

# De la puce à l'oreille

- Jean-Claude BODOT -

## Asservissement en pression d'un HP chapitre 1

Le fonctionnement du HP électrodynamique est supposé connu.

Les effets de son inclusion dans une enceinte close également.

Dans le cas contraire, vous pouvez vous reporter sur les chapitres « Les HP intro » et « l'enceinte close ».

### 1- Introduction:

Vouloir asservir un HP, revient à se poser quelques questions préalables.

- La première qui vient à l'idée, *Asservir quoi par rapport à quoi.*

A la première partie de cette question, correspond une réponse quasi immédiate: le vecteur de nos sensations auditives, étant la pression acoustique. La *pression acoustique* délivrée par le HP doit être *contrôlée*.

A la seconde, correspond le signal électrique traditionnellement disponible à l'entrée de l'amplificateur et supposé être à l'image d'une pression acoustique à reproduire. Vue sous l'angle d'un servomécanisme, ce signal est la *grandeur de consigne*.

- Quel capteur utiliser ?

Après quelques constats:

- Le HP électrodynamique est réversible.
- La force contre électromotrice engendrée par le mouvement du HP est à l'image de sa vitesse de déplacement.
- Le HP a tous les éléments élémentaires d'un microphone électrodynamique. Un tel micro est un transducteur de vitesse.
- Le relevé de la courbe impédance fréquence, d'un HP revient à tracer le module de l'impédance vue à ses bornes.

Cette impédance  $|Z_{HP}|$  est la résultante d'une impédance complexe

$$Z_{HP(\omega)} = Z_e(\omega) + Z_{em(\omega)} \text{ dans laquelle} \quad \text{(CFB-1)}$$

$$Z_e(\omega) = R_e + j \cdot \omega \cdot L_e = R_e + p \cdot L_e \quad \text{(CFB-2)}$$

$R_e$  représente la résistance purement électrique de la bobine mobile et  $L_e$  sa composante inductive.

$Z_{em(\omega)}$  est l'impédance motionnelle, encore appelée électrocinétique du HP.

Elle est le reflet de l'ensemble des impédances mécaniques mises en jeu par le mouvement de la membrane.

Et comprend les impédances

- purement mécanique du HP,
- de radiation de la face avant du HP
- liées à la charge et l'impédance de rayonnement arrière du HP
- occasionnellement les impédances des éléments en mouvements et environnants par inertance mutuelle. (analogue à l'induction mutuelle)

- Si  $u_{HP}$  est la tension instantanée appliquée au HP, la tension instantanée aux bornes de l'impédance motionnelle est

$$u_{Z_{em}} = u_{HP} \cdot Z_{em(\omega)} / (Z_e(\omega) + Z_{em(\omega)}) \quad \text{(CFB-3)}$$

De plus l'analyse du HP nous a appris que cette tension est égale au produit de la vitesse du diaphragme par le facteur de force  $B.l$  du HP

$$u_{Z_{em}} = B.l.v. \quad \text{(CFB-4)}$$

Le facteur de force  $B.l$  pouvant être supposé constant tant que la bobine baigne intégralement dans le champ magnétique de l'entrefer.

- Extraire  $u_{Z_{em}}$  = revient donc à connaître la vitesse instantanée de déplacement de la membrane. Un pont dit de vitesse permet d'extraire un signal image de la vitesse.

D'autres procédés sont possibles,

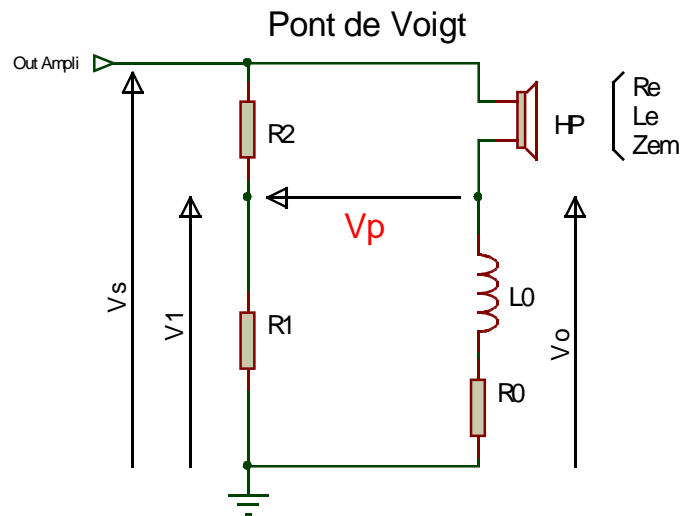
- Utiliser un HP à double bobine. La première bobine étant génératrice de la pression, la seconde traduisant la vitesse de déplacement. L'induction mutuelle entre les deux bobines ne permet pas une lecture directe de la vitesse de déplacement. De surcroît la seconde bobine alourdit l'équipage mobile.
- Placer un capteur de pression solidaire de la bobine. Ce capteur est un accéléromètre. Préconisé par Philips dans les années 70 il donne de bons résultats. Sa masse ajoutée à celle de l'équipage mobile modifie les caractéristiques du HP. Elle ne lui permet donc pas de s'adapter à tous types de HP.
- En fait toute modification du HP est pénalisante.

Tout cela m'a donc orienté vers le pont de vitesse.

## 1 - Les ponts de mesures de la vitesse

### 1-1 Le pont de Voigt

Il en a eu l'idée en 1928. Cette idée est remarquable dans la mesure où elle est apparue 3 ans seulement après la naissance du HP électrodynamique moderne. Les moyens technologiques de l'époque ne lui ont pas permis d'aboutir. Son schéma est le suivant:



La tension  $V_s$  est la tension de sortie de l'amplificateur. Cette tension est appliquée simultanément aux 2 branches du pont.

La loi des mailles fait écrire, dans le respect des flèches du schéma:  $V_1 - V_p - V_0 = 0$  (CFB-5)

Soit  $V_p = V_1 - V_0$  (CFB-6)

La tension  $V_1 = V_s \cdot R_1 / (R_1 + R_2)$  (CFB-7)

L'impédance du HP  $Z_{HP(\omega)} = R_e + p \cdot L_e + Z_{em(\omega)}$  (CFB-8)

La tension  $V_0 = V_s \cdot (R_0 + p \cdot L_0) / (R_0 + p \cdot L_0 + R_e + p \cdot L_e + Z_{em(\omega)})$  (CFB-9)

que l'on peut mettre sous les formes successives

$$V_0 = V_s \cdot [R_0(1 + p \cdot L_0 / R_0)] / (R_0 + R_e) [1 + p \cdot (L_0 + L_e) / (R_0 + R_e) + Z_{em(\omega)} / (R_0 + R_e)] \quad (\text{CFB-10})$$

$$V_0 = V_s \cdot [R_0 / (R_0 + R_e)] \cdot [(1 + p \cdot L_0 / R_0)] / [1 + p \cdot (L_0 + L_e) / (R_0 + R_e) + Z_{em(\omega)} / (R_0 + R_e)] \quad (\text{CFB-11})$$

deux parties distinctes apparaissent

**Si la tension  $V_s$  est continue ( $\omega=0$ ), la tension  $V_0 = V_s \cdot R_0 / (R_0 + R_e)$ .** (CFB-12)

$$V_p = V_1 - V_0 = V_s \cdot R_1 / (R_1 + R_2) = V_s \cdot R_0 / (R_0 + R_e) \quad (\text{CFB-13})$$

Dans cette condition le pont est en équilibre si  $V_p = 0 \Leftrightarrow R_1 / (R_1 + R_2) = R_0 / (R_0 + R_e)$  (CFB-14)

Soit lorsque  $R_2 / R_1 = R_e / R_0$  (CFB-15)

Cette condition d'équilibre obtenue appelons  $\alpha = R_1 / (R_1 + R_2) = R_0 / (R_0 + R_e)$  (CFB-16)

Quelle que soit la fréquence (CFB-11) s'écrit

$$V_0 = V_s \cdot \alpha \cdot [(1 + p \cdot L_0 / R_0)] / [1 + p \cdot (L_0 + L_e) / (R_0 + R_e) + Z_{em(\omega)} / (R_0 + R_e)] \quad (\text{CFB-17})$$

de (CFB-7)  $V_1 = \alpha \cdot V_s$ , (CFB-18)

et (CFB-6)  $V_p = \alpha \cdot V_s - \alpha \cdot V_s \cdot \left[ \frac{(1+p \cdot L_0 / R_0)}{[1 + p \cdot (L_0 + L_e) / (R_0 + R_e) + Z_{em(\omega)} / (R_0 + R_e)]} \right]$  (CFB-19)

soit  $V_p = \alpha \cdot V_s \cdot \left( 1 - \left[ \frac{(1+p \cdot L_0 / R_0)}{[1 + p \cdot (L_0 + L_e) / (R_0 + R_e) + Z_{em(\omega)} / (R_0 + R_e)]} \right] \right)$  (CFB-20)

Afin d'alléger un peu l'écriture appelons  $R_{et} = R_0 + R_e$  (CFB-21)

la totalité des résistances de la branche du pont comportant le HP et

$$L_{et} = L_0 + L_e, \quad (CFB-22)$$

la somme des inductances de cette même branche.

$$V_p = \alpha \cdot V_s \cdot \left( \frac{1 + p \cdot L_{et} / R_{et} + Z_{em(\omega)} / R_{et} - (1 + p \cdot L_0 / R_0)}{[1 + p \cdot L_{et} / R_{et} + Z_{em(\omega)} / R_{et}]} \right) \quad (CFB-23)$$

$$V_p = \alpha \cdot V_s \cdot \left( \frac{p \cdot L_{et} / R_{et} - p \cdot L_0 / R_0 + Z_{em(\omega)} / R_{et}}{[1 + p \cdot L_{et} / R_{et} + Z_{em(\omega)} / R_{et}]} \right) \quad (CFB-24)$$

$$V_p = \alpha \cdot V_s \cdot \left( \frac{p \cdot (L_{et} / R_{et} - L_0 / R_0) + Z_{em(\omega)} / R_{et}}{[1 + p \cdot L_{et} / R_{et} + Z_{em(\omega)} / R_{et}]} \right) \quad (CFB-25)$$

Si  $L_{et} / R_{et} - L_0 / R_0 = 0$  soit si  $L_{et} / R_{et} = L_0 / R_0$  (CFB-26)

alors  $V_p = \alpha \cdot V_s \cdot (Z_{em(\omega)} / R_{et}) / [1 + p \cdot L_{et} / R_{et} + Z_{em(\omega)} / R_{et}]$  (CFB-27)

ou  $V_p = \alpha \cdot V_s \cdot Z_{em(\omega)} / (R_{et} + p \cdot L_{et} + Z_{em(\omega)})$  (CFB-28)

que l'on peut écrire  $V_p = \alpha \cdot B \cdot L \cdot v$  (CFB-29)

Ce pont mesure bien la vitesse de déplacement du diaphragme

### Remarques

– La formule (CFB-26) n'est pas pratique d'emploi.

La constante de temps électrique totale de la branche du pont dans laquelle se trouve la HP

$$L_{et} / R_{et} = (L_0 + L_e) / (R_0 + R_e) = L_0 / R_0 \Rightarrow L_0 / (L_0 + L_e) = R_0 / (R_0 + R_e) = \alpha \quad (CFB-30)$$

et  $1 / (1 + L_e / L_0) = 1 / (1 + R_e / R_0) \Rightarrow L_e / L_0 = R_e / R_0$  (CFB-31)

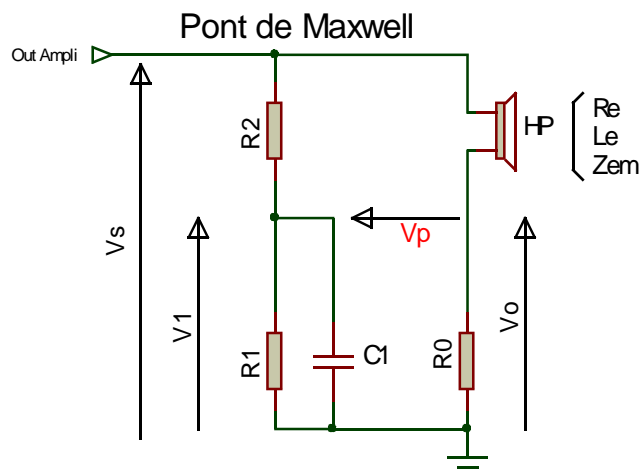
- La réalisation précise du couple  $L_0, R_0$  est délicate. Il ne faudra pas oublier que par nature  $L_0$  est dotée de sa résistance propre.
- Quoique de valeur faible  $L_0$ , peut capter les variations du champ magnétique qui l'environne.
- Comme tout les ponts qui suivront, la condition d'équilibre n'est valable que pour une température de fonctionnement de la bobine mobile. Un calcul de la sensibilité à la température de chacun des ponts est nécessaire pour valider le système.
- C'est ce pont qu'a utilisé la société 3A pour son asservissement.
- D'un point de vue électrique, l'équilibre du pont est obtenu sans mouvement du HP. On le dit 'bobine bloquée'.

Devant les difficulté de reproductibilité de ce système, certains eurent l'idée d'employer le pont de Maxwell.

### 1-2 Le pont de Maxwell

A l'origine, il permet de mesurer une self résistante. Il permet de déterminer les valeurs des résistance et inductance du composant.

Appliqué à la mesure de la vitesse du cône d'un HP, son schéma de principe est:



J'ai employé les mêmes repères que pour le pont de Voigt.

La tension  $V_0 = V_s \cdot R_0 / (R_0 + Z_{HP(\omega)}) = V_s \cdot R_0 / (R_0 + Z_{HP(\omega)}) = V_s \cdot R_0 / (R_0 + R_e + p \cdot L_e + Z_{em(\omega)})$  (CFB-32)

$$V_0 = V_s \cdot R_0 / [(R_0 + R_e) (1 + p \cdot L_e / (R_0 + R_e) + Z_{em(\omega)} / (R_0 + R_e))] \quad (CFB-33)$$

$$V_0 = V_s \cdot [R_0 / (R_0 + R_e)] \cdot [1 / (1 + p \cdot L_e / (R_0 + R_e) + Z_{em(\omega)} / (R_0 + R_e))] \quad (CFB-34)$$

Afin d'alléger l'écriture convenons comme précédemment que  $R_0 + R_e = R_{et}$  (CFB-35)

Dans le même soucis en constatant que la constante de temps purement électrique de cette branche du pont est

$$\tau_{et} = L_e / (R_0 + R_e) = L_e / R_{et} \quad (CFB-36)$$

Elle correspond à une pulsation caractéristique de coupure

$$\omega_{et} = 1 / \tau_{et} \quad (CFB-37)$$

supérieure à la pulsation de coupure du HP (cf. HP\_Intro).

La tension  $V_1 = V_s \cdot Z_1 / (Z_1 + R_2)$  (CFB-38)

dans laquelle  $Y_1 = 1 / Z_1 = p \cdot C_1 + 1 / R_1 = (p \cdot C_1 \cdot R_1 + 1) / R_1 \Rightarrow Z_1 = R_1 / (p \cdot C_1 \cdot R_1 + 1)$ . (CFB-39)

Après substitution  $V_1 = V_s \cdot R_1 / (R_1 + R_2 + p \cdot C_1 \cdot R_1 \cdot R_2) = V_s \cdot R_1 / (R_1 + R_2) (1 + p \cdot C_1 \cdot R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2))$  (CFB-40)

que l'on peut formuler  $V_1 = V_s \cdot [R_1 / (R_1 + R_2)] \cdot [1 / (1 + (p \cdot C_1 \cdot R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2)))]$  (CFB-41)

On y reconnaît une constante de temps  $\tau_1 = C_1 \cdot R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$  (CFB-42)

$$V_1 = V_s \cdot [R_1 / (R_1 + R_2)] \cdot [1 / (1 + p \cdot \tau_1)] \quad (CFB-43)$$

Comme pour le pont de Voigt

**Si la tension  $V_s$  est continue ( $\omega=0$ ),**

La condition d'équilibre du pont est obtenu pour  $V_1 = V_0$

$$V_s \cdot R_0 / (R_0 + R_e) = V_s \cdot R_1 / (R_1 + R_2) \Leftrightarrow R_0 / (R_0 + R_e) = R_1 / (R_1 + R_2) = \alpha \quad (CFB-44)$$

Ce qui signifie que  $R_0 / R_e = R_1 / R_2$  (CFB-45)

Après mise en forme de  $V_0 = V_s \cdot \alpha \cdot [1 / (1 + p \cdot \tau_{et} + Z_{em(\omega)} / (R_0 + R_e))]$  (CFB-46)

et  $V_1 = V_s \cdot \alpha \cdot [1 / (1 + p \cdot \tau_1)]$  (CFB-47)

La tension  $V_p = V_1 - V_0 = V_s \cdot \alpha \cdot [1 / (1 + p \cdot \tau_1)] - V_s \cdot \alpha \cdot [1 / (1 + p \cdot \tau_{et} + Z_{em(\omega)} / (R_0 + R_e))]$  (CFB-48)

$$V_p = V_s \cdot \alpha \cdot [1 / (1 + p \cdot \tau_1) - 1 / (1 + p \cdot \tau_{et} + Z_{em(\omega)} / R_{et})] \quad (CFB-49)$$

Une réduction au même dénominateur s'impose

$$V_p = V_s \cdot \alpha \cdot ((1 + p \cdot \tau_{et} + Z_{em(\omega)} / R_{et}) - (1 + p \cdot \tau_1)) / ((1 + p \cdot \tau_{et} + Z_{em(\omega)} / R_{et}) \cdot (1 + p \cdot \tau_1)) \quad (CFB-50)$$

$$V_p = V_s \cdot \alpha \cdot ((p \cdot (\tau_{et} - \tau_1) + Z_{em(\omega)} / R_{et})) / ((1 + p \cdot \tau_{et} + Z_{em(\omega)} / R_{et}) \cdot (1 + p \cdot \tau_1)) \quad (CFB-51)$$

Il apparaît que si :  $\tau_1 = \tau_{et}$  soit  $L_e / R_{et} = C_1 \cdot R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$  (CFB-52)

$$V_p = V_s \cdot \alpha \cdot (Z_{em(\omega)} / R_{et}) / ((1 + p \cdot \tau_{et} + Z_{em(\omega)} / R_{et}) \cdot (1 + p \cdot \tau_1)) \quad (CFB-53)$$

soit  $V_p = [V_s \cdot \alpha \cdot Z_{em(\omega)} / (R_{et} + p \cdot L_e + Z_{em(\omega)})] \cdot [1 / (1 + p \cdot \tau_1)]$  (CFB-54)

pour aboutir à  $V_p = \alpha \cdot B.l.v \cdot [1 / (1 + p \cdot \tau_1)] = \alpha \cdot B.l.v \cdot [1 / (1 + p \cdot \tau_{et})]$  (CFB-55)

Dans cette expression apparaît une transmittance

$$T_{e(p)} = 1 / (1 + p \cdot \tau_{et}) \quad (CFB-56)$$

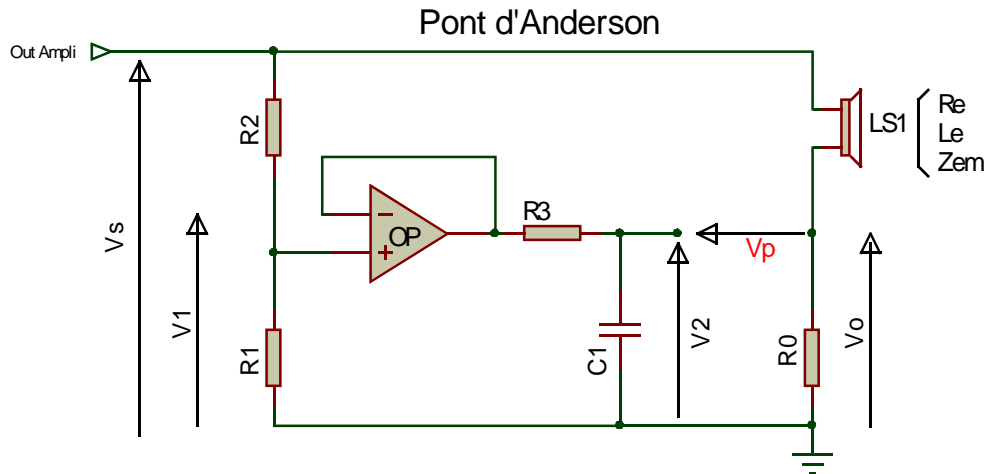
C'est celle d'un filtre passe bas du premier ordre, composé de  $L_e$ ,  $R_e$  et  $R_0$  et dont la pulsation caractéristique est  $\omega_{et}$

### Remarques

- Il a été employé dans les enceintes Servosound.
  - Ce pont commet une erreur de lecture qu'il faudra compenser. Fort heureusement elle est liée à une fonction de transfert du 1° ordre.
  - Sa mise au point est délicate car une modification de  $R_1$  ou  $R_2$  nécessite l'ajustement de  $C_1$
- Cette dernière remarque oriente vers le pont d'Anderson.

### 1-3 Le pont d'Anderson

Il est dérivé du pont de Maxwell.  
Son schéma est le suivant:



La branche comportant le HP est inchangée

Par contre la branche opposée est formée d'un pont diviseur potentiométrique purement résistif suivi d'un adaptateur d'impédance et d'un réseau passe bas du 1<sup>o</sup> ordre composé de R3 et C1.

Cette fois, la maille de sortie s'écrit  $V_2 - V_p - V_0 = 0$  (CFB-57)

ce qui implique que la tension  $V_p$  de sortie du pont  $V_p = V_2 - V_0$  (CFB-58)

Les tensions  $V_1 = V_s \cdot R_1 / (R_1 + R_2)$  (CFB-59)

$$V_2 = V_1 (1 / (1 + p \cdot \tau_1)) = V_s \cdot (R_1 / (R_1 + R_2)) \cdot (1 / (1 + p \cdot \tau_1)) \quad (\text{CFB-60})$$

La constante de temps  $\tau_1 = R_3 \cdot C_1$  est indépendante des valeurs de  $R_1$  et  $R_2$  (CFB-61)

Si la tension  $V_s$  est continue ( $\omega = 0$ ),  $V_2 = V_s \cdot (R_1 / (R_1 + R_2))$ . (CFB-62)

Dans ce cas la condition d'équilibre du pont est celle du pont de Maxwell

les relations (CFB-44), (CFB-45) et (CFB-46) sont directement applicables.

quelle que soit la fréquence considérée, en substituant  $V_1$  de (CFB-48) par  $V_2$

$$V_p = V_2 - V_0 = V_s \cdot \alpha \cdot [1 / (1 + p \cdot \tau_1)] - V_s \cdot \alpha \cdot [1 / (1 + p \cdot \tau_{et} + Z_{em(\omega)} / (R_0 + R_e))] \quad (\text{CFB-63})$$

mène à la formulation finale développée pour le pont de Maxwell et, bien sur aux mêmes conclusions.

J'ai utilisé ce pont pour la première fois en 1970.

### 1-4 Ponts dérivé du pont de Voigt

#### • Première solution

La présence de l'inductance dans le pont de Voigt et la traduction de (CFB-11)

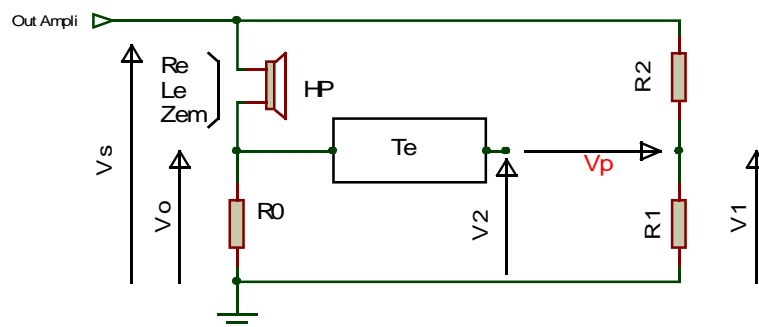
$$V_0 = V_s \cdot [R_0 / (R_0 + R_e)] \cdot [(1 + p \cdot L_0 / R_0) / [1 + p \cdot (L_0 + L_e) / (R_0 + R_e) + Z_{em(\omega)} / (R_0 + R_e)]]$$

montre que cette dernière peut être mise sous la forme:

$$V_0 = V_s \cdot [R_0 / (R_0 + R_e)] \cdot [(1 + p \cdot L_0 / R_0) \cdot [1 / [1 + p \cdot (L_0 + L_e) / (R_0 + R_e) + Z_{em(\omega)} / (R_0 + R_e)]]] \quad (\text{CFB-64})$$

qui fait apparaître une transmittance  $T_e = (1 + p \cdot L_0 / R_0)$ . (CFB-65)

Sur ce constat, il est possible d'envisager un pont sur le modèle de schéma suivant.



La tension  $V_0$  a été calculée pour le pont de Maxwell.

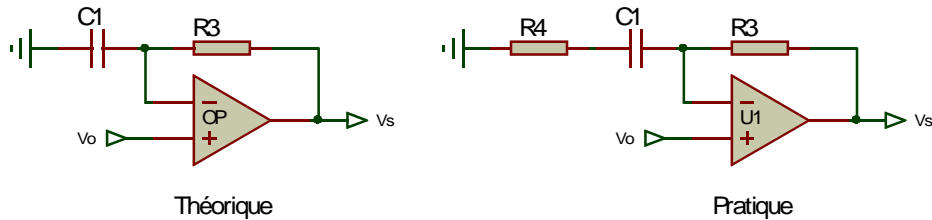
$$V_0 = V_s \cdot \alpha \cdot \left[ \frac{1}{1 + p \cdot L_e / (R_0 + R_e) + Z_{em(\omega)} / (R_0 + R_e)} \right] \quad (\text{CFB-66})$$

La tension  $V_2 = V_0 \cdot T_e$  (CFB-67)

Suite aux calculs précédents il est évident que  $T_e = (1 + p \cdot L_e / (R_0 + R_e)) = 1 + p \cdot \tau_e$ . (CFB-68)

Avec  $\tau_e = L_e / (R_0 + R_e)$  (CFB-69)

Une telle transmittance peut être imaginée conforme aux schéma de gauche suivant.



Il est théorique car pratiquement inexploitable à cause de son instabilité.

En limitant son action dans les fréquences où le montage est inexploité le principe est applicable.

La fonction de transfert du filtre pratiquement réalisable est:

$$T_e = 1 + (R_3 / (R_4 + 1/p \cdot C_1)) = 1 + (p \cdot C_1 \cdot R_3 / (1 + p \cdot C_1 \cdot R_4)) = (1 + p \cdot C_1 \cdot (R_3 + R_4)) / (1 + p \cdot C_1 \cdot R_4) \quad (\text{CFB-70})$$

Deux constantes de temps apparaissent.  $\tau_1 = C_1 \cdot (R_3 + R_4)$  (CFB-71)

et  $\tau_2 = C_1 \cdot R_4$  (CFB-72)

par identification  $\tau_1 = \tau_e \Leftrightarrow C_1 \cdot (R_3 + R_4) = L_e / (R_0 + R_e)$  (CFB-73)

En posant  $\tau_2 = a \cdot \tau_1 = a \cdot \tau_e$  (CFB-74)

$$a = \tau_2 / \tau_1 = R_4 / (R_3 + R_4) \quad (\text{CFB-75})$$

la transmittance de compensation devient  $T_e = (1 + p \cdot \tau_e) / (1 + p \cdot a \cdot \tau_e)$  (CFB-76)

L'équilibre en continu réalisé, pour toutes valeurs de fréquences

$$V_p = V_1 - V_2 \quad (\text{CFB-77})$$

dans laquelle  $V_2 = V_0 \cdot T_e = V_s \cdot \alpha \cdot \left[ \frac{(1 + p \cdot \tau_e)}{(1 + p \cdot a \cdot \tau_e)} \right] \cdot \left[ \frac{1}{1 + p \cdot \tau_e + Z_{em(\omega)} / (R_0 + R_e)} \right]$  (CFB-78)

La tension  $V_p$  en sortie de pont

$$V_p = \alpha \cdot V_s \cdot \left( 1 - \frac{(1 + p \cdot \tau_e)}{(1 + p \cdot a \cdot \tau_e)} \right) \cdot \left[ \frac{1}{(1 + p \cdot \tau_e + Z_{em(\omega)} / R_{et})} \right] \quad (\text{CFB-79})$$

$$V_p = \alpha \cdot V_s \cdot \left( \frac{(1 + p \cdot a \cdot \tau_e) - (1 + p \cdot \tau_e)}{(1 + p \cdot \tau_e + Z_{em(\omega)} / R_{et})} \right) / (1 + p \cdot a \cdot \tau_e) \quad (\text{CFB-80}) \quad (\text{CFB-81})$$

$$V_p = \left[ \frac{\alpha \cdot V_s}{(1 + p \cdot a \cdot \tau_e)} \right] \cdot \left[ \frac{1 + p \cdot \tau_e + Z_{em(\omega)} / R_{et} + p \cdot a \cdot \tau_e (1 + p \cdot \tau_e + Z_{em(\omega)} / R_{et}) - 1 - p \cdot \tau_e}{(1 + p \cdot \tau_e + Z_{em(\omega)} / R_{et})} \right] \quad (\text{CFB-82})$$

$$V_p = \left[ \frac{\alpha \cdot V_s}{(1 + p \cdot a \cdot \tau_e)} \right] \cdot \left[ \frac{Z_{em(\omega)} / R_{et} + p \cdot a \cdot \tau_e (1 + p \cdot \tau_e + Z_{em(\omega)} / R_{et})}{(1 + p \cdot \tau_e + Z_{em(\omega)} / R_{et})} \right] \quad (\text{CFB-83})$$

$$V_p = \alpha \cdot B \cdot I \cdot v / (1 + p \cdot a \cdot \tau_e) + \alpha \cdot V_s \cdot p \cdot a \cdot \tau_e / (1 + p \cdot a \cdot \tau_e) \quad (\text{CFB-84})$$

Or  $B \cdot I \cdot v = V_s \cdot Z_{em} / (Z_{em} + Z_e) \Rightarrow V_s = B \cdot I \cdot v (Z_{em} + Z_e) / Z_{em}$  (CFB-84)

$$V_p = \alpha \cdot B \cdot I \cdot v / (1 + p \cdot a \cdot \tau_e) + \alpha \cdot B \cdot I \cdot v \cdot p \cdot a \cdot \tau_e (1 + Z_e / Z_{em}) \quad (\text{CFB-85})$$

$$V_p = \left( \alpha \cdot B \cdot I \cdot v / (1 + p \cdot a \cdot \tau_e) \right) (1 + p \cdot a \cdot \tau_e (1 + Z_e / Z_{em})) \quad (\text{CFB-86})$$

### Remarques

- Le terme  $p \cdot a \cdot \tau_e (1 + Z_e / Z_{em})$  est à prendre en compte dans la boucle de retour de l'asservissement.
- Ce terme disparaît si l'on soustrait  $\alpha \cdot V_s \cdot p \cdot a \cdot \tau_e / (1 + p \cdot a \cdot \tau_e)$  de  $V_p$
- Il ne reste plus qu'à prendre en compte l'erreur de lecture de  $B \cdot I \cdot v$  lié à l'effet passe bas de  $1 / (1 + p \cdot a \cdot \tau_e)$

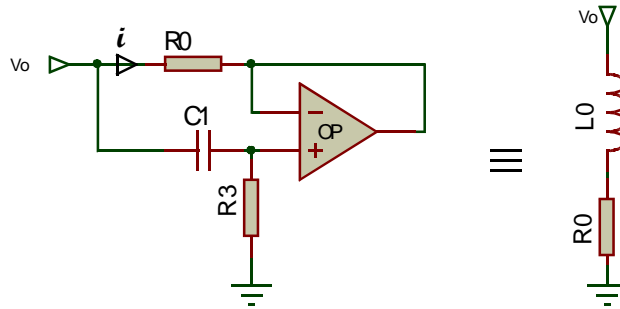
♦ **Seconde solution**

Par simulation de l'inductance  $L_0$  du pont de Voigt.

Le courant parcourant  $L_0$  et  $R_0$  est  $\dot{i} = V_0 / (R_0 + p.L_0) = (V_0 / R_0) \cdot (1 / (1 + p.L_0 / R_0))$

(CFB-87)

Le montage est le suivant



L'amplificateur opérationnel a un gain unitaire. Il doit être capable de débiter le courant qui circule dans le HP.

La tension sur l'entrée non inverseuse de l'ampli est  $V_0 \cdot s / (1 + s)$  avec  $s = p \cdot C_1 \cdot R_3$

(CFB-88)

Cette tension est totalement reportée à la sortie de l'ampli.

Le courant  $\dot{i}$  qui circule dans  $R_0$  est  $\dot{i} = [V_0 - V_0 \cdot s / (1 + s)] / R_0 = V_0 \cdot [1 - s / (1 + s)] / R_0$

(CFB-89)

$$\dot{i} = (V_0 / R_0) \cdot (1 / (1 + s)) = (V_0 / R_0) \cdot (1 / (1 + p \cdot C_1 \cdot R_3))$$

(CFB-90)

par identification  $L_0 / R_0 = C_1 \cdot R_3 \Rightarrow L_0 = C_1 \cdot R_3 \cdot R_0$

(CFB-91)

Ce montage fonctionne très bien. Il faut toutefois veiller à ce que l'ampli ne bruite pas.

La tension maximale que peut prendre  $V_{0max}$  est liée à la valeur  $V_{smax}$  de sortie de l'amplificateur servant le pont et au coefficient  $\alpha$

$$V_{0max} = \alpha \cdot V_{smax}$$

(CFB-92)

De ce fait l'amplificateur du simulateur peut ne pas avoir besoin d'une tension d'alimentation élevée. Par contre elle devra pouvoir délivrer le courant nécessaire.

**1-5 Exemples de réalisations presque pratiques**

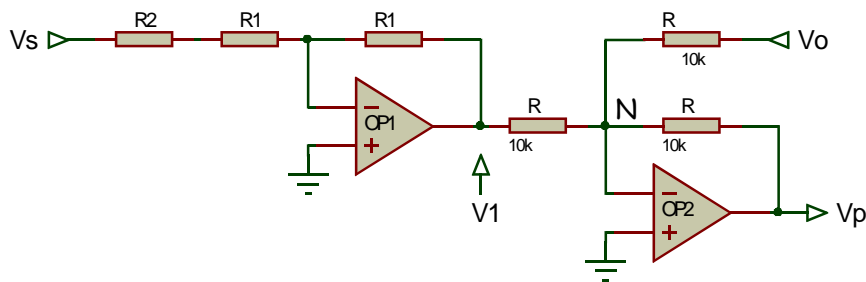
Les amplis opérationnels utilisés sont rapides et leur rapport signal bruit élevé.

Les résistances ont une tolérance de 1%.

♦ **Le pont de Voigt**

L'inductance  $L_0$  et la résistance  $R_0$  ne sont pas représentées.

Le schéma proposé est le suivant:



La présence des deux résistances dans le circuit d'attaque de OP1 peut surprendre. Je les y ai placé afin que:

$$V_1 / V_s = - R_1 / (R_1 + R_2) = - \alpha$$

(CFB-93)

Les coefficients, au signe près, sont identiques à ceux précédemment définis.

Par soucis d'éclaircir au mieux, au noeud N, la somme des courants est nulle. Le courant dérivé dans l'entrée inverseuse de OP2 est considérée nulle et ainsi

$$V_1 / R + V_0 / R + V_p / R = 0 \Rightarrow V_1 + V_0 + V_p = 0 \Rightarrow V_p = - V_1 - V_0$$

(CFB-94)

En substituant

$$V_1 = - \alpha \cdot V_s$$

(CFB-95)

et  $V_0 = V_s \cdot \alpha \cdot [(1 + p.L_0 / R_0)] / [1 + (p.L_{et} / R_{et}) + (Z_{em(\omega)} / R_{et})]$  issue de (CFB-17)

(CFB-96)

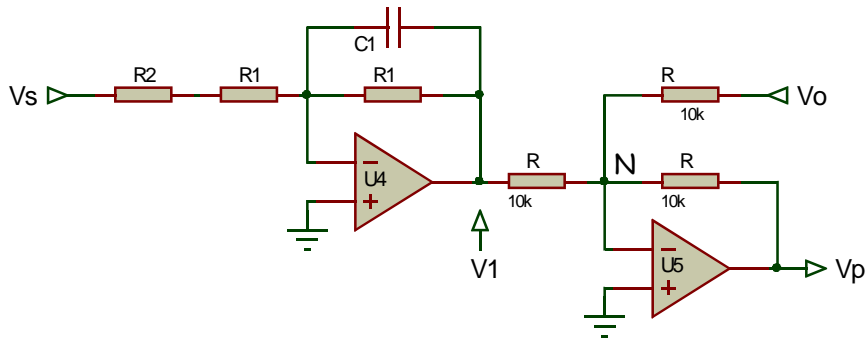
dans on obtient  $V_p = \alpha \cdot V_s - V_s \cdot \alpha \cdot [(1+p.L_0/R_0)] / [1+(p.L_{et}/R_{et}) + (Z_{em(\omega)}/R_{et})]$  (CFB-97)

qui mène à  $V_p = \alpha \cdot V_s \cdot (1 - [(1+p.L_0/R_0)] / [1+(p.L_{et}/R_{et}) + (Z_{em(\omega)}/R_{et})])$  (CFB-98)

conforme à (CFB-20).

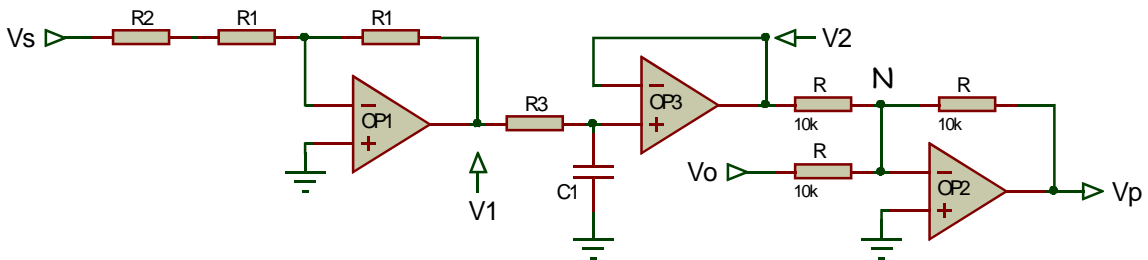
♦ **Le pont de Maxwell**

La démarche est la même et conduit au schéma:



♦ **Le pont d'Anderson**

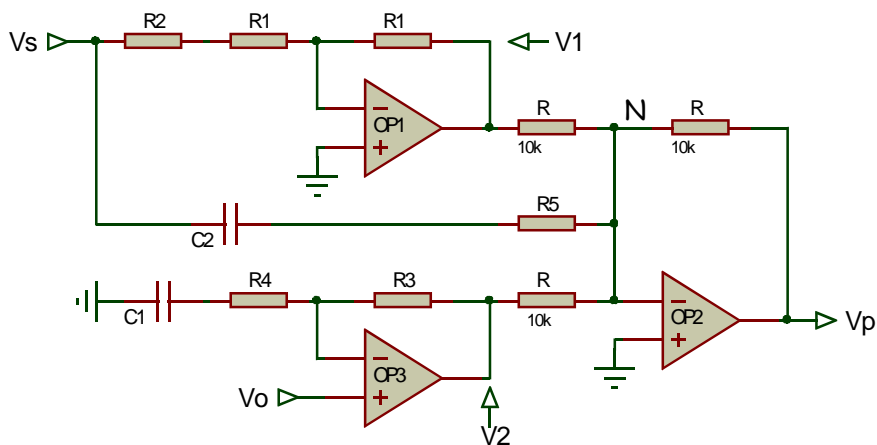
Comme les ponts de Voigt et de Maxwell ce schéma:



mène au résultats liés à ce type de pont.

♦ **Le pont dérivé de Voigt**

Cette fois ce schéma nécessitera quelques commentaires.



Les tensions

(CFB-95) montre que  $V_1 = -\alpha \cdot V_s$

(CFB-78) indique que  $V_2 = V_o \cdot T_e = V_s \cdot \alpha \cdot [(1+p \cdot \tau_e)/(1+p \cdot a \cdot \tau_e)] \cdot [1 / [1+p \cdot \tau_e + Z_{em(\omega)}/(R_0 + R_e)]]$

dans laquelle (CFB-70,76)  $T_e = (1+p \cdot C_1 \cdot (R_3+R_4))/(1+p \cdot C_1 \cdot R_4) = (1+p \cdot \tau_e)/(1+p \cdot a \cdot \tau_e)$

Au noeud N la somme des courants  $V_1/R + V_2/R + V_s/(R_5+1/p \cdot C_2) + V_p/R=0$

(CFB-99)



En développant le terme  $V_s/(R_5+1/p.C_2) = V_s \cdot p.C_2/(1+ p.C_2.R_5)$  (CFB-100)

Posons  $R_5 = k.R$  (CFB-101)

puis en le multipliant haut et bas par  $k.R$ ,  $V_s/(R_5+1/p.C_2) = (V_s/k.R) \cdot p.C_2 \cdot k.R/(1+ p.C_2 \cdot k.R)$  (CFB-102)

On en déduit que  $V_s/(R_5+1/p.C_2) = (V_s/R) \cdot (1/k) \cdot T_c$  (CFB-103)

avec  $T_c = p.C_2 \cdot k.R/(1+ p.C_2 \cdot k.R)$  la transmittance de correction (CFB-104)

l'équation (CFB-99) des courants devient  $V_1/R + V_2/R + (V_s/R) \cdot (1/k) \cdot T_c + V_p/R = 0$  (CFB-105)

qui mène à  $V_1 + V_2 + (V_s/k) \cdot T_c + V_p = 0$  (CFB-106)

soit  $V_p = \alpha.V_s - V_s \cdot \alpha \cdot [(1+ p.\tau_e)/(1+ p.a.\tau_e)] \cdot [1/[1+ p.\tau_e + Z_{em(\omega)}/(R_0+ R_e)]] - (V_s/k) \cdot T_c$  (CFB-107)

$V_p = \alpha.V_s \left( 1 - [(1+ p.\tau_e)/(1+ p.a.\tau_e)] \cdot [1/[1+ p.\tau_e + Z_{em(\omega)}/(R_0+ R_e)]] \right) - (V_s/k) \cdot T_c$  (CFB-108)

Le premier terme en  $V_s$  a été développé en (CFB-83)

$V'_p = \alpha.B.l.v/(1+ p.a.\tau_e) + \alpha.V_s \cdot p.a.\tau_e/(1+ p.a.\tau_e)$  (CFB-109)

$V_p = V'_p - (V_s/k) \cdot T_c$  (CFB-110)

donc  $V_p = \alpha.B.l.v/(1+ p.a.\tau_e) + \alpha.V_s \cdot p.a.\tau_e/(1+ p.a.\tau_e) - (V_s/k) \cdot T_c$  (CFB-111)

$V_p = \alpha.B.l.v/(1+ p.a.\tau_e) + \alpha.V_s \left( p.a.\tau_e/(1+ p.a.\tau_e) - (T_c/\alpha \cdot k) \right)$  (CFB-112)

Il est maintenant évident que si  $p.a.\tau_e/(1+ p.a.\tau_e) = (T_c/\alpha \cdot k)$ , (CFB-113)

l'erreur de lecture  $\alpha.V_s \cdot p.a.\tau_e/(1+ p.a.\tau_e)$  disparaît

Les conditions d'annulation sont donc  $\alpha \cdot k = 1 \Leftrightarrow k = 1/\alpha$ , (CFB-114)

et  $T_c = p.a.\tau_e/(1+ p.a.\tau_e) = p.C_2 \cdot k.R/(1+ p.C_2 \cdot k.R) \Leftrightarrow C_2 \cdot R_5 = a.\tau_e$  (CFB-115)

$R_5 = R/\alpha$  (CFB-116)

La tension  $V_p$  de sortie du pont est devenue  $V_p = \alpha.B.l.v/(1+ p.a.\tau_e)$  (CFB-117)

La fréquence de coupure du filtre passe bas est supérieure à la fréquence de coupure du HP.

L'écart entre ces deux fréquences dépend du coefficient  $a=R_4/(R_3+R_4)$  choisi. (CFB-118)

Il est inférieur à 1. En fonction de la fréquence  $V_p = \alpha.B.l.v/(1+ j.f/(f_e/a))$  (CFB-119)

Dans la pratique  $0,1 < a < 0,25$  (CFB-120)

### Remarques:

- Quel que soit le schéma adopté, il est important, pour ce qui suit, que le courant qui circule dans la branche du pont opposée au HP soit négligeable, vis à vis de celui qui circule dans le HP.
- La résistance  $R_0$  est une résistance de puissance non inductive.  
J'utilise des résistances film qu'il me faut surcalibrer en puissance car elles sont fragiles.  
Inconvénient majeur, elles sont chères.