

# M27 : Systèmes bouclés

## Rapport du jury :

Ce montage concerne la physique des asservissements et/ou celle des oscillateurs auto-entretenus. Une maîtrise minimale des montages élémentaires est requise. Certains aspects des systèmes bouclés peuvent être élégamment illustrés par des montages comme l'oscillateur à quartz, compte tenu de son fort facteur de qualité. Une maîtrise minimale des montages élémentaires est requise.

## **Introduction :**

Un système bouclé est un dispositif dans lequel on renvoie à l'entrée la totalité ou une partie du signal de sortie. On peut viser 2 objectifs avec une telle action:

- permettre à un montage d'atteindre une consigne donnée en s'auto corrigeant en cas de perturbation interne/extérieure.
- maintenir un dispositif dans un état instable par réaction positive pour obtenir un oscillateur ou un comparateur.

On étudiera un système asservi par rétroaction et un oscillateur auto-entretenus.

## **I/ Asservissement : l'intérêt de la rétroaction.**

On va étudier le bénéfice que peut apporter un bouclage en réaction négative sur un montage à amplificateur opérationnel. Le suiveur, est le seule montage stable classique (rétroaction sur la patte -), permettant d'avoir un fonctionnement linéaire entre la sortie et l'entrée. (Cf poly M27 (1) - II.1)

Il n'est pas possible de faire l'étude directement avec un véritable AOP en raison de ses paramètres internes (gain énorme, fréquence de coupure très basse, composant instable), on élabore donc un montage stimulant un tel composant mais avec des caractéristiques plus faciles à mesurer.

**Principe du montage :** la base est un amplificateur différentiel (= soustracteur simple entre 2 tensions d'entrée) ( cf [http://electronique.aop.free.fr/AOP\\_lineaire\\_NF/5\\_amplidiff\\_1.html](http://electronique.aop.free.fr/AOP_lineaire_NF/5_amplidiff_1.html)) + ajout de capacité C pour avoir un comportement de filtre passe bas pour la facilité de mesure de  $f_c$ . La résistance  $R_s$  facilite l'étude de l'influence d'une charge.

-on visualise à l'oscillo les signaux  $V_e$  et  $V_s$ .

-Pour les mesures "peak-peak" à l'oscillo → moyenner.

### **1) Etude en boucle ouverte**

#### **M27(1) - II.2.2 et II.2.3**

Système en boucle ouverte conduit toujours à une saturation du signal de sortie quelle que soit l'amplitude du signal d'entrée.

On va aller très rapidement sur la boucle ouverte, car ce n'est pas l'intérêt du montage.

(On ne fait pas les diagramme de Bode, mais il montre que c'est bien un passe bas d'ordre 1.)

-Le gain statique correspond à  $A_0=R_2/R_1$  et la fréquence de coupure est  $f_c=1/(2\pi.R_2.C)$

Mesurer les valeurs de  $R_2, R_1, C$  précisément au RLC-mètre, que l'on compare à la mesure à l'oscillo, le gain est  $A_0 = V_s/V_e$  (noter la fréquence à laquelle on a mesuré  $A_0$ ) et chercher la

fréquence pour laquelle  $V_s = \frac{V_{s_{max}}}{\sqrt{2}}$  qui correspond à la fréquence de coupure. Comparer les résultats.

→ On fait varier un paramètre interne, afin de voir le comportement du système face à une variation. On modifie la valeur de  $R_2$ , on passe de 50 kOhm à 60 kOhm, et on remesure le gain statique  $A_o'$  (à la même fréquence que précédemment). Conclusion sur la variation du gain.

Gain \* Bande passante = constante, or  $f_c$  à diminué donc gain à augmenté.

**Conclusion** : le système en boucle ouverte est très sensible aux perturbations, et il est incapable de s'auto-corriger pour les atténuer. On va alors voir les bénéfices qu'apporte la contre réaction.

## 2) Etude en boucle fermée

### M27 (1) - II.3.1

Le plus simple consiste à renvoyer directement le signal de sortie sur l'entrée de la patte - du système. Rétroaction sur la patte - permet de ne pas avoir de saturation, afin d'obtenir la relation de proportionnalité entre  $V_s$  et  $V_e$ .

-On trace le gain en fonction de  $\log(f)$ . On fait varier la fréquence, et on mesure  $V_s/V_e$ . Le gain =  $20 \cdot \log(V_s/V_e)$ .

On constate que la fréquence de coupure augmente, et que gain  $H_o$  diminue par rapport à la boucle ouverte.

On mesure le gain statique  $H_o$  et  $f_{BF}$  que l'on compare aux valeurs attendues :  $H_o = A_o/(1+A_o \cdot B)$  et  $f_{BF} = f_o \cdot (1+A_o \cdot B)$  avec  $B = 1$  car on travail en retour unitaire.

On vérifie bien que Gain\*BP = Constante entre BF et BO. C'est la propriété typique d'une rétroaction de type tension-tension sur un amplificateur ayant une fonction de transfert d'ordre 1. Une diminution du gain s'accompagne automatiquement d'une augmentation de leur BP.

→ Influence d'une perturbation:

On simule de nouveau une variation d'un paramètre interne, en modifiant la valeur de la résistance  $R_2$ , et on observe l'influence sur la fonction de transfert  $H$  du système en BF. Même procédure qu'en BO. On constate une variation de  $H_o$  nettement inférieur à celle qu'on a eu pour  $A_o$ .

**Intérêt boucle fermée** : Le bouclage a donc diminué la sensibilité du système à une modification d'un paramètre interne. En effet, la fonction de transfert  $H$  est divisé par  $1+A \cdot B$ , donc en BF il y a une atténuation d'un facteur  $F=1+AB$  par rapport à BO. On voit alors l'importance du coefficient  $F$ , appelé facteur de régulation, car il conditionne le taux d'atténuation de la perturbation.

Le bouclage à apporter des bénéfices, cependant on a perdu notre gain statique initial de 5 qu'on avait en BO. Le but étant d'ajuster les paramètre en boucle fermé pour retrouver cette condition.

On a  $H = A/(1+AB) = A/F$

On impose donc  $H_o = 5$ . Le choix de  $F$  va alors impacter la valeur du gain statique de la chaîne direct  $A_o$  et le gain de la chaîne retour  $B$ . (Cf poly p.6)

- Pour les mesures, on doit prendre un facteur de régulation pas trop grand car si  $F$  tend vers l'infini,  $B$  tend vers  $1/H$ , ainsi difficile de voir l'influence d'une charge entre une boucle ouverte et fermée.

→ Asservissement:

on impose  $H_o=5$  et  $F=2$ , alors  $A_o=10$  pour cela on remplace  $R_2$  par  $R_2=100$  kOhm. Et  $B=0,1$ , on peut remplacer alors le retour unitaire par un pont diviseur potentiométrique :

$$B=R_B/(R_A+R_B), \text{ soit } R_B=0,111.R_A.$$

-Pour choisir  $R_B$  et  $R_A$ , il y a quelques précautions à prendre, il faut que le branchement retour sur E- ne modifie pas le potentiel imposé par le pont diviseur, et pour cela que la résistance  $R_A+R_B$  soit assez forte pour que la sortie de l'amplificateur puisse se comporter de manière idéale (chute de potentiel négligeable sur  $R_s$ ).  $R_A=5000$  Ohm est un bon compromis.

-En basse fréquence, on mesure  $V_E$ .

-On ajuste ensuite  $R_B$  pour avoir  $V_s=5.V_E$ .

-On relève  $R_B$  et  $R_A$  et on calcule  $B$ , que l'on compare avec la valeur désirée  $B=0,1$ . Idem pour  $F$ .

Normalement les écarts sont assez faibles, et sont principalement dû à la simplification extrême de la boucle de retour.

**Conclusion :** On a réalisé un système asservi c'est à dire qu'il s'auto-corrige pour avoir la sortie souhaitée, et ce grâce à la boucle fermée, chose qui n'est pas possible en boucle ouverte. On a alors un système bouclé avec un gain de 5 dans sa bande passante et régulé à  $F=2$ .

## II/ Oscillateur à quartz

### M27 (2) - II.3

Oscillateur quasi-sinusoïdal : Constitué de 2 cellules bouclées → 1: filtre passe bande qui fixe la fréquence des oscillations et 2: amplificateur qui sert à ajuster exactement le gain global du système, pour que le système fonctionne de manière autonome (sans signal d'entrée). Ils doivent remplir la condition de Barkhausen :  $AB = 1$  et  $\Delta\phi = 0$ , cela permet d'avoir un oscillateur auto-entretenu (car à l'issue de la boucle, on retombe sur le même signal)

On utilise un Quartz d'horlogerie car il travaille à une fréquence assez basse, cela permet l'emploi d'AOP courant si on limite leur gain pour limiter les déphasages qu'ils introduisent dû à leur comportement passe bas. La résonance du Quartz peut servir à la réalisation d'un oscillateur quasi sinusoïdal mais il faut le protéger car il n'est pas fait pour fonctionner a cette fréquence.

### Montage : RLC série avec quartz d'horlogerie

-AOP doivent être alim en +/-5V : on réalise une alim flottante → on réalise une alim à partir de 2 alim (du même boîtier). Pour cela, on relie le - d'une alim avec le + d'une autre. La masse n'est plus celle de référence (plus la Terre) mais elle est formée en reliant le - et le + restant. C'est pour limiter les gains des AOP.

-Le signal d'entrée est très brouillé ; pour parer à ce problème, on peut synchroniser avec SYNC (sur GBF) qu'on relie à la face arrière de l'oscillo sélectionner dans Trigger "Ext" ; on zoom pour bien observer la synchronisation.

Bien se positionner à la fréquence de résonance (au voisinage de 32 kHz) pour observer le signal, sinon on observe que du bruit.

-Moyenner le signal (Mettre moyennage de 64).

-On a en sortie une tension négative ( $V_s = -R_I = -V_{\text{quartz}}$ ), **Cf poly M31 -III.3.2 pour l'explication**. **Attention, il ne faut pas ici inverser le signe qui est essentiel pour la suite du montage car on ne s'intéresse pas au quartz seul pour réaliser par la suite l'oscillateur contrairement à M31.**

-Attention, sur certain GBF, la fonction  $V_{pp}$  n'est pas réellement  $V_{\text{crête-crête}}$  mais plutôt  $V_{\text{max}}$ . A vérifier!! Et ne pas dépasser 0,2 V car le Quartz ne supporte pas plus quand il est en résonance.

### 1) Etude du quartz :

#### Poly M27 (2) - III.3.1

-On balaye les fréquences autour de la fréquence de résonance par pas de 0,1 Hz à l'aide d'un GBF extrêmement stable.

Tracé sur Regressi de la fonction de transfert et la phase (attention ici l'oscillo change de signe après la résonance → il faut soustraire  $-360^\circ$  pour avoir la valeur de la phase réelle.).  
→ On remarque un comportement passe bande avec un facteur de qualité très grand car la passe bande est très fine.

→ On a une fréquence sélectionnée très précisément (ce qu'on peut voir avec la TF).

On rentre modèle d'un passe bande :

$B = B_0 / (\text{abs}(1 + j(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f}) * Q))$  on en déduit  $B_0$ ,  $f_0$  et  $Q$  (Facteur de qualité très élevé : signe d'un passe bande très fin)

**(Courant entrée/sortie en phase = comportement résistif sinon lorsque signal de sortie en avance → montage en mode inductif/quartz en mode capacitif et lorsque le signal de sortie en retard → montage en mode capacitif/quartz en mode inductif).**

A la résonance :  $\Delta\varphi = -\pi$  (valable pour tout le montage, pas le quartz seul qui lui a  $\Delta\varphi = 0$  à la résonance).

Point important → la phase varie très rapidement autour de  $f_0$ . Grosse contrainte pour respecter le critère de Barkhausen, qui oblige l'oscillateur à fonctionner à une fréquence précise, donc de façon très stable.

### 2) Réalisation de l'oscillateur

#### M27 (2) - II.3.2

Les oscillateurs entretenus doivent respecter le critère de Barkhausen:  $AB = 1$  et  $\Delta\varphi = 0$ , cela permet d'avoir un oscillateur auto-entretenu (car à l'issue de la boucle, on retombe sur le même signal).

Le montage précédent peut servir de boucle de rétroaction puisqu'il a un comportement de filtre passe bande. On va vouloir compenser ce déphasage

On ajoute à la chaîne de retour, un montage inverseur pour avoir  $AB=1$  mais elle conduit à une amplitude des oscillations limitée par la saturation de l'AOP de la chaîne directe, et donc il y aurait une tension trop forte aux bornes du Quartz. On rajoute donc un pont diviseur de tension et montage suiveur pour le découpler de la boucle de rétroaction.

**(Attention pour le montage, ne pas prendre  $R_b$  fixe. )**

→ Boucle ouverte :

M27(2) p.10 - 2ème solution: Réglage chaîne de retour (GBF au niveau de Q) pour respecter critère de Barkhausen :

- On règle fréquence du GBF pour être en phase (et inférieur à 0,2V pour protéger le quartz).
- On veut la même amplitude en entrée et en sortie : on se place en  $S_1$  → ajustement de  $R_2$  : attention on évite la saturation. Puis on se place en  $S_2$  → ajustement de  $R_b$ . Intéressant de calculer rapidement  $S_{max}$  reçue par le Quartz (cf p.10) et montrer que c'est acceptable et donc qu'on peut boucler le tout.

→ Boucle fermée :

On enlève le GBF et on boucle le tout.

- On observe en  $S_1$ , le montage doit osciller spontanément à la fréquence de résonance du Quartz.
- Si on voit pas d'oscillation on peut augmenter  $R_2$  pour les lancer puis revenir à la valeur limite.
- Comparer la valeur  $R_2$  à valeur attendue de  $R_2$ .

## Conclusion

### Questions:

- La condition de Barkhausen prend-elle en compte l'évolution de la phase sur une boucle ?
- Est-ce qu'on respecte vraiment le critère de Barkhausen lorsqu'il y a oscillation ?
- Quel est le modèle électrocinétique du quartz ? Piézo-électrique  
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Quartz\\_\(%C3%A9lectronique\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Quartz_(%C3%A9lectronique)) / Ce composant dans cette gamme de fréquence (fréquence où il peut résonner) à un comportement équivalent à un RLC série.
- Tous les systèmes bouclés ont un produit « gain × bande passante = constante » ? Non, c'est la propriété typique d'une rétroaction de type tension-tension sur un amplificateur ayant une fonction de transfert d'ordre 1.
- Sur quoi peut-on jouer sur l'asservissement, à part le gain ? Le facteur de régulation F.
- Comment fonctionne un oscillateur commandé en tension ?  
[http://www.composelec.com/oscillateur\\_contrôle\\_en\\_tension.php](http://www.composelec.com/oscillateur_contrôle_en_tension.php)
- Dans l'amplificateur non inverseur, pourquoi choisir des résistances de l'ordre du kOhm plutôt que de l'ordre du Ohm ?
- Pourquoi utilise-t-on un quartz comme oscillateur dans les montres ? Le quartz doit osciller exactement à la fréquence pour obtenir une base de temps de 1 seconde.  
<https://www.chronotempus.com/guide/mouvement-quartz/>
- Intérêt d'un oscillateur auto-entretenu ? Les oscillateurs auto-entretenus sont des systèmes qui engendrent des oscillations périodiques de durées illimitées en empruntant l'énergie nécessaire à des sources continues selon leur propre rythme contrairement aux oscillateurs

forcés qui reçoivent périodiquement l'énergie avec une période qui peut être très différente de leur période propre.

**Remarques :**

-Si jamais le temps en préparation, peut-être préparer une 3ème manip' .