

# MP27 - Systèmes bouclés

Clément (de la Salle et Colléaux)

31 mars 2020

Niveau : L3

## Bibliographie

- ⚡ *Électronique expérimentale*, **Krob**
- ⚡ *Expériences d'électronique*, **Duffait**
- ⚡ *Électronique PSI*, **Brenders**, Précis Bréal
- Équation diff de l'oscillateur de WIEN

## Prérequis

➤

## Expériences

☞

☞

## Table des matières

Table des matières	1
<b>1 Rétro-action positive : oscillateur de WIEN</b>	<b>2</b>
1.1 Étude en boucle ouverte . . . . .	3
1.2 Condition d'oscillation . . . . .	4
1.3 Croissance des oscillations . . . . .	5
<b>2 Rétro-action négative : asservissement d'un moteur</b>	<b>6</b>
2.1 Présentation et diagramme de Bode . . . . .	6
2.2 Précision (qualitatif) . . . . .	8
2.3 Rapidité (qualitatif) . . . . .	9
2.4 Dépassement . . . . .	9
<b>3 Remarques</b>	<b>10</b>

## Introduction

De manière générale, on parle d'un système bouclé lorsqu'on a affaire au type de système suivant :

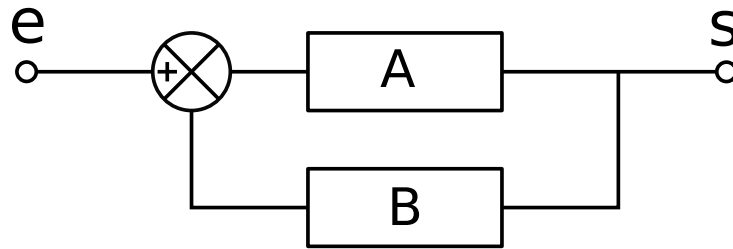


FIGURE 1 – Schéma d'un système bouclé.  $A$  et  $B$  représentent les fonctions de transfert des composants.

Il existe alors deux façon de boucler le système :

- **Rétroaction positive** : on rend volontairement le système instable pour faire apparaître des oscillations par exemple
- **Rétroaction négative** : la sortie est comparée à l'entrée, le but est de réduire cet écart. Utile pour asservir une grandeur (vitesse d'une voiture, température dans une maison...)

## 1 Rétro-action positive : oscillateur de WIEN

NB

Le cadre général de cette partie est "oscillateurs auto-entretenus", on peut citer d'autres exemples comme l'oscillateur de VAN DER POL [↗ Duffait p.174](#) , l'oscillateur à quartz [↗ Krob p.147, Brenders p.259](#) , l'oscillateur de COLPITTS ou encore l'oscillateur à résistance négative [↗ Duffait p.169, Brebbers p.253](#)

On commence par donner le schéma du montage ainsi que ses caractéristiques :

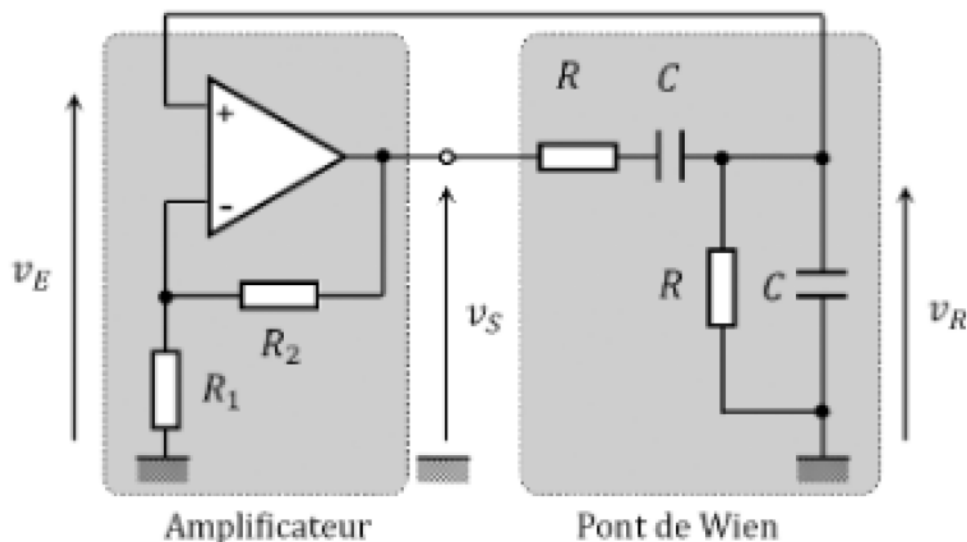


FIGURE 1.1 – Schéma de l'oscillateur à pont de WIEN

La fonction de transfert de l'amplificateur est

$$A = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Et celle du filtre est

$$B = \frac{1}{1/Q + j(\omega/\omega_0 - \omega_0/\omega)} \quad \text{avec} \quad \omega_0 = \frac{1}{RC}, \quad Q = \frac{1}{3}$$

Globalement, on peut choisir  $R$  et  $C$  comme on veut... Un truc pas mal, c'est  $R_1 = R = 1 \text{ k}\Omega$  et  $C = 1 \text{ }\mu\text{F}$ .

### NB

On ne peut faire que trois manip' au total... Il faut donc retirer une des trois manip de cette section (sans doute la première)

## 1.1 Étude en boucle ouverte

### But

Tracer le diagramme de BODE du circuit en boucle ouverte pour caractériser le système ( $\omega_0, Q$ , résonance)...

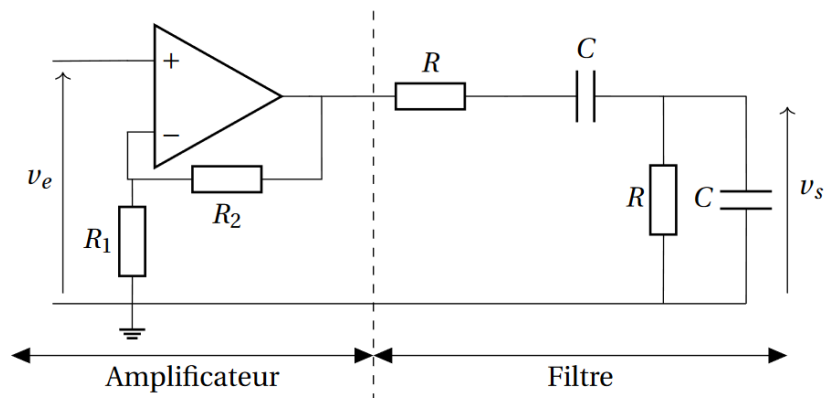


FIGURE 1.2 – Fonctionnement en boucle ouverte

La fonction de transfert en boucle ouverte est alors simplement

$$H = AB$$

C'est la fonction de transfert d'un filtre passe-bande, que l'on cherche à caractériser

### Expérience : Diagramme de BODE

🔗 Krob p.131

⌚ 5 min

Alimenter avec 2V.

Tracer les diagramme de BODE en amplitude et en phase pour les valeurs  $R_2 = 1.9 \text{ k}\Omega$  puis  $R_2 = 2.1 \text{ k}\Omega$ .

Ajouter un point sur chaque diagramme et modéliser  $|H|$  (on toute autre méthode) pour remonter à  $\omega_0$  et  $Q$  et comparer aux valeurs attendues.

On remarque que pour  $R_2 > 2R_1$ , on a une résonance qui apparaît... Voyons voir pourquoi.

## 1.2 Condition d'oscillation

### But

Observer que la condition de BARKHAUSEN doit être vérifiée afin d'avoir une naissance d'oscillations

En reprenant le schéma représentant un système bouclé, on peut écrire, à une pulsation donnée  $\omega$  :

$$s(\omega) = A(j\omega) [e(\omega) + B(j\omega)s(\omega)] \implies s(\omega) = \frac{A(j\omega)}{1 - A(j\omega)B(j\omega)} e(\omega)$$

Donc la fonction de transfert du système bouclé diverge lorsque  $AB = 1$ , ce qui veut dire que la fréquence  $\omega$  qui vérifie ce critère sera amplifiée et donc, on verra naître un signal sinusoïdal. Physiquement, le fonctionnement est le même qu'un LASER : on part d'un bruit qui contient beaucoup de fréquences, le filtre n'en laisse passer que certaines, qui sont alors amplifiées, puis refiltrées, puis ré-amplifiées... Jusqu'à ce qu'il ne reste plus qu'une fréquence !

De manière générale, la **condition de BARKHAUSEN** indique si l'apparition d'un signal à la pulsation  $\omega$  est possible ou non :

$$A(j\omega)B(j\omega) = 1$$

Dans notre cas, cette condition se traduit ainsi :

$$\begin{cases} R_2 = 2R_1 \\ \omega = \omega_0 \end{cases}$$

Et c'est pour ça qu'on avait choisit précédemment des valeurs de  $R_2$  de chaque côté de cette limite.

### En pratique

En vrai, c'est une condition pour faire naître les oscillations, mais celle-ci ne restent durablement que si l'on dépasse légèrement la condition :

$$R_2 \gtrsim 2R_1$$

Si l'on va plus loin, d'autres fréquences peuvent être amplifiées, et on commence à perdre le caractère sinusoïdal des oscillations...

On peut le voir dans le diagramme de NYQUIST : à partir de cette valeur critique, la fonction de transfert en boucle ouverte entoure le point  $(-1, 0)$ .

### Expérience : Vérification de conditions d'oscillations

🔍 ?

⊖ 10 min

**Première condition** Vérifier qu'en dessous d'une certaine valeur de  $R_2$ , les oscillations ne naissent pas. Essayer d'encadrer la valeur critique  $R_c$  à l'Ohm près (entre  $R_c^-$  et  $R_c^+$ ).

Sortir alors  $R_2$  du circuit et mesurer les deux valeurs  $R_c^-$  et  $R_c^+$  à l'ohmmètre puis en déduire

$$R_c = \frac{R_c^- + R_c^+}{2}$$

Avec les incertitudes... Comparer à  $2R_1$ .

**Deuxième condition** Mesurer la fréquence du signal émis et comparer à  $\omega_0$ . On peut mesurer avec les curseurs de l'oscillo ou au fréquencemètre.

### Manip' : Nyquist

On peut tracer, à l'aide des points récupérés pour le diagramme de BODE, la fonction de transfert dans le plan complexe. On vérifie que pour la première série de points ( $R_2 = 1.9 \text{ k}\Omega$ ), le point  $(-1, 0)$  n'est pas entouré. Alors qu'il l'est dans le cas  $R_2 = 2.1 \text{ k}\Omega$ .

## 1.3 Croissance des oscillations

L'étude dynamique de l'oscillateur de WIEN est faite dans ici : [Benders p.244](#), [Krob p.133](#). On a le résultat :

$$\frac{d^2s}{dt^2} + \frac{3-A}{RC} \frac{ds}{dt} + \frac{1}{(RC)^2} s = 0$$

On pose alors  $\alpha = 3 - A = 2 - \frac{R_2}{R_1}$  et  $\omega_0 = \frac{1}{RC}$ , de sorte que la solution devienne

$$s(t) = s_0 e^{-\alpha \omega_0 t} \cos(\omega_0 t + \varphi)$$

On retrouve bien la naissance des oscillations pour  $R_2 > 2R_1$ .

### NB

En vrai le signal ne continue pas à diverger car le gain de l'ampli op est limité... La saturation des oscillations correspond à la saturation de l'ampli.

### But

Retrouver la forme exponentielle de la croissance des oscillations

### Expérience : Croissance des oscillations

☞ Krob

⊖ 5 min

Après avoir introduit le détecteur de crête en sortie du montage, faire une acquisition de la croissance des oscillations sous Latis-Pro. Pour cela, court-circuiter  $R_2$  avec un fil, régler le seuil de déclenchement à 10 mV avec un pré-trig à 0% et ôter le court circuit après avoir lancé l'acquisition. Cela revient à introduire instantanément  $R_2$  dans le circuit et donne un signal plus propre. Faire une modélisation affine de  $\ln s(t)$  et comparer la pente à  $\alpha \omega_0$ . Répéter ceci pour plusieurs valeurs de  $R_2 > 2R_1$  et tracer  $\alpha$  en fonction de  $R_2$ . Comparer la pente de la droite obtenue à  $1/2R_1$ .

## 2 Rétro-action négative : asservissement d'un moteur

✎ Duffait, p.330

On met cette partie en deuxième parce que c'est moins grave si on fait pas tout (et on fera clairement pas tout!)

### 2.1 Présentation et diagramme de Bode

Le principe d'un système asservi va être illustré sur l'exemple d'un Moteur à Courant Continu.

#### Manip' : Mise en évidence de l'asservissement

Sur le moteur préalablement réglé en asservissement en position faire bouger un peu la vis pour montrer qu'elle revient à sa position initiale : le circuit électrique qui commande le moteur est un système bouclé qui permet de prendre en compte la position de la vis en temps réel pour ajuster la tension de commande et ainsi garder la même position de la vis même si le système est perturbé.

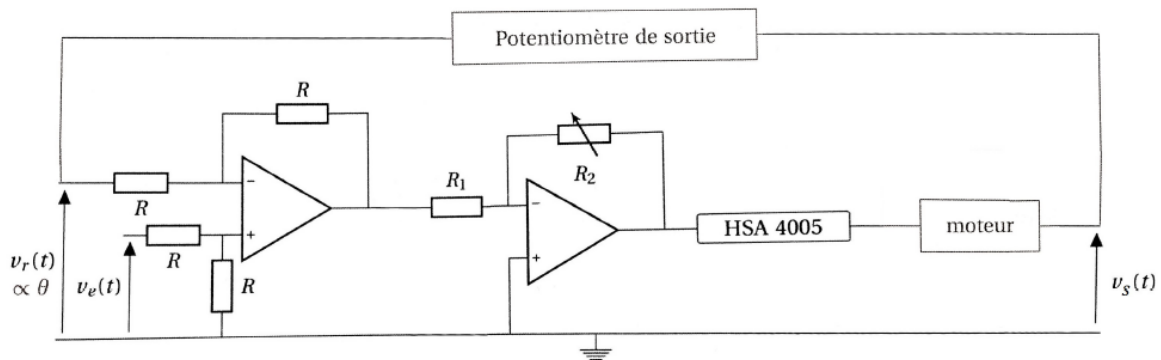


FIGURE 2.1 – Schéma-bloc du MCC

- $v_e$  est la tension consigne qui commande l'angle de la vis voulu par l'habile expérimentateur : on peut la changer EN DIRECT devant le jury ébahi pour montrer que ça change l'angle
- le premier AO est un soustracteur  $v = v_r - v_e$  donc c'est lui qui est le comparateur nécessaire à tout système bouclé et on remarque bien le "-" sur le signal de retour
- le deuxième AO est un amplificateur inverseur (de gain  $-R_2/R_1$ )
- le bloc HSA 4005 est juste un ampli de puissance
- le moteur c'est juste "entrée = tension"  $\implies$  "sortie = vitesse de rotation"
- le potentiomètre de sortie est un capteur qui renvoie une tension  $v_r$  proportionnelle à l'angle de la vis, c'est ce qui fait le retour

On comprend bien grâce au comparateur que si l'angle commande et l'angle réel sont égaux alors après le comparateur la tension est nulle donc vous aurez beau l'amplifier autant que vous voulez le moteur n'aura pas de tension en entrée et donc ne bougera pas, c'est ce qu'on voulait ! Si maintenant on s'écarte de la position souhaitée d'un angle négatif, alors  $v_r$  diminue et on se retrouve avec  $v_r < v_e$ . Par conséquent on commande en sortie de soustracteur une vitesse positive, qui ramène la vis vers sa position d'équilibre. On peut faire le même raisonnement pour un angle positif, et on se rend compte qu'on est bien en train d'asservir en position la position de la vis.

#### Gain du potentiomètre

Ça sort de l'étude du montage mais important à signaler : il faut que comparer les tensions, reviennent effectivement à comrre des angles. Ceci se traduit par le fait que le gain doit être le même dans les deux sens (par exemple si une consigne de 2V ça veut dire 10°, alors faut que 10° ça fasse bien aussi 2V) !

Ensuite, soit on le montre avec différentes fréquences d'entrée (en 2018 ils disent que ça se voit bien avec une wobulation en entrée) soit on le balance directement mais la fonction de transfert du MCC asservi  $\underline{H}(j\omega) = \frac{v_r}{v_e}$  peut se mettre (*☛ Duffait, p.331/337*) peut se mettre sous la forme de la fonction de transfert d'un filtre passa-bas d'ordre 2 :

$$\underline{H}(j\omega) = \frac{1}{1 + 2mj \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}$$

où  $m$  est le coefficient d'amortissement et  $\omega_0$  la pulsation de résonance.

### Gain du potentiomètre

Ça sort de l'étude du montage mais important à signaler : il faut que comparer les tensions, reviennent effectivement à comrre des angles. Ceci se traduit par le fait que le gain doit être le même dans les deux sens (par exemple si une consigne de 2V ça veut dire 10°, alors faut que 10° ça fasse bien aussi 2V) !

### Potentiomètre

Celui-là on sait pas trop comment il marche, mais parfois c'est des dynamomètres (mesure de vitesse de rotation) suivit d'un intégrateur !

#### But

Vérifier expérimentalement le filtre passe-bas et déterminer les valeurs de  $m$  et  $\omega_0$ .

### Expérience : Tracé de la fonction de transfert du MCC asservi

☛ TP, Duffait p.337

☹ ?

- réaliser le montage représenté précédemment avec un choix particulier de composants :  $R$  doit être pris grand devant les impédances de sortie du potentiomètre (1 k $\Omega$ ) et du GBF (50  $\Omega$ ), on prend donc  $R = 100$  k $\Omega$ .  $R_1$  doit être grand devant l'impédance de sortie de l'AO (50  $\Omega$ ), on prend donc  $R_1 = 1$  k $\Omega$ . Les autres composants sont Moteur (P95.16), Alim Jeulin (P54.12), Alim HSA 4005 (P47.6, P47.5), Boite à décades, 4 R (100k $\Omega$ ), 1 R (10k $\Omega$ ), 2Ao (P41.4), Oscillo (P36.7), GBF (P44.11).
- Pour certaines fréquences, mesurer  $v_e$  et  $v_r$  et rajouter ça aux points déjà tracés en preparation.

- On trace le module de  $\underline{H}(j\omega)$  en fonction de  $\omega$  et on modélise ça par le module d'une fonction de transfert passe-bas d'ordre 2, ce qui nous donne les valeurs expérimentales de  $m$  et  $\omega_0$ . On peut interpréter la valeur de  $m$  avec le facteur de qualité  $Q = \frac{1}{2m}$  et on veut une réponse qui n'oscille pas avant de se stabiliser, on attend donc  $Q$  petit.

En réalité ↗ *Duffait, p.331*,  $m$  (**coefficient d'amortissement**) est relié à la valeur de  $R_2$  par  $m = \frac{A}{\sqrt{R_2}}$  avec  $A$  constante dépendant des paramètres des éléments de l'asservissement, mais ce qui est important est que changer  $R_2$  permet de modifier le régime (peuso-périodique, apériodique) car il change  $m$  qui change  $Q$ . Nous nous intéresserons donc aux variations de  $R_2$ , c'est-à-dire de l'amplification.

*L'asservissement se veut le plus efficace possible et dans cette notion d'efficacité d'asservissement vient évidemment la notion d'erreur statique : est-ce que le système arrive à obéir à la demande, ie est-ce que la tension de sortie converge vers la tension de commande ? .*

#### But

Dans la suite, on fait varier l'amplification (via  $R_2$ ) et on regarde son influence sur les différentes caractéristiques du moteur asservi : précision, rapidité et dépassement.

## 2.2 Précision (qualitatif)

#### But

Montrer que pour un choix de valeurs des composants le système est éclaté au sol

#### Manip' : Étude qualitative de la précision

Pour plusieurs valeurs de  $R_2$ , comparer les tensions de sortie et de commande. En particulier pour  $R_2 = 100\Omega$  la tension de sortie ne converge pas vers la tension de commande si l'on part d'un angle différent de l'angle voulu (vis tenue au doigt). Montrer qu'aux grands  $R_2$ , donc aux grandes amplifications, ça marche bien.

#### Explication

Ce qu'il se passe avec un gain trop petit c'est que le signal qui sort du comparateur est trop faible après amplification et commande au moteur une vitesse de sortie qui ne peut pas vaincre les frottements.

*Mais il y a d'autres critères comme la rapidité : si un système de régulation de température met un jour à ajuster la température à la température voulue bah il sert à rien.*



## 2.3 Rapidité (qualitatif)

La rapidité peut ici correspondre au temps de réponse, ie au temps mis par la tension de sortie pour atteindre la valeur de la tension de commande.

**But**

Obtenir une tendance de l'évolution de la rapidité avec  $R_2$

### Manip' : Étude qualitative de la rapidité

Pour plusieurs valeurs de  $R_2$  comprises entre 1 et 5 k $\Omega$ , estimer le temps de réponse du système en comparant la commande  $v_e$  et l'entrée  $v_r$  et constater qu'il augmente avec  $R_2$ .

Il est tout à fait possible de faire cette étude de manière quantitative..

On se dit alors que diminuer  $R_2$  diminue le temps de réponse et améliore l'efficacité du système mais que nenni! À force de diminuer le temps de réponse, on passe dans le régime pseudo-périodique caractérisé par un dépassement de la valeur voulue! Ici on s'en fout pour la vis mais dans des robots d'assistance en chirurgie ça peut avoir son importance..

## 2.4 Dépassement

On définit le dépassement  $D$  comme  $D = \frac{v_{max} - v_{\infty}}{v_{\infty}}$  en supposant que le système est précis, ie que l'erreur statique  $v_{commande} - v_{infty}$  est nulle.

Pour un système du second ordre (vérifié précédemment) en régime pseudo-périodique (donc ce qui arrive si on diminue trop le temps réponse) ce dépassement  $D$  s'écrit :

$$D = \exp \frac{-m\pi}{\sqrt{1 - m^2}}$$

on en tire donc  $m$  :

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

**But**

Étudier le dépassement pour retrouver l'évolution attendue et trouver une valeur expérimentale de  $m$ .

### Expérience : Étude du dépassement

☛ TP p.61

☹ ?

- On peut tracer  $D$  en fonction de  $R_2$  pour retrouver la cohérence avec l'évolution du temps de réponse.
- Dans les conditions qui ont permis de trouver  $m^{mod}$  (fit de la fonction de transfert), la mesure de  $D$  permet de trouver  $m^{exp}$ , on peut confronter les deux et les incertitudes associées (prendre en entrée un signal créneau de fréquence 0.2 Hz et 3V).
- Si vraiment y a le temps on peut tracer  $m^2$  en fonction de  $1/R_2$  pour retrouver la loi de  $m$  en  $1/\sqrt{R_2}$

Faut se placer à  $R_2$  suffisamment grand pour que la précision soit la meilleure possible.

On voit ainsi qu'il y a un compromis à faire sur la valeur de  $R_2$  : diminuer  $R_2$  améliore la rapidité mais crée un dépassement ! Si en voiture je veux aller à 130 km/h c'est sympa d'y arriver en 2 s mais dommage de devoir faire une pointe à 220 km/h entre-temps..

Pour les vrais systèmes, ce dilemme est toujours présent et la caractéristique mise en avant change selon le système (genre des fois un dépassement c'est pas grave, un temps de réponse minimal n'est pas nécessaire,...)

## Questions

- ★ Comment mesurer ?

*RLC-mètre, fréquencemètre et oscillo (aux curseurs)*

- ★ Et détecteur de crête ?

*On a mis tout ce qu'on a pu dans le rapport*

- ★ Mettre l'asservissement ça influe sur le rapport signal/bruit ?

*Comme tout est linéaire tout est modifié de la même manière et le RSB normalement change pas*

- ★ Système assimilable à un système bouclé qui permet d'extraire un signal d'un bruit ?

*Boucle à verouillage de phase*

## 3 Remarques

- Peut-être se dégager du temps pour l'oscillateur à quartz
- Préciser sur le dessin du début les fonctions de transfert et les dessiner
- Questions sur les manières de régler un asservissement ? Méthode de Ziegler Nichols qui commence par mettre en oscillation le système avec un retour pur. Peut-être s'attendre à des questions sur ça
- Peut-être inverser les deux parties ? Mais la rétro-action négative permet de s'ajuster niveau temps.
- Peut-être introduire l'asservissement avec la discussion de la boucle de retour ➡ *voir pdf dans le dossier* :
  - Proportionnalité bien pour la rapidité  $B = K$
  - Dérivation pour éliminer erreurs systématiques  $B = \tau p$
  - Intégrateur pour meilleure zone d'accrochage  $B = \frac{1}{1+\tau p}$
- Notion de retard de l'information pas tellement détaillée dans ces cas là..
- Plaquette d'asservissement du flux lumineux d'une diode mais les deux parties là c'est moins casse-gueule
- Être au taquet sur la théorie de la deuxième partie, sur la logique
- Manip quantitative : manipuler la rétro action pour mesurer l'erreur statique
- il faut resituer ce montage dans le monde des asservissements, il faut pas juste décrire, il faut raconter une histoire en comprenant la Physique
- Être un peu au taquet sur la TL et son utilisation en FTBF

Manip surprise sur une lunette afocale, expliquer son principe et ses caractéristiques. Choix des focales : **C'est l'oculaire qu'est petit !** 50 cm et 15 cm.

Objectif : grand ou petit diamètre ? Diaphragme d'ouverture, grand diamètre ? Est-ce que ça vaut le coup de prendre l'objectif super grand ? Ça fait plus de lumière mais t'es limité par la pupille de sortie qui ne doit pas être plus grande que la pupille de l'oeil