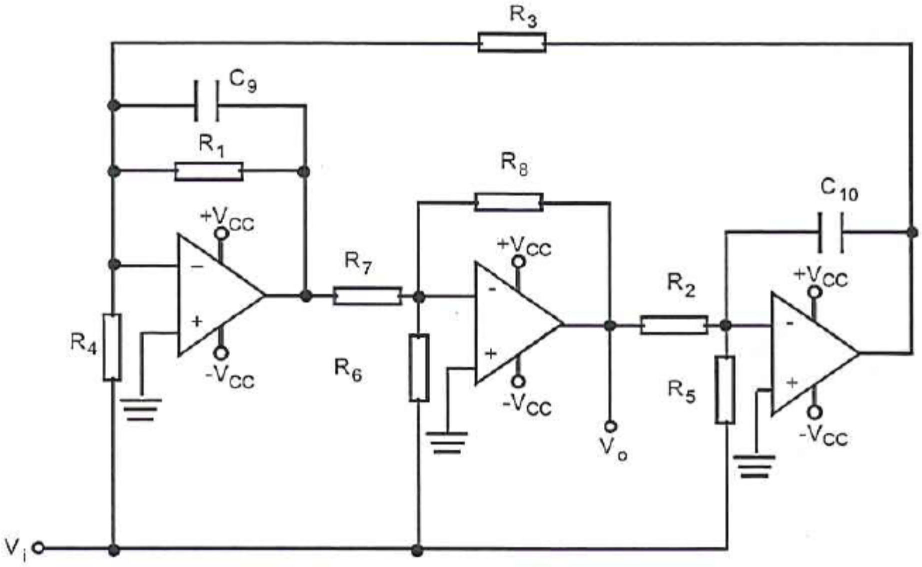


Figure 24 ■ Cellule de Tow et Thomas généralisée

La fonction de transfert s'écrit :

$$H(p) = -\frac{R_8}{R_6}\,\frac{p^2 + \left(\frac{1}{R_1C_9} - \frac{1}{R_4C_9}\frac{R_6}{R_7}\right)p + \frac{R_6}{R_7}\frac{1}{R_3R_5C_9C_{10}}}{p^2 + \frac{1}{R_1C_9}p + \frac{R_8}{R_7}\frac{1}{R_2R_3C_9C_{10}}} \tag{9.48}$$

soit :

$$H(p) = K\frac{p^2 + \frac{\omega_z}{Q_z}p + \omega_z^2}{p^2 + \frac{\omega_p}{Q_p}p + \omega_p^2} \equiv \frac{K_1p^2 + K_2p + K_3}{p^2 + \frac{\omega_p}{Q_p}p + \omega_p^2} \tag{9.49}$$

avec :

$$K = -\frac{R_8}{R_6} \tag{9.50}$$

$$Q_p = R_1\sqrt{\frac{R_8C_9}{R_2R_3R_7C_{10}}} \tag{9.51}$$

$$\omega_p = \sqrt{\frac{R_8}{R_2R_3R_7C_9C_{10}}} \tag{9.52}$$

$$Q_z = \frac{\sqrt{\frac{R_6C_9}{R_3R_7R_5C_{10}}}}{\frac{1}{R_1} - \frac{R_6}{R_4R_7}} \tag{9.53}$$

$$\omega_z = \sqrt{\frac{R_6}{R_3 R_5 R_7 C_9 C_{10}}} \tag{9.54}$$

Les différents types de filtres sont obtenus en ajustant les coefficients K_j dans la relation (9.49) :

– filtre passe-bas : $K_1 = 0$ et $K_2 = 0 \quad \Leftrightarrow \quad R_4 \to \infty$ et $R_6 \to \infty$

– filtre passe-haut : $K_2 = 0$ et $K_3 = 0 \quad \Leftrightarrow \quad R_1 = \dfrac{R_4 R_7}{R_6}$ et $R_6 \to \infty$

– filtre passe-bande : $K_1 = 0$ et $K_3 = 0 \Leftrightarrow R_5 \to \infty$ et $R_6 \to \infty$

– filtre coupe-bande : $K_2 = 0 \quad \Leftrightarrow \quad R_1 = \dfrac{R_4 R_7}{R_6}$ et $R_5 = \dfrac{R_6 R_2}{R_8}$.

(extrait de G. Mangiante, *Analyse et synthèse des filtres actifs analogiques*, Lavoisier, 2005).