

# MP49 : Systèmes bouclés

Alexandre Koessler (Alexandre Pricoupenko)

## Expériences

- ☛ asservissement en position d'un moteur
- ☛ boucle à verrouillage de phase ?
- ☛ pont de Wien
- ☛ oscillateur à relaxation ?

## Références

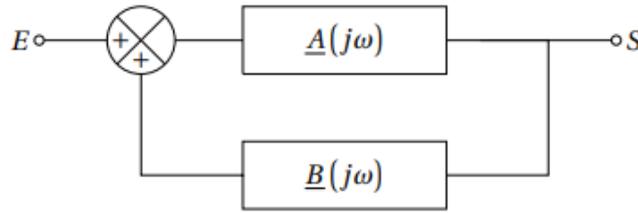
- [1] Pierre Brenders, Gilles Buffard, and Laurent Douchet. *Électronique, PSI*. Les nouveaux précis Bréal. Bréal, Rosny-sous-Bois 25-Baume-les-Dames, 2005.
- [2] Roger Duffait and Jean-Pierre Lièvre. *Expériences d'électronique : agrégation de sciences physiques*. Bréal, Rosny, 1999.
- [3] Michel Krob. *Électronique expérimentale : agrégation de sciences physiques*. Ellipses, Paris, 2002.

## Plan

- 1 Asservissement en position d'un moteur à courant continu 2
- 2 Oscillateur à pont de Wien 4

## Introduction

La commande dépend de la sortie :



- asservissement : stable
- oscillateur : instable

## 1 Asservissement en position d'un moteur à courant continu

### Références

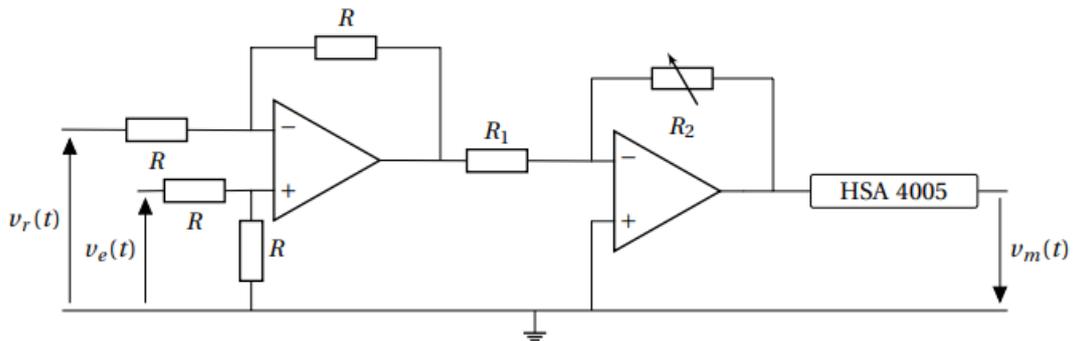
Duffait [2] p.328 pour la manip et Brenders [1] pour la théorie

Le premier AO est le cœur d'un montage soustracteur. On a en effet :

$$v_s = v_e - v_r \tag{1}$$

La deuxième partie est un amplificateur inverseur, de facteur  $-R_2/R_1$ . L'amplificateur de puissance doit aussi inverser le signal. En pratique, on branche simplement sa sortie à l'envers sur le moteur pour avoir un gain total  $10R_2/R_1$ .

Notons que l'amplificateur de puissance est effectivement utile ici car contrairement à un GBF, les AO ne peuvent pas fournir une puissance suffisante pour alimenter le moteur. Une fois le circuit électrique correctement câblé, on le branche sur le moteur .




**Expérience**
**Etude statique en boucle fermée - [2]**

Réaliser le montage, identique à celui de [Duffait] en remplaçant le dernier AO par un amplificateur de puissance HSA. Sélectionner « Input A », régler le gain sur x10 (c'est le minimum),  $Z_{t\text{extin}}$  sur  $600\ \Omega$  et BIAS sur OFF. Prendre  $R = 100\ \text{k}\Omega$ ,  $R_1 = 10\ \text{k}\Omega$ , et utiliser une boîte à décade pour  $R_2 = 1\ \text{k}\Omega$ .

Brancher  $v_m$  sur le moteur. Pour cela, relier la sortie Output de l'amplificateur à la masse du moteur, et la masse de l'amplificateur sur l'entrée  $v_m$  du moteur afin d'avoir un gain de -10 pour l'amplificateur. Mettre  $v_r$  à la masse pour l'instant, et appliquer avec un GBF une tension 1 V continue sur  $v_e$ . Le moteur doit tourner.

On boucle maintenant le circuit par la chaîne de retour. Le signal de sortie du moteur provient d'un capteur potentiométrique. La tension qu'il délivre est proportionnelle à la position (angulaire)  $\theta$  de la vis. Avec une alimentation +15/-15 V Jeulin P54.12, alimenter le potentiomètre en +15/-15 V. ATTENTION, la masse de l'alimentation doit être reliée à celles des AO, mais pas à celle du boîtier du moteur (pour éviter un court-circuit). Par pont diviseur de tension, on a alors  $v_{\text{out}}$  compris entre +5/-5 V (à cause des deux résistances de part et d'autre du potentiomètre). Relier  $v_r$  et  $v_{\text{out}}$ . Mettre en entrée une tension continue 1 V. Observer que la position de la vis est maintenant asservie (elle ne tourne plus). Appliquer un signal créneau de fréquence 0,5 Hz pour voir la vis passer d'une position à une autre.

Balayer toutes les tensions pour lesquelles la sortie est bien asservie. Tracer l'angle  $\theta$  en fonction de la tension d'entrée  $v_e$ . On obtient une droite.

Le module de la fonction de transfert s'exprime :

$$|H(j\omega)| = \frac{\omega_0^2}{\sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + (2m\omega\omega_0)^2}} \quad (2)$$

Pour déterminer l'amortissement  $m$ , on peut ajuster la courbe expérimental (en lin/lin) par la formule avec  $\omega_0$  et  $m$  en paramètres d'ajustement. Mais on peut aussi remarquer que, lorsque  $m^2 < 1/2$ ,  $|H|$  possède un maximum

$$|H|_{\text{max}} = \frac{1}{2m\sqrt{1 - m^2}} \quad (3)$$

soit

$$m^2 = \frac{1 - \sqrt{1 - \frac{1}{|H|_{\text{max}}^2}}}{2} \quad (4)$$

On veut ensuite vérifier la loi du dépassement en fonction de l'amortissement [Duffait] (XIII-27) 2. Le dépassement est donné par

$$D = \frac{v_{\text{max}} - v_{\infty}}{v_{\infty}} \quad (5)$$

avec  $v_{\text{max}}$  la tension maximale mesurée lors des oscillations et  $v_{\infty}$  la tension de consigne.

**Expérience**

**Fonction de transfert de la boucle fermée - [2]**

Mesurer  $|H|_{\max}$  pour différents  $R_2$ , dans le régime pseudo-périodique, et en déduire  $m^2$ . Tracer  $m^2$  en fonction de  $1/R_2$ . On obtient une droite, ce qui correspond bien à ce qui est attendu ([Duffait], le facteur d'amplification  $A_v$  du livre est pour nous  $10R_2/R_1$ ). Ici, le coefficient directeur de la droite ne nous intéresse pas : il dépend en partie des grandeurs mécaniques du moteur, que nous n'avons pas mesurées.

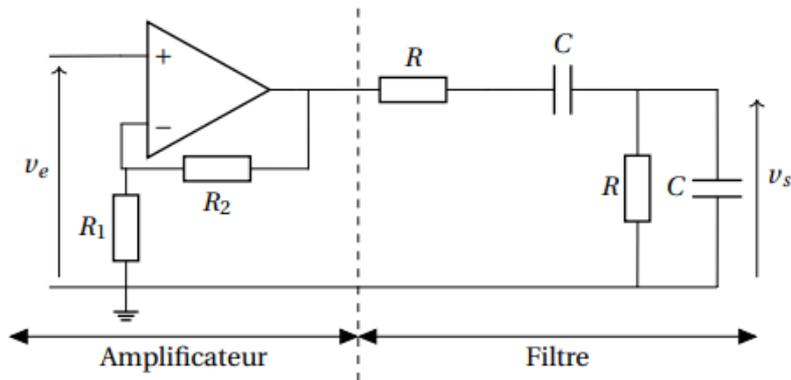
Tracer par exemple  $\ln(D)$  en fonction de  $\frac{\pi m}{\sqrt{1-m^2}}$  qui devrait donner une droite de pente 1. Notons qu'on ne s'attend pas à un résultat fabuleux, déjà parce qu'on trace une évolution logarithmique sur moins d'une décade (on relève typiquement des valeurs de dépassement dans un seul ordre de grandeur), et parce que l'abscisse est alambiquée : une petite erreur sur  $m$  peut conduire à une grosse erreur sur  $\frac{\pi m}{\sqrt{1-m^2}}$ , ce qu'on vérifie par propagation des incertitudes.

Il y a plusieurs façons de définir un temps de réponse pour l'asservissement. On peut prendre le temps de réponse  $t_r$  à 5% au bout duquel la valeur est comprise entre 95% et 105% de la valeur de consigne. On peut aussi regarder le temps de montée  $t_m$  : c'est le temps nécessaire au système pour passer de 10% à 90% de la valeur de consigne. Un bon asservissement devrait a priori avoir des temps de réponse courts. Toujours sur une réponse à un échelon, constater en changeant  $R_2$  que le temps de montée  $t_m$  diminue lorsque  $R_2$  diminue. Vous pouvez si vous le souhaitez vérifier la loi approchée proposée dans [Duffait], mais il faut reconnaître qu'elle n'est pas très explicite. Vous pouvez préférer la loi simplifiée  $t_r = \frac{3}{m\omega_0}$  (elle aussi proposée dans [Duffait]).

**2 Oscillateur à pont de Wien**

**Références**

Duffait [2] p.181-183, Krob [3] p.131-139, Brenders [1] p.242-245



Ce montage peut se décomposer sous la forme d'une chaîne directe et d'une contre-réaction/chaîne de retour :

- la chaîne directe est un filtre passe-bande d'ordre 2 (RC série RC parallèle) de fonction de transfert

$$A = \frac{j\omega RC}{1 + 3j\omega RC + (j\omega RC)^2} \tag{6}$$

- la contre-réaction est un amplificateur non-inverseur de fonction de transfert

$$B = 1 + \frac{R_2}{R_1} \tag{7}$$

Des oscillations peuvent alors naître : le bruit électronique va être amplifié par la chaîne directe, puis filtré par la chaîne de retour. Si la résistance  $R_2$  est suffisamment grande, certaines fréquences seront amplifiées après être passées par l'amplificateur et le filtre. Ces fréquences sont celles qui sont les moins atténuées par le filtre, c'est-à-dire celles qui se situent autour de la fréquence propre du filtre passe bande. Si le gain de l'amplificateur est à peine plus grand que l'atténuation minimale du filtre, seule la fréquence du filtre sera amplifiée, les autres étant atténuées. On crée donc un signal (quasi-) sinusoïdal.

Après plusieurs passages dans le système bouclé, le signal à la fréquence du filtre passe bande sera de grande amplitude. Toutefois, cette amplitude est limitée par les effets non-linéaires de l'amplificateur opérationnel, et dépend du système utilisé pour amplifier.

Si on applique le critère de Barkhausen à ce système, on trouve la condition d'oscillation suivante :

$$R_2 \gtrsim 2 R_1 \quad (8)$$

La condition de Barkhausen est une condition stricte :  $R_2 = 2 R_1$ , impossible à réaliser en pratique. Si l'on se place légèrement au-dessus de ce seuil, les oscillations apparaissent mais ne sont pas purement sinusoïdales. Plus on s'éloigne du seuil et plus les oscillations s'écartent d'oscillations sinusoïdales.

### Expérience

#### Étude en boucle ouverte -

Les critères d'oscillation précédents permettent de déduire si le système va osciller en boucle fermée à partir de l'étude de la fonction de transfert en boucle ouverte. Nous allons donc commencer l'étude de l'oscillateur de Wien en boucle ouverte.

On prendra  $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2$  variable (boîte à décade),  $R = 1 \text{ k}\Omega$  et  $C = 1 \mu\text{F}$ . Envoyer en entrée  $v_e$  une tension sinusoïdale de quelques volts. Relever la tension en sortie  $v_s$  et son déphasage  $\phi$  par rapport à l'entrée pour différentes fréquences entre 1 Hz et 100 kHz. Réaliser cela pour  $R_2 = 1.9 \text{ k}\Omega$  (donc légèrement inférieure à  $2 R_1$ ), puis pour  $R_2 = 2.1 \text{ k}\Omega$ . Tracer le diagramme de Bode de la boucle ouverte en gain et en module et le caractériser (ordre, fréquence de coupure, facteur de qualité).

Le filtre obtenu est un filtre passe-bande de facteur de qualité  $Q = 1/3$ . Pour  $R_2$  inférieure à  $2 R_1$ , le gain de la fonction de transfert doit toujours être inférieur à 1. Pour  $R_2 > 2 R_1$ , à la résonance, le gain doit être légèrement supérieur à 1 dans une petite bande de fréquence et les oscillations peuvent apparaître. Pour s'en convaincre et sans faire de mesure supplémentaire, on peut tracer le diagramme de Nyquist dans les deux cas, et vérifier le critère graphique.

À partir des données précédentes, calculer la partie réelle ( $G \cos(\phi)$ ,  $G = v_s/v_e$ ) et la partie imaginaire ( $G \sin(\phi)$ ) de la fonction de transfert et tracer le diagramme de Nyquist, c'est-à-dire la partie imaginaire en fonction de la partie réelle. On doit obtenir un cercle dans les deux cas, et dans le second cas, la courbe doit entourer le point (1,0), signe de l'instabilité et donc des oscillations.

## Expérience

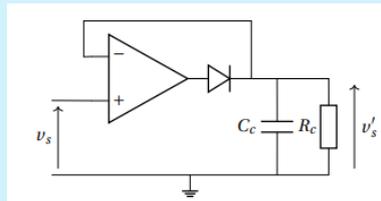
### Naissance des oscillations -

Vérifier que la fréquence des oscillations est bien la fréquence de résonance du filtre.

On peut s'intéresser à la façon dont les oscillations naissent lorsqu'on boucle le système. Un bon moyen de visualiser le démarrage des oscillations est de tracer le portrait de phase du signal d'entrée  $e(t)$ . Dans le cas où  $R_2$  est légèrement supérieure à  $2R_1$ , acquérir la naissance des oscillations sur Latis-Pro. Pour cela on règle le début de l'acquisition avec un seuil de quelques dizaines de millivolts : dans le menu "Déclenchement", choisir EA0, seuil montant, 20 mV sans pre-trig. Ensuite, court-circuiter  $R_2$  avec un fil, lancer l'acquisition, puis débrancher le fil de court-circuit. Laisser puis dériver la courbe obtenue, et tracer  $\frac{dv_e}{dt}$  en fonction de  $v_e$ .

Il est également possible d'effectuer une dérivation analogique, qui a l'avantage de réaliser la dérivation et le lissage en une seule étape. Pour le montage dérivateur, on peut se reporter aux indications de [Krob] p.139. Le signal est une spirale dans le plan de phase, qui converge vers un cycle limite elliptique. On peut voir que l'ellipse est légèrement aplatie sur les côtés, à cause des non linéarités.

On peut observer plus précisément la forme de l'enveloppe lors de la croissance des oscillations en utilisant un détecteur de crête. Ajouter un détecteur de crête sans seuil en sortie de la boucle et acquérir sur Latis-Pro les signaux  $v_s$  et  $v'_s$ , et les comparer.



Pour le détecteur de crête, prendre  $C_c = 1 \mu\text{F}$  et  $R_c = 1 \text{M}\Omega$ . Pour l'acquisition, utiliser le même protocole que pour la naissance des oscillations. Tracer  $\ln(v'_s(t))$  en fonction de  $t$  et ajuster la courbe par une droite : sélectionner les bornes de la modélisation avant de lancer celle-ci. On remonte ainsi au temps  $\tau$  de croissance des oscillations : c'est l'inverse du coefficient directeur. Faire de même pour différentes valeurs de  $R_2$ . Tracer  $1/\tau$  en fonction de  $R_2$ . On attend une croissance exponentielle de l'amplitude des oscillations avec un temps typique :

$$\tau = \frac{R_1 C}{\frac{R_2}{2R_1} - 1} \quad (9)$$

Donc une croissance linéaire de  $1/\tau$  en fonction de  $R_2$ .

## Conclusion

## Compléments

### Questions

- Question ? Réponse

-

## Commentaires

- 
-