

Julie  
2  
Hélène.

MP 30:

# SYSTÈMES BOUCLÉS (OSCILLATEURS EXCLUS).

## Rapports de jury:

### 2 SYSTÈMES BOUCLÉS (OSCILLATEURS EXCLUS).

#### 1 Commentaires extraits des rapports de jury

010] "L'utilisation de "boîtes noires" présentant des défauts introduits exprès pour qu'on s corrige par asservissement ne fait qu'illustrer l'incapacité des candidats à aborder des problèmes pratiques réels. Le monde moderne regorge pourtant de systèmes asservis."

009] "Il n'est pas interdit de penser à d'autres domaines que l'optique."

008] "L'utilisation de boîtes noires dont le fonctionnement n'est pas maîtrisé dessert s candidats<sup>13</sup>."

007] "La connaissance du comportement en fréquence des quadripôles est nécessaire ur discuter les propriétés d'un système bouclé. Le tracé d'un diagramme de Bode peut ciliter la présentation."

004] "Il n'est pas nécessaire de se lancer dans des prestations trop techniques ou trop nbitieuses. Ce montage peut donner lieu à une bonne liaison entre mesure et gran- ur physique, pour peu que l'on ne perde pas de vue la mise en valeur de la grandeur ysique elle même. Cela dit, les méthodes de corrections "PID" peuvent être montrées mplement sur des exemples judicieusement calibrés<sup>14</sup>."

998] "On peut bien entendu se limiter aux asservissements analogiques et laisser, sur ce jet, les techniques numériques aux spécialistes. Le choix du dispositif, ainsi que celui : la grandeur asservie, sont laissés au candidat. Certains dispositifs un peu sophisti- és permettent d'illustrer assez complètement de nombreux aspects du sujet. Mais, il t dangereux d'utiliser une maquette dont on ne connaît pas le principe. Il existe des ontages plus simples utilisant par exemple un correcteur (PI, PID, ...) et permettant tude de l'asservissement de vitesse (ou de position) d'un moteur. Bien qu'on exige vantage à l'agrégation, il faut savoir qu'une simple régulation de température en tout i rien permet déjà de montrer un certain nombre de phénomènes."

#### 13.12.2 Retour des années précédentes

##### ▷ Agrégation 2008 - Note : 17/20

À noter que j'avais le choix avec le montage intitulé *Production et analyse d'une lumière polarisée*.

Questions et commentaires du jury : c'est quoi l'intérêt du diagramme de Nyquist ? Tous les oscillateurs sont-ils non-linéaires ?

##### ▷ Agrégation 2010 - Note : 03/20

À noter que j'avais le choix avec le montage intitulé *Thermométrie*.

Questions et commentaires du jury : précisions sur toutes les quantités qu'on manipule avec la cavité confocale. Sens physique de la finesse, de la résolution, de l'intervalle spectral libre ?

Commentaires personnels : premier commentaire du jury en plein montage, ça m'a soulé ! J'ai présenté l'AO boucle ouverte, puis l'ampli inverseur, l'asservissement en position (que j'ai été bien incapable de faire fonctionner) et le laser. Une vraie catastrophe malgré des techniciens très disponibles et très gentils, j'ai paniqué et fait une présentation lamentable qui vaut bien la note.

Biblio: - Duffaut elec (asservissement en position + AO en boucle ouverte)  
- Précis elec (AO non inverseur  
+ pour la "théorie" : précis elec  $\propto$  HP elec I PSI.

## Plan:

### I- L'amplificateur opérationnel

#### I. 1- AO en boucle ouverte

#### I. 2- AO en boucle fermée : amplificateur non inverseur

### II - Asservissement en position d'un moteur.

#### II. 1- principe

#### II. 2- Caractérisation du système

#### II. 3- Qualité de l'asservissement

#### II. 4- Amélioration par un correcteur.

## Intro:

Certains systèmes fonctionnent en boucle ouverte, c'est-à-dire en ignorant leurs effets.

Au contraire, on appelle "systèmes bouclés" des systèmes qui considèrent ces effets pour corriger leur comportement de manière à réaliser aussi fidèlement que possible les opérations pour lesquelles ils ont été conçus.

De manière générale un système bouclé est un système pour lequel la sortie est réinjectée sur l'entrée. Ils ont deux grandes applications:

- Si le système est instable on a alors des oscillateurs. On n'en parlera pas dans ce montage.
- Si le système est instable on parle de système asservi. C'est ce à quoi on va s'intéresser.

Un exemple classique de système asservi est un four: il y a à l'intérieur du four un thermostat qui permet de capter la température réelle du four et d'agir afin de la rapprocher de la température de commande.

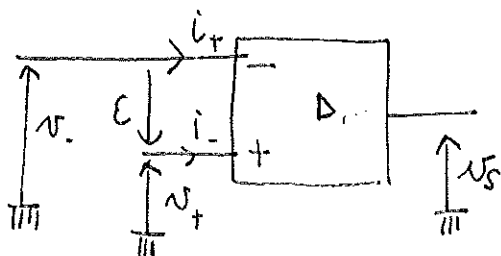
On va s'intéresser à deux systèmes:

- l'amplificateur opérationnel: on verra quelles modifications apporte le bouclage sur les caractéristiques de l'amplificateur.
- Un moteur asservi en position: on verra comment rendre l'asservissement le plus performant, quels paramètres l'influencent, qu'est-ce qui le caractérise.

## I- L'amplificateur opérationnel.

AO = ampli différentiel utilisé dans de nombreux circuits électroniques.

On considérera le modèle de l'AO suivant:



$$i_+ = i_- = 0$$

$$E = v_+ - v_- = 0.$$

$$A < \infty$$

L'Ao est toujours utilisé en boucle fermée. On va voir l'influence du bouclage.

## I-1 L'Ao en boucle ouverte [Duffaut p. 80]

On suppose que la fonction de transfert de l'Ao se met sous la forme :

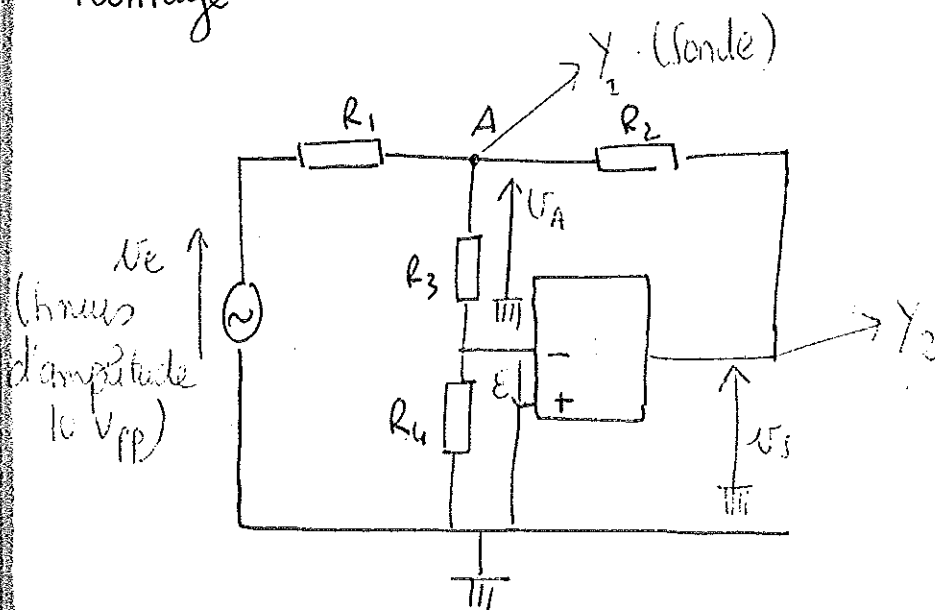
$$\mu(\omega) = \frac{V_s}{E} = \frac{\mu_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_0}}$$

→ passe-bas du 1er ordre.

On va chercher à mettre en évidence ce comportement et à déterminer les paramètres  $\omega_0$  et  $\mu_0$ .

Comme c'est très délicat de faire des mesures en boucle ouverte, on va utiliser un montage en boucle fermée, mais qui va nous permettre d'accéder à ces paramètres.

Montage :



$$\begin{aligned} R_1 &= 9,93 \text{ k}\Omega \\ R_2 &= 9,96 \text{ k}\Omega \\ R_3 &= 0,999 \text{ }\Omega \\ R_4 &= 99 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

⚠ pour mesurer  $v_A$  il faut utiliser une sonde p.c.q.  $R_3 + R_4$  est de l'ordre de  $Z_{e, oscillo}$  :  
 $R_3 + R_4 \sim 100 \text{ k}\Omega$   
 $Z_{e, oscillo} \sim 1 \text{ M}\Omega$

La sonde augmente l'impédance d'entrée de l'oscillo.

Avec ce montage on a  $\varepsilon = -v_s = \frac{-v_A / R_3}{1/R_3 + 1/R_4} = \frac{-R_4}{R_3 + R_4} v_A$

$$\Rightarrow \frac{v_s}{\varepsilon} = - \frac{R_3 + R_4}{R_4} \frac{v_s}{v_A}$$

$$\Rightarrow \boxed{\mu = k \frac{v_s}{v_A}} \quad \text{avec} \quad \boxed{k = - \left( 1 + \frac{R_4}{R_3} \right)}$$

Connaissant  $k$  on a donc accès à  $\mu$  en mesurant  $v_s$  et  $v_A$ .

En boucle ouverte on aurait du mesurer  $\varepsilon \ll 1$ .

Avec ce montage on doit mesurer  $v_A = k\varepsilon \gg \varepsilon$ .

On cherche à tracer le diagramme de Bode de l'A.O.

• pour les fréquences non nulles : on fait varier la fréquence de  $v_e$  et on relève point par point  $f$ ,  $v_s$  et  $v_A$ .

→ Point en direct :

$$f =$$

$$v_s =$$

$$v_A =$$

• pour les basses fréquences c'est trop difficile alors on fait une mesure en continu. On prend  $v_s$  et  $v_A$  pour  $v_e = \pm 10 \text{ V}$  et on fait une moyenne des deux valeurs.

→ Mesure en directe :

$$v_{s0}^+ =$$

$$v_{s0}^- =$$

$$v_{A0}^+ =$$

$$v_{A0}^- =$$

On en déduit

$$V_b = \frac{V_{s0}^+ - V_{s0}^-}{2}$$

$$V_{A0} = \frac{V_{s0}^+ - V_{A0}^-}{2}$$

- Le gain statique est obtenu grâce à la menuiserie en continu:

$$\mu_0 = \frac{V_{s0}}{V_{A0}} k. \quad \Delta \mu_0 = \mu_0 \left[ \frac{\Delta V_{s0}}{V_{s0}} + \frac{\Delta V_{A0}}{V_{A0}} \right]$$

AN:

$$\mu_0 =$$

- On calcule le gain en dB pour les fréquences non nulles:

$$G_{B0} = 20 \log \left| \frac{k V_s}{V_A} \right|$$

On trace  $G_{B0}$  en fonction de  $\log f$  et on modélise par une droite:  $G_{B0} = a \log f + b$ .

→

$$a =$$

$$b =$$

$a \approx -20 \rightarrow$  valide l'ordre 1.

- Pour l'ordre 1, la fréquence de coupure  $f_{B0}$  est donnée par l'intersection des deux asymptotes, ce qui revient à résoudre:

$$a \log(f_{B0}) + b = \mu_0$$

$$\Rightarrow f_{B0} = 10^{\frac{\mu_0 - b}{a}}$$

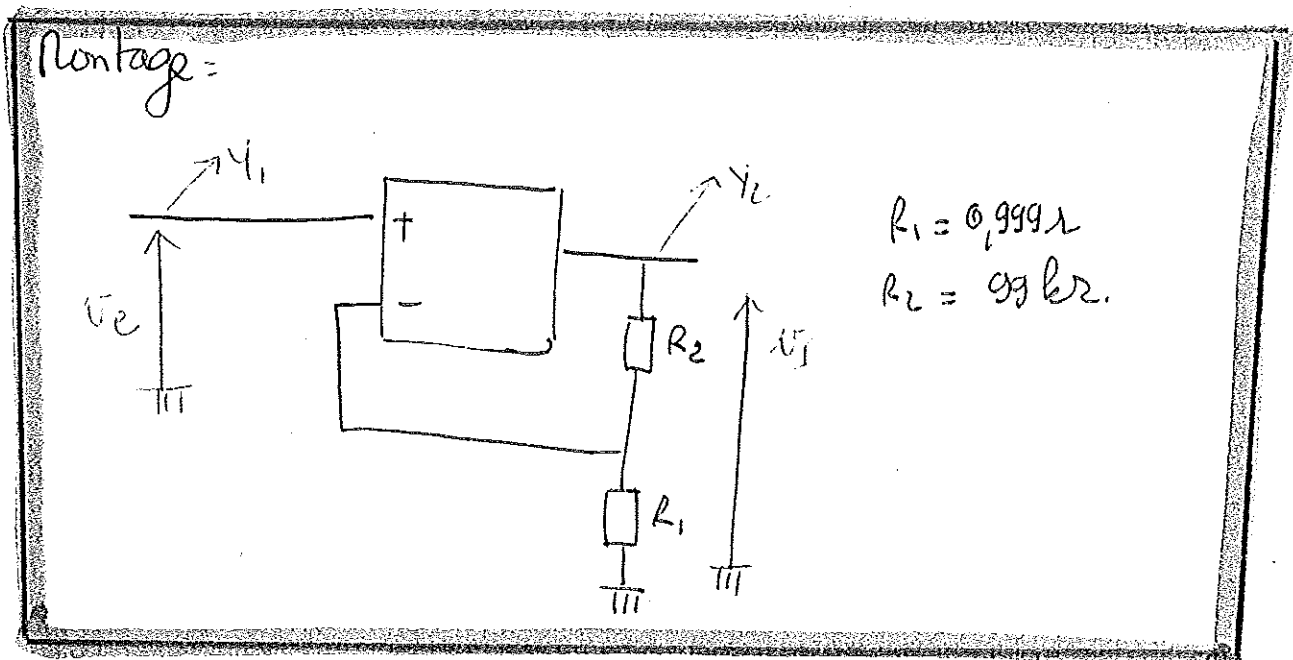
$$\Delta f_{B0} = f_{B0} \ln 10 \left[ \frac{\Delta \mu_0 + \Delta b}{b} + \frac{\Delta a}{a} \right]$$

AN:

$$f_{B0} =$$

I.2- A0 en boucle fermée = montage non-inverseur.  
[Chap p. 207]

On va maintenant déterminer ces mêmes caractéristiques pour l'ampli non inverseur.



Chaîne directe:  $A_0 \quad \mu = \frac{\mu_0}{1 + j\omega/\omega_0} = \frac{v_s}{v_e - v_-}$

chaîne de retour: pont diviseur de tension  $A = \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{v_-}{v_s}$

Donc  $H = \frac{v_s}{v_e} = \frac{\mu}{1 + \mu A} = \frac{\mu_0}{\frac{\mu_0 R_1}{R_1 + R_2} + 1 + j\omega/\omega_0}$

$$\Rightarrow H(j\omega) = \frac{H_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_0}}$$

avec

$$H_0 = \frac{\mu_0}{\frac{\mu_0 R_1}{R_1 + R_2} + 1} \approx 1 + \frac{R_2}{R_1} \approx \frac{R_2}{R_1}$$

$$\omega_0 = \omega_{A0} \left( 1 + \frac{\mu_0 R_1}{R_1 + R_2} \right) \approx \omega_{A0} \mu_0 \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

On trace le diagramme de Bode à l'analyseur de spectres (peu changer).

→ asymptote horizontale aux basses fréquences:

$$20 \log H_0 =$$

$$\Rightarrow H_0 =$$

$$H_{0 \text{ attendu}} \approx 100$$

→ pente de l'asymptote aux hautes fréquences:

$$\frac{\Delta G}{\Delta \log f} = -20 \text{ dB / décades}$$

$$\approx -20 \rightarrow \text{ordre 1.}$$

→ fréquence de coupure à -3dB:

$$f_0 =$$

$$f_{0 \text{ attendu}} =$$

Il nous reste à discuter un peu les changements induits par le bouclage:

- $H_0 < \mu_0 \rightarrow$  on diminue le gain.
- $f_0 > f_{A0} \rightarrow$  on augmente la bande passante.
- le temps de réponse à 5% est donné par  $\tau = \frac{3}{\omega_0}$ .
- $\tau_{A0} > \tau_0 \rightarrow$  On diminue le temps de réponse.

• produit gain-bande passante:

$$\begin{aligned} \mu_0 f_{A0} &= \\ H_0 f_0 &= \end{aligned}$$

→  $\mu_0 f_{A0} = H_0 f_0$  : le produit gain-BP est conservé

On voit donc que le bouclage permet d'augmenter la bande passante et la rapidité, au détriment de l'amplification.

("on peut pas gagner sur tous les tableaux", hé hé).

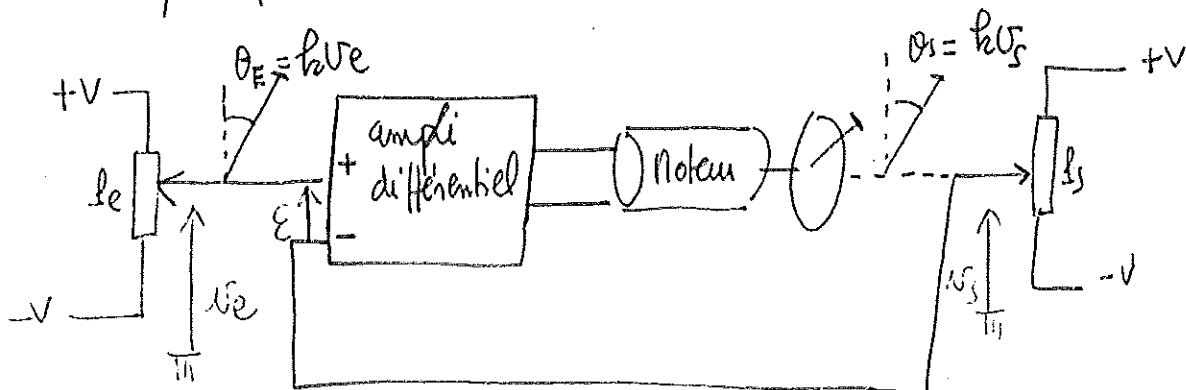
Mais la rapidité et la grande bande passante c'est cool pour un système asservi.

## II - Asservissement en position d'un moteur. [Buffault p. 328]

### II.1 - principe

\* On cherche à commander la position du rotor par une consigne électrique (à une tension de commande correspond une position, repérée par un angle).

Un système en boucle ouverte ne permet qu'un positionnement approximatif, et on utilise donc un système en boucle fermée dont le principe est le suivant :



•  $\theta_e \neq \theta_s \Rightarrow E \neq 0$

$\Rightarrow V_m \neq 0$

$\Rightarrow$  le moteur tourne, entraînant  $\theta_s$  de telle manière que  $\theta_s$  se rapproche de la consigne  $\theta_e$ .

•  $\theta_e = \theta_s \Rightarrow E = 0$

$\Rightarrow V_m = 0$

$\Rightarrow$  le moteur ne tourne plus et est donc stabilisé à la bonne valeur  $\theta_e = \theta_s$ .

petite analogie: on fait en quelque sorte de l'amerrissage en position quand on cherche à amener le curseur de notre souris d'ordi quelque part sur l'écran.

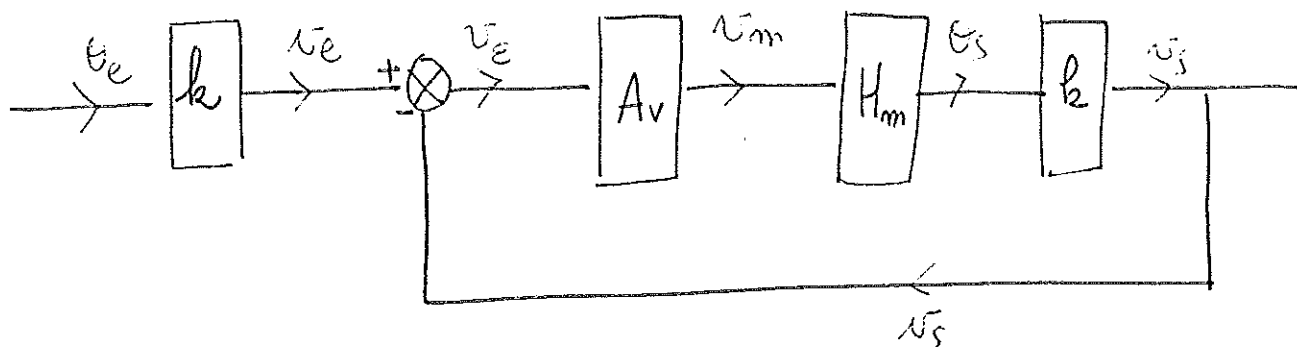
consigne: aller fermer une fenêtre en allant cliquer sur la croix en haut à droite (PC) ou à gauche (Mac).

chaîne d'action: notre main sur la souris

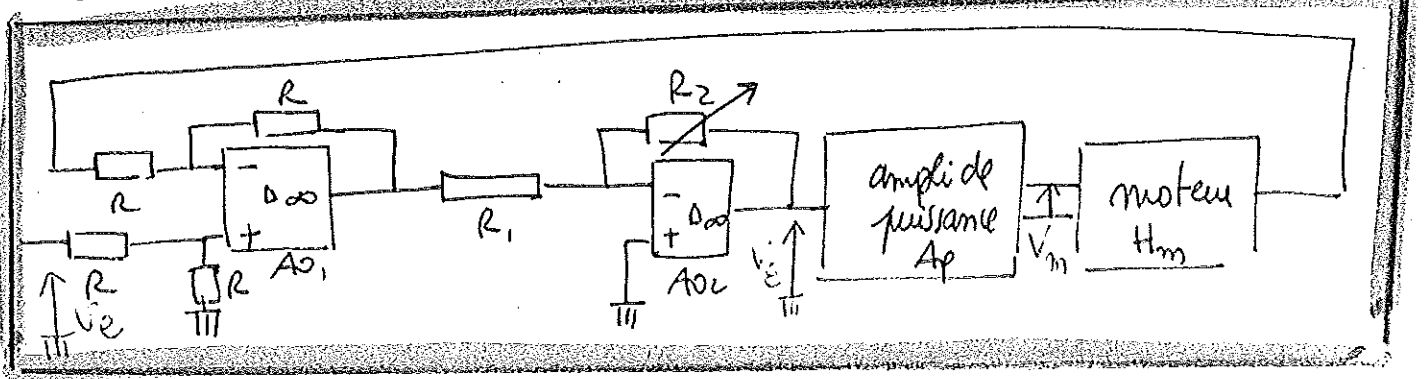
ordinateur: nos yeux et notre cerveau.

\* réalisation pratique:

. schéma bloc:



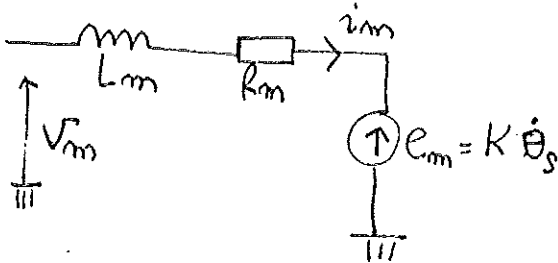
• En détail:



## II-2- Caractérisation du système.

### \* Modélisation du moteur:

#### • partie électrique:



$$V_m = e_m + R_m i_m + L_m \frac{di_m}{dt}$$

On trouve:

$$R_m = 43,5 \Omega$$

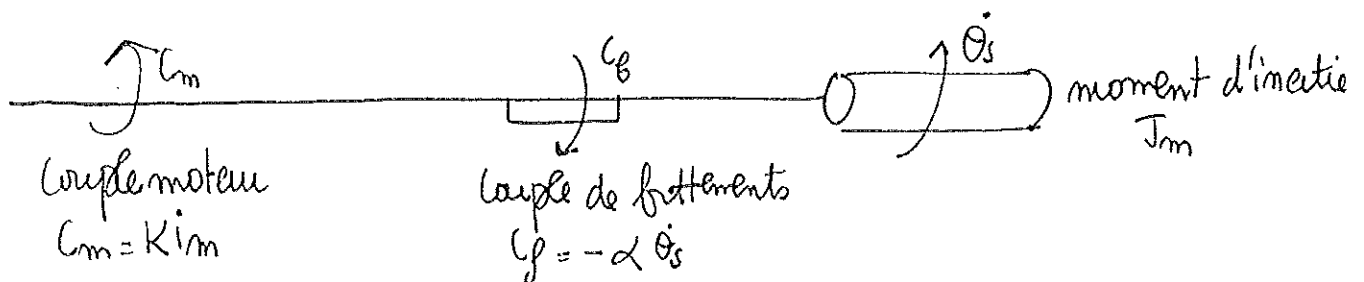
$$L_m = 4,4 \text{ mH}$$

donc  $\frac{R_m}{L_m} \sim 10^4 \text{ s} \gg$  périodes sur lesquelles on observe le système.

Donc on néglige  $L_m$  et ça donne:

$$V_m = K \dot{\theta}_s + R_m i_m.$$

#### • partie mécanique:



$$J_m \ddot{\theta}_s = K i_m - \alpha \dot{\theta}_s$$

Les deux équations se reçoivent en passant aux transformées de Fourier:

$$\begin{cases} V_m = K j\omega \Theta_s + R_m I_m \\ J_m \omega^2 \Theta_s = K I_m - \alpha j\omega \Theta_s \end{cases}$$

$$\Rightarrow K R_m I_m = -J_m R_m \Theta_s \omega^2 + \alpha \Theta_s j\omega R_m$$

$$= -K^2 j\omega \Theta_s + K V_m$$

$$\Rightarrow \Theta_s [J_m R_m \omega^2 + \alpha R_m j\omega + K^2 j\omega] = K V_m$$

$$\Rightarrow H_m(j\omega) = \frac{A_m}{(1+jZ_m\omega)j\omega} = \frac{\Theta_s}{V_m}$$

$$\text{avec } \begin{cases} A_m = \frac{K}{\alpha R_m + K^2} \\ Z_m = \frac{I_m R_m}{K^2 + \alpha R_m} \end{cases}$$

\* Ampli différentiel:  $A_v = \frac{V_m}{V_E} = \frac{A_p R_2}{R_1}$

\* Système au complet:

• En boucle ouverte:  $H_{BO} = \frac{V_s}{V_E} = \frac{V_s}{\Theta_s} \frac{\Theta_s}{V_m} \frac{V_m}{V_E}$

$$\Rightarrow H_{BO}(j\omega) = \frac{A_{BO}}{(1+j\omega Z_m)j\omega} \quad \text{avec } A_{BO} = A_m k A_v$$

• En boucle fermée:  $H(j\omega) = \frac{1}{1+H_{BO}}$

$$= \frac{A_{BO}}{A_{BO} + j\omega(1+j\omega Z_m)}$$

$$= \frac{A_{BO}/Z_m}{\frac{A_{BO}}{Z_m} + j\frac{\omega}{Z_m} - \omega^2}$$

$$H(j\omega) = \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2 + j2m\omega_0\omega}$$

avec  $\begin{cases} \omega_0 = \sqrt{\frac{A_{BO}}{Z_m}} = \sqrt{k \frac{A_m A_v}{Z_m}} \propto \sqrt{R_2} \\ m = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{k A_m A_v Z_m}} \propto \frac{1}{\sqrt{R_L}} \end{cases}$

$\omega_0^2$  représente le gain du système.

$m$  représente son amortissement.

\* On va caractériser ce système en faisant sa réponse indicielle.

Rappel : fonction de transfert = TF de la dérivée de la réponse impulsionnelle.

cf [Buffaut p. 139]

- On envoie un créneau de période  $T=6s$  et d'amplitude  $V_0 = 5V_{pp}$  et on fait l'acquisition de la réponse sur 3s.
- on fait ensuite la série de traitements suivant (cf feuille de calcul) :
  - lissage de la réponse  $\leadsto$  reponselisse
  - dérivée de reponselisse  $\leadsto$  derive
  - lissage de la dérivée  $\leadsto$  derivelisse
  - TF de derivelisse  $\leadsto$  S-module et b.
- On affiche S-module en fonction de  $\omega = 2\pi f$  : c'est la fonction de transfert du système.
- On modélise par une fonction du type :

$$\frac{A}{[(x^2 - Bx) + (Cx)^2]^{1/2}}$$

$\rightarrow$  ça colle bien, on a justifié le modèle de l'ordre 2.

On peut ensuite vérifier la bonne dépendance de  $\omega_0$  et  $m$  avec  $R_2$ .

On a à la résonance:

$$\bullet \frac{d|H|}{d\omega} = 0 \Rightarrow 2(\omega_0^2 - \omega_r^2)(-2\omega_r) + (2m\omega_0)^2 2\omega_r = 0$$

$$\Rightarrow -\omega_r^2 + \omega_0^2 = 2m^2\omega_0^2$$

$$\Rightarrow \boxed{\omega_r = \omega_0 \sqrt{1 - 2m^2}}$$

$$\begin{aligned} \bullet |H|_{\max} &= \frac{\omega_0^2}{\sqrt{[2m^2\omega_0^2]^2 + [2m\omega_0^2\sqrt{1-2m^2}]^2}} \\ &= \frac{1}{2m\sqrt{m^2 + 1 - 2m^2}} \end{aligned}$$

$$\boxed{|H|_{\max} = \frac{1}{2m\sqrt{1-m^2}}}$$

Pour différentes valeurs de  $R_2$  on relie aux axes  $\omega_r$  et  $|H|_{\max}$ .

$$|H|_{\max} \rightsquigarrow m \quad (\text{résulte de l'équation})$$

$$\omega_r \rightsquigarrow \omega_0$$

On trace  $\omega_0^2$  en fonction de  $R_2$

$$m^2 \quad \quad \quad \quad \quad 1/R_2$$

On doit avoir des droites

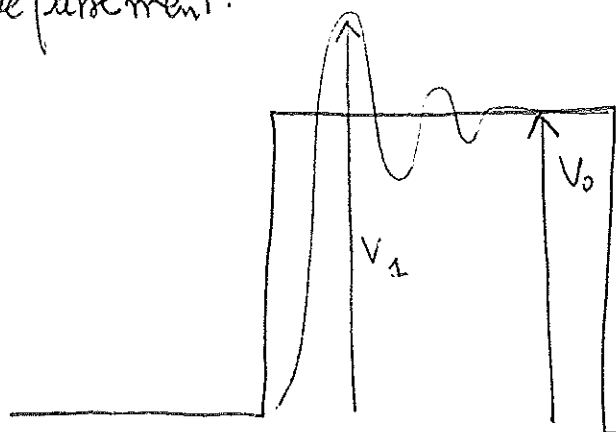
Voilà, on a caractérisé le système et son comportement, mais qu'est-ce que ça veut dire pour son fonctionnement en tant que système asservi.

## II.3- "qualité" de l'amortissement.

On peut observer différentes caractéristiques de la réponse du système qui déterminent la qualité de l'amortissement:

- le temps de réponse (rapidité)
- les dépassements (le choc commence par osciller autour de la position demandée avant de s'y stabiliser).
- la précision, qui peut être évaluée par la sensibilité aux perturbations.

\* Dépassement:



$$D \triangleq \frac{V_1 - V_0}{V_0} = e^{-\pi m \sqrt{1-m^2}}$$

↑  
pour 1 hpt d'oz.

$$\Leftrightarrow m = \frac{\ln D}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2 D}}$$

Démo de l'expression de D:

$$\frac{d^2 v_s}{dt^2} + 2m\omega_0 \frac{dv_s}{dt} + \omega_0^2 v_s = \omega_0^2 V_0 = \omega_0^2 V_0$$

$$\Delta = 4\omega_0^2(m^2 - 1) < 0 \text{ ds le régime aperiodique}$$

$$\Gamma = -m\omega_0 \pm \omega_0 \sqrt{1-m^2}$$

(ce qui donne la solution:

$$v_s(t) = V_0 + A e^{-m\omega_0 t} \cos(\omega_0 \sqrt{1-m^2} t + \varphi)$$

$$\text{C.I.: } v_s(0) = 0 = V_0 + A \cos \varphi$$

$$\Rightarrow \varphi = \pi \text{ et } A = V_0 \text{ par ex.}$$

$$v_s(t) = V_0 [1 - e^{-m\omega_0 t} \cos(\omega_0 \sqrt{1-m^2} t)]$$

le déplacement max est obtenu pour  $t \approx \frac{T}{2} = \frac{\pi}{\omega_0 \sqrt{1-m^2}}$

et alors  $V_1 = V_0 [1 - e^{-m\omega_0 \pi / \sqrt{1-m^2}} \cos(\pi)]$

$$\Rightarrow \frac{V_1 - V_0}{V_0} = e^{-m\pi / \sqrt{1-m^2}} = D.$$

On a donc  $k_2 \uparrow \Rightarrow m \downarrow \Rightarrow D \uparrow$ .

• Prendre le déplacement pour une certaine valeur de  $k_2$  et en déduire  $m$ , à comparer avec la valeur obtenue par la méthode précédente.

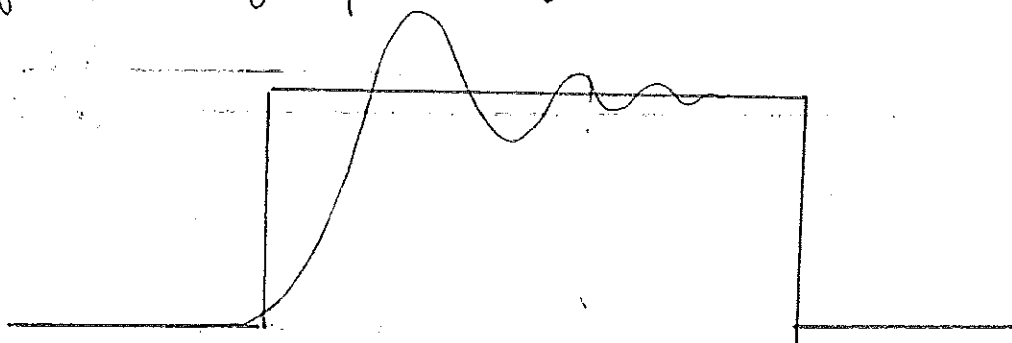
$$\begin{aligned} V_1 &= \\ V_0 &= \\ \Rightarrow D &= \\ \Rightarrow m &= \end{aligned}$$

• Montrer de façon qualitative que  $k_2 \uparrow \Rightarrow D \uparrow$

Donc moins il y a d'amortissement et plus le déplacement est grand.

On a donc intérêt à avoir  $m$  grand du point de vue du déplacement.

\* temps de réponse à 5%: durée nécessaire pour que la réponse ne diffère de la consigne que de 5%.



On peut estimer de façon approchée  $t_r \approx \frac{3}{m\omega_0} = \frac{3}{2m}$

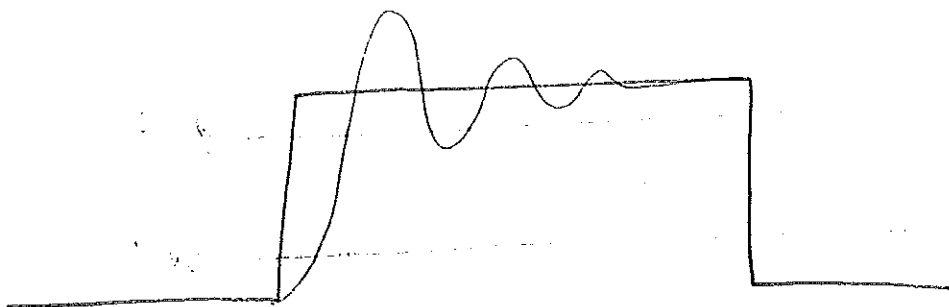
$$V_0 [1 - e^{-m\omega_0 t} \cos(\omega_0 \sqrt{1-m^2} t)] > 0,95 V_0$$

$$\Rightarrow e^{-m\omega_0 t} \lesssim 0,05$$

$$\Rightarrow m\omega_0 t \gtrsim -\ln 0,05 \approx 3$$

$$\Rightarrow t \gtrsim \frac{3}{m\omega_0}$$

\* temps de montée : temps au bout duquel la réponse se situe de 10% à 90% de la valeur finale.



On montre (cf Duffaut) que  $t_m \approx \frac{1 - 0,4m + 2,9m^2}{\omega_0}$

$R_2 \uparrow \Rightarrow m \downarrow, \omega_0 \uparrow \Rightarrow t_m \downarrow$ .

montrer que  $t_m \downarrow$  quand  $R_2 \uparrow$  (même "à l'oeil").

Du point de vue de la rapidité, on a donc intérêt à avoir  $R_2$  opt.

\* précision : On cherche la sensibilité à une perturbation.

montra que quand  $R_2$  augmente, si on essaye de faire devier le clou de la position de consigne, la résistance est d'autant plus gde que  $R_2$  est gde.

Donc du point de vue de la précision on a intérêt à avoir  $R_2$  gde.

\* DONC : il faut faire un compromis entre la rapidité et la précision.

ça s'illustre bien avec notre analogie : si on veut aller hop vite on n'aime pas à aller directement sur la voie sans la dépasser. Si on veut aller très précisément et d'un seul coup sur la voie, il faut accepter d'y aller un peu plus lentement.

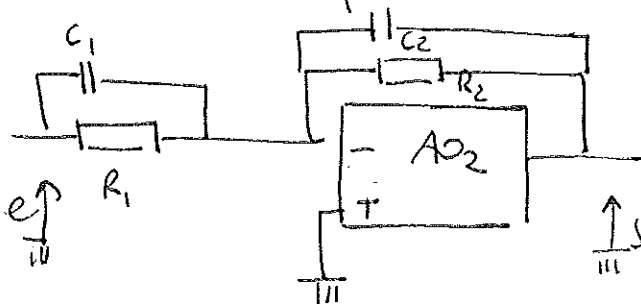
On voit que le problème est lié au fait que  $m$  et  $\omega_0$  varient de façon opposées en fonction de  $R_2$  -

Donc l'idéal serait de pouvoir agir sur l'amortissement tout en conservant la même amplification.

on peut faire ça grâce à des condensateurs.

## II - 4 - Amélioration par un correcteur.

Montage : on rajoute des capas au lieu de résistances sur l'ampli inverseur.



\* On a maintenant 
$$\begin{cases} v_+ = \frac{R_1 / j\omega C_1}{R_1 + 1/j\omega C_1} \cdot e \\ v_- = - \frac{R_2 / j\omega C_2}{R_2 + 1/j\omega C_2} \cdot s \end{cases}$$

$$\Rightarrow \frac{s}{e} = - \frac{R_2}{R_1} \frac{j\omega C_1}{j\omega C_2} \frac{R_1 + 1/j\omega C_1}{R_2 + 1/j\omega C_2}$$

$$= - \frac{R_2}{R_1} \frac{j R_1 C_1 \omega + 1}{R_2 j \omega C_2 + 1}$$

on pose  $C(j\omega) = \frac{z_1 j\omega + 1}{z_2 j\omega + 1}$  avec  $z_1 = R_1 C_1$  et  $z_2 = R_2 C_2$

ça revient par rapport au système précédent à remplacer  $A_v$  par  $A_v' = A_v C(j\omega)$ , et  $H_{Bo}$  par  $H_{Bo}'(j\omega) = H_{Bo}(j\omega) C(j\omega)$

$$\Rightarrow H_{Bo}'(j\omega) = \frac{A_{Bo}}{j\omega(1+j\omega z_m)} \frac{z_1 j\omega + 1}{z_2 j\omega + 1}$$

Si on en comprend simplement le principe on suppose  $z_1 \sim z_m$ , alors:

$$H_{Bo}'(j\omega) = \frac{A_{Bo}}{j\omega(1+z_2 j\omega)}$$

et le correcteur à simplement pour effet de remplacer  $z_m$  par  $z_2$ , ce qui revient à remplacer  $m$  par  $m' = m \sqrt{\frac{z_m}{z_2}}$  et  $\omega_0$  par  $\omega_0' = \omega_0 \sqrt{\frac{z_m}{z_2}}$ .  
Si  $z_2 < z_m$  alors  $m' > m$  et  $\omega_0' > \omega_0$ .

Alors le dépassement est diminué et le système garde la même réaction.

$$\left. \begin{aligned} * \text{ on a } z_m &\simeq \frac{3}{tr} \simeq 10 \text{ ms} \\ R_1 &\simeq 10 \text{ k}\Omega \end{aligned} \right\} \text{ on pd } C_1 \simeq 1 \mu\text{F}$$

on veut  $z_2 < z_m$

$$\Rightarrow z_2 < \frac{z_m}{R_2}$$

Montra l'influence des correcteurs de façon qualitative

### Conclusion:

Un système bouclé présente plusieurs avantages: rapidité, précision, faible influence des perturbations.

Il faut cependant toujours faire des compromis: amplification / bande-passante  
précision / rapidité.

On n'a considéré que des systèmes stables.

Lorsqu'on boucle un système de manière à ce qu'il soit instable, on peut alors réaliser des oscillateurs entretenus.



