



SORBONNE  
UNIVERSITÉ

université  
PARIS-SACLAY

*Centre interuniversitaire de préparation à l'agrégation de Montrouge*

---

## SYSTÈMES BOUCLÉS

---

2024-2025



*This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited. This license does not permit commercial exploitation or the creation of derivative works without specific permission.*

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Oscillateurs sinusoïdaux</b>	<b>3</b>
1.1	Oscillateur à pont de Wien . . . . .	3
1.2	[2P] Oscillateur à quartz . . . . .	6
<b>2</b>	<b>[1P] Oscillateurs à relaxation</b>	<b>7</b>
2.1	Réalisation d'un circuit auto-oscillant . . . . .	7
2.2	Comparateur à hystérésis . . . . .	7
2.3	Intégrateur . . . . .	8
2.4	Oscillateur . . . . .	8
<b>3</b>	<b>[1P] Régulation de vitesse d'un moteur</b>	<b>9</b>
3.1	Présentation de l'expérience . . . . .	9
3.2	Mise en oeuvre . . . . .	10
<b>4</b>	<b>[2P] Régulation d'éclairement</b>	<b>11</b>
4.1	Présentation de l'expérience . . . . .	11
4.2	Mise en œuvre . . . . .	12
<b>5</b>	<b>[AP] Étude d'un amplificateur suiveur</b>	<b>13</b>
5.1	Instabilité du système bouclé non corrigé . . . . .	15
5.2	Correction proportionnelle . . . . .	15
5.3	Correction proportionnelle et intégrale (PI) . . . . .	16
5.4	Correction proportionnelle intégrale et dérivée (PID) . . . . .	17

## Bibliographie :

### Références :

- Châtelain et Dessoulavy : Électronique (T.2) [PhF6 CHA]
- Malvino : Principes d'électronique [PhF6 MAL]
- Auvray : Électronique des circuits analogiques [PhA AUV]
- Journeaux : TP de physique : électricité, électronique, optique [PhA3 JOU]
- Krob : Électronique expérimentale [PhA3 KRO]
- Rocard : Dynamique générale des vibrations («Les systèmes vibrants» ch. XVI & XVII) [PhC2 ROC]
- H Prépa, 1ère année, Électronique - Électrocinétique II, 1ère année PCSI-PTSI [PhA1 BRE]
- H Prépa, Électronique : 2de année MP, MP\*, PT, PT\* [PhA1 BRE]
- Delacressonnière et More : Électronique 2ème année MP [PhA1 DEL]
- Manneville et Esquieu : Systèmes bouclés linéaires de communication et de filtrage [PhF6 MAN]

Un système bouclé peut être stable ou instable. Lorsqu'il est instable, il peut se mettre à osciller et cette oscillation peut être exploitée pour la réalisation d'oscillateurs (objet de la première partie). Si le système bouclé est stable, il permet au contraire de réaliser une régulation, un asservissement (deuxième partie). Dans ce cas là, il convient d'éviter les oscillations du système.

**Il est conseillé de garder au moins 1h du TP pour se consacrer à l'étude des asservissements.**

## OSCILLATEURS

### 1 Oscillateurs sinusoïdaux

À partir du schéma ci-dessous d'un système bouclé, on peut réaliser un oscillateur sinusoïdal. Pour ce faire, la fonction de transfert  $\mu'(\omega)$  du système bouclé, qui vérifie

$$\mu'(\omega) = \frac{s}{e} = \frac{\mu(\omega)}{1 + \beta(\omega)\mu(\omega)} \quad (1)$$

doit être telle qu'il existe une fréquence  $\omega_0$  pour laquelle  $\beta(\omega_0)\mu(\omega_0) = -1$ . Alors, même en l'absence de signal d'entrée, le système est instable et il apparaît un signal de sortie à cette fréquence. On notera désormais  $\beta(\omega_0) = \beta_0$  la valeur caractéristique correspondante. L'amplitude du signal  $s$  est limitée par saturation (non-linéarité) ou bien elle est commandée par un réglage paramétrique qui ajuste  $\mu$  en fonction de l'amplitude de  $s$  (cf. Châtelain tome 2. p. 235).

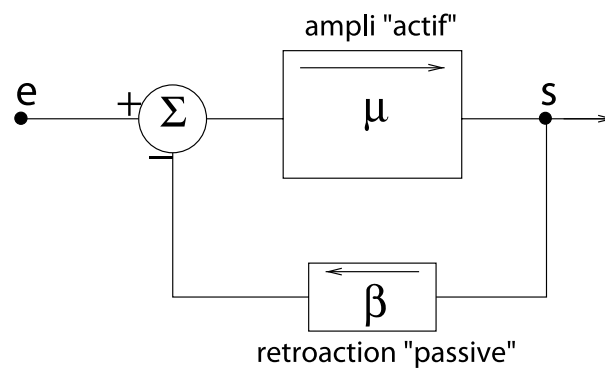


FIGURE 1 –

#### 1.1 Oscillateur à pont de Wien

Il est réalisé à l'aide d'un amplificateur non inverseur de gain :  $\mu = 1 + R_2/R_1$  et d'un filtre passe-bande, dit filtre de Wien, qui constitue la boucle de rétroaction (voir figures ci-dessous).

**[1P] Étude du filtre** Il s'agit d'un filtre passe-bande d'ordre 2 utilisant des résistances et condensateurs uniquement, et donc le schéma est donné ci-dessous. Sa fonction de transfert s'écrit :

$$\beta(\omega) = \frac{\beta_0}{1 + jQ\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)} = \frac{\frac{1}{3}}{1 + \frac{1}{3}j\left(RC\omega - \frac{1}{RC\omega}\right)}, \quad (2)$$

où l'on a identifié

$$\beta_0 = \frac{1}{3}, \quad (3)$$

$$Q = \frac{1}{3}, \quad (4)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{RC}.$$

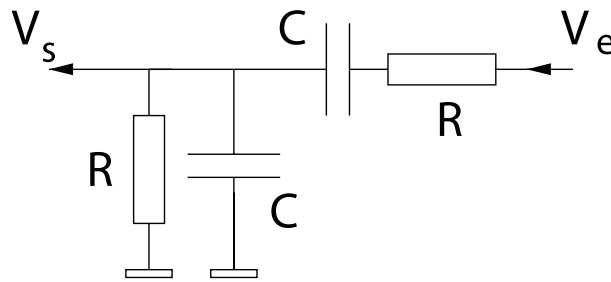


FIGURE 2 –

Tracer le diagramme de Bode complet du filtre (déphasage + gain en dB).

Vérifier expérimentalement que pour  $\omega = \omega_0 \equiv \frac{1}{RC}$ ,  $V_s$  est en phase avec  $V_e$  et  $\beta(\omega_0) = \beta_0 = 1/3$ . Déterminer expérimentalement la valeur du facteur de qualité ( $Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega}$ , avec  $\Delta\omega$  défini par l'atténuation à -3dB), et vérifier qu'elle vaut 1/3 (et indépendante de R et C donc non ajustable). Cette faible valeur de facteur de qualité constitue un inconvénient de ce filtre : il est peu sélectif (en comparaison du résonateur à quartz utilisé plus loin). On choisira R et C pour que  $\omega_0$  soit de l'ordre de  $10^4 \text{ rad.s}^{-1}$ .

**[1P] Oscillateur** On utilise le montage ci-dessous, où  $R_1$  et  $R_2$  sont des résistances que l'on peut modifier finement (boîtier à décade) et dont la valeur se situe dans la gamme 1--10k $\Omega$ .

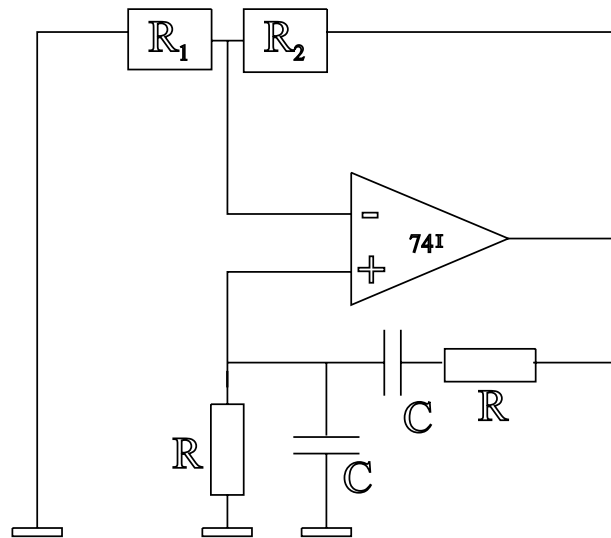


FIGURE 3 –

Vérifier qu'une oscillation démarre quand  $R_2/R_1 \simeq 2$ , soit  $|\mu\beta_0| = 1$  (seuil de l'oscillation).

Montrer que ces oscillations sont quasi-sinusoïdales, à  $\omega_0$  (en restant près du seuil).

Que se passe-t-il quand on augmente le gain  $\mu$  de l'amplificateur (forme, fréquence) ?

Que se passe-t-il lorsque l'on choisit pour les couples  $R_1$  et  $R_2$  correspondant au seuil d'oscillations des valeurs trop élevées ou trop faibles ?

**Vérification du critère de Nyquist** Référence : - Auvray : Chap. 8

La stabilité/instabilité du système bouclé est déterminée par le comportement en boucle ouverte.

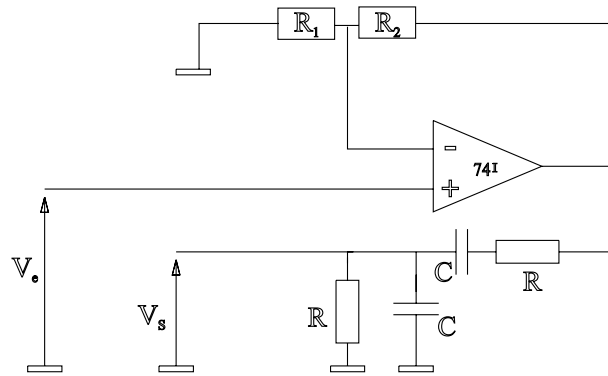


FIGURE 4 –

**Étude rapide [1P]** Ouvrir la boucle au niveau de l'entrée + (voir schéma), fournir à celle-ci un signal sinusoïdal  $V_e$ . Observer à l'oscilloscope  $V_e$  et  $V_s$ . Ajuster le rapport  $R_2/R_1$  et la fréquence pour que  $V_e$  et  $V_s$  aient même amplitude et même phase, ce qui correspond à la relation (justifier) :

$$\frac{V_s}{V_e} = \beta_0 \mu = +1, \text{ et } \omega = \omega_0.$$

**Étude approfondie [2P]** À l'aide d'une acquisition informatique, tracer dans le plan complexe la courbe décrite par  $\beta\mu$  lorsque  $\omega$  varie. Tracer la courbe pour trois valeurs de  $\mu$ . Vérifier qu'il y a oscillation lorsque la courbe entoure le point +1. Les oscillations ne sont sinusoïdales que lorsque la courbe passe par le point +1.

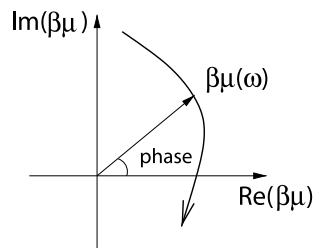


FIGURE 5 –

**Obtention des auto-oscillations [1P]** Supprimer le GBF et refermer la boucle, dans le cas où le système vérifie  $V_s/V_e \simeq 1$ . Le système doit être très proche de l'oscillation. Sinon modifier légèrement  $\frac{R_2}{R_1}$ . (Note : les oscillations sont obtenues pour  $\beta_0 \mu = +1$  et non pas  $-1$  comme mentionné auparavant dans l'introduction. Refaire le calcul dans ce cas particulier pour s'en convaincre. Pour se ramener au schéma habituel d'un système bouclé non-oscillateur il faut considérer  $e = V_e - V_s$  dans le schéma ouvert ci-dessus. En mode oscillateur  $e = 0$ )

**[1P] Établissement des oscillations (régime transitoire)** Le but est ici d'étudier ce qui se passe au voisinage du seuil d'oscillation. L'évolution de ce système est régie par une équation différentielle *linéaire* à coefficients constants dont les solutions sont exponentiellement croissantes ou décroissantes suivant le signe de  $1 - \beta_0 \mu$  et dont le temps caractéristique  $\tau$  vérifie  $\tau^{-1} = \omega_0 \alpha$  où  $\alpha = 1 - \frac{R_2}{2R_1}$ . Au seuil d'oscillation, et donc pour  $\alpha \ll 1$ , le temps caractéristique diverge. On montre que lorsque le régime oscillant s'établit, la tension vérifie l'équation suivante :

$$v(t) = A e^{-t/\tau} \sin\left(\sqrt{1 - \alpha^2} \omega_0 t\right)$$

Réaliser un oscillateur à pont de Wien. Pour étudier simplement la mise en place des oscillations, on peut utiliser une boîte à décade de capacité avec un bouton de court-circuit. En court-circuitant une capacité dans le filtre à pont de Wien, on peut mettre à zéro la tension en sortie de l'AO, et étudier ensuite la mise en place des oscillations. En effectuer un suivi par ordinateur et vérifier que la tension croît exponentiellement. Qualitativement, comment varie le taux de croissance en fonction de  $R_1$  et  $R_2$  ? On pourra étudier quantitativement la dépendance de  $\tau$  en  $\alpha$  dans un deuxième passage.

En se plaçant juste au dessus du seuil d'oscillation, en et on jouant sur les valeurs de résistance, on peut observer de même la décroissance exponentielle, et vérifier qualitativement ses dépendances en  $R_1$  et  $R_2$ .

**[2P] Stabilisation de l'amplitude** Pour limiter l'amplitude, on peut introduire une non-linéarité au moyen de deux diodes tête-bêche branchées en parallèle sur  $R_2$  (utiliser de préférence 2 diodes «de signal»).

*Référence* : - Auvray : Électronique des signaux analogiques, chap. 8.

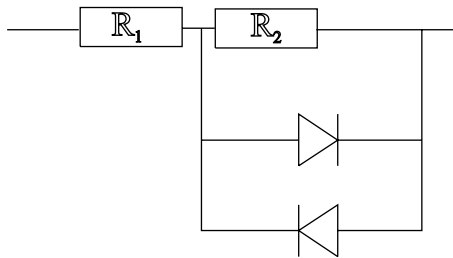


FIGURE 6 –

Les diodes réduisent le gain dès que la valeur instantanée du signal aux bornes de  $R_2$  dépasse 0,6 V.

**[2P] Observation de l'espace des phases** A la sortie de l'A.O. mettre un dérivateur approché ( $V_2 \propto \frac{dV_1}{dt}$  si  $V_2 \ll V_1$ ).

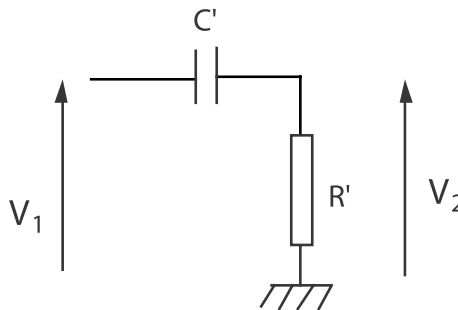


FIGURE 7 –

Il faut que  $C'$  et  $R'$  soient petits. En pratique prendre  $C' = \frac{C}{10}$  et  $R' = \frac{R}{10}$  et vérifier lors de la mise en œuvre que pour  $V_2 \ll V_1$  le montage est bien un dérivateur. Utiliser l'oscilloscope en mode Lissajous avec la dérivée en ordonnée. On observe que tant que le régime est quasi-sinusoïdal la courbe de phase est une ellipse d'axes principaux horizontal et vertical ; lorsque la saturation apparaît il y a déformation.

## 1.2 [2P] Oscillateur à quartz

*Références* :

- Châtelain chap.5
- Auvray chap. 8
- Malvino chap. 19. (pour les propriétés du quartz)

Voici un montage utilisant la résonance série du quartz. Utiliser un ampli op TL071 car la fréquence du quartz est assez élevée.

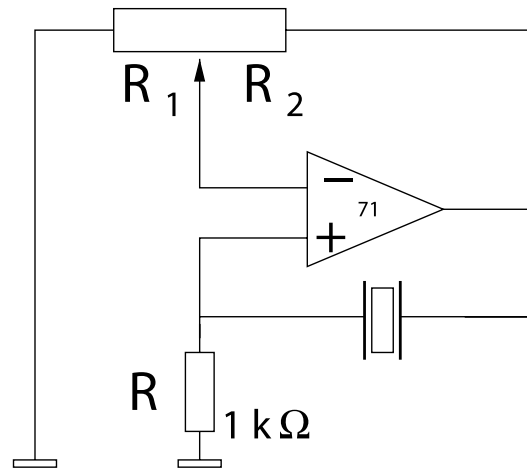


FIGURE 8 –

À la résonance série, l'impédance du quartz est réelle et faible (de l'ordre de  $1\text{ k}\Omega$  d'où le choix de  $R$ ), ce qui produit une réaction positive en phase avec le signal d'entrée. La résonance du quartz est très aiguë ce qui explique la grande stabilité fréquentielle de l'oscillateur<sup>1</sup>. Pour le vérifier mettre un fréquencemètre à la sortie et contrôler que la fréquence ne varie pratiquement pas lorsqu'on change  $R_2/R_1$ , ce qui n'était pas le cas avec le pont de Wien.

## 2 [1P] Oscillateurs à relaxation

### 2.1 Réalisation d'un circuit auto-oscillant

Dans les deux premiers paragraphes on réalisera séparément les éléments constitutifs de l'oscillateur monté au paragraphe c).

### 2.2 Comparateur à hystérésis

Référence : H-Prépa 2ème année Électronique I.

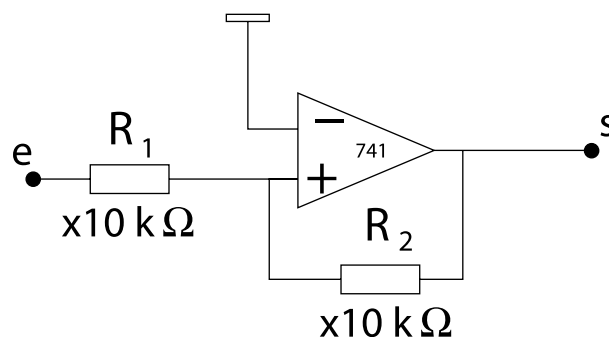


FIGURE 9 –

La caractéristique ( $s$  fonction de  $e$ ) du circuit ci-dessus présente de l'hystérésis (donc de la mémoire). Pour l'observer on envoie à l'entrée  $e$  un signal sinusoïdal basse fréquence ( $\cong 500\text{ Hz}$ ) et on observe  $s$  et  $e$  sur l'oscilloscope en mode Lissajous.

Trouver les conditions de basculement et montrer qu'on doit choisir  $R_1 < R_2$  (car en pratique  $|e| \ll |V_{\text{sat}}|$ ). Vérifier les valeurs prévues des tensions de basculement  $e_{b\pm} = \pm R_1 V_{\text{sat}}/R_2$  et des paliers  $\pm V_{\text{sat}}$  (on a fait ici l'hypothèse

1. De quelle type de résonateur s'agit-il ? En pratique, qu'est-ce qui fixe la fréquence de résonance ? Pourquoi ne trouve-t-on pas d'oscillateur à quartz fonctionnant à  $1\text{ Hz}$  ?

que les tensions de saturation sont symétriques ; si ce n'est pas le cas en pratique, il faut annuler la tension de décalage c.f. le TP Ampli. Op). Prévoir le sens de parcours du cycle. Le vérifier en très basse fréquence. Ne pas démonter ce comparateur (élément II du montage du paragraphe *Oscillateur* ci-dessous).

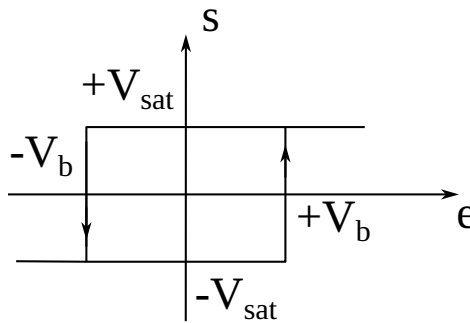


FIGURE 10 –

### 2.3 Intégrateur

C'est l'élément I du montage proposé ci-dessous. Il a déjà été étudié dans le TP Ampli. Op. Le réaliser et vérifier qu'il fonctionne (ajouter éventuellement une résistance en parallèle sur le condensateur, ne pas oublier de l'ôter lors de la réalisation de l'oscillateur).

### 2.4 Oscillateur

Un autre exemple classique et important d'utilisation d'un AO en régime saturé est celui du multivibrateur astable (référence : page 189 du Duffait d'électronique (fig 36)). L'idée est de faire osciller l'AO entre ses deux points de saturation, puis d'intégrer ce signal pour obtenir un signal quasi-triangulaire.

Assembler les deux blocs précédents :

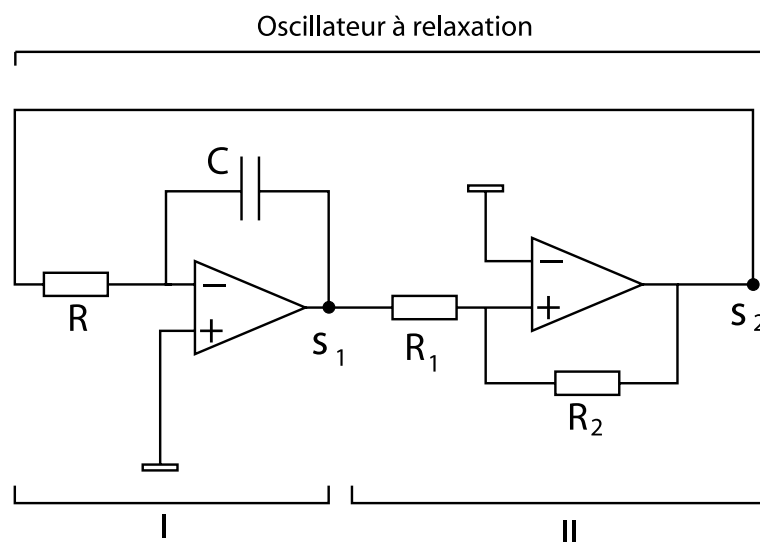


FIGURE 11 –

Étudier les signaux en  $S_1$  et  $S_2$ . Trouver la forme ainsi que l'expression de la période des signaux  $S_1$  et  $S_2$  et confronter ces résultats à l'expérience.

Ce système possède deux applications :

- principe d'un capacimètre lorsque le signal est envoyé sur un période-mètre ;
- réalisation d'un générateur sinusoïdal (GBF) au moyen d'un conformateur à diodes (cf. B.U.P. 758) qui transforme le signal triangulaire en sinusoïde (cf. figure ci-dessous).



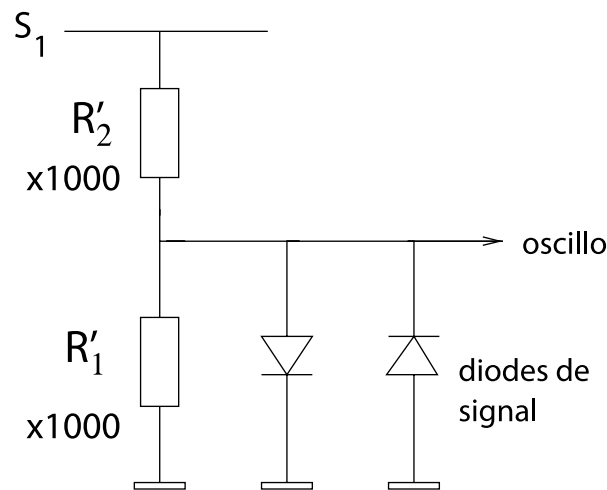


FIGURE 12 –

Ajuster  $R'_1$  et  $R'_2$  pour avoir un aspect de sinusoïde. La fréquence du signal peut être commandée par une tension externe. Si le temps le permet, réaliser le montage p.192 du Duffait pour observer cette commande de la fréquence. On a ainsi réalisé un oscillateur de fréquence choisie par l'expérimentateur : c'est le principe d'un V.C.O. (Voltage Controlled Oscillator), à la base d'un GBF.

En plus perfectionné ce système est utilisé dans tous les générateurs B.F. usuels.

NB : Il existe aussi dans la collection une plaquette «multivibrateur astable» . Cet oscillateur permet de générer des signaux carrés de fréquence réglable ; il est basé sur l'utilisation des portes logiques élémentaires de type NAND.

## ASSERVISSEMENT

**Avertissement :** Trois dispositifs sont présentés ici :

- asservissement d'un moteur en vitesse ;
- asservissement d'une lampe en éclairement ;
- système amplificateur suiveur de tension (en annexe).

Les asservissements en vitesse et en éclairement sont similaires et abordent les notions de précision et de correcteur PID. En annexe, l'étude d'un amplificateur suiveur permet d'illustrer les problématiques associées à la réalisation d'un asservissement mais n'est pas apprécié par les jurys.

On propose pour un premier TP d'étudier l'asservissement en vitesse du moteur. On étudiera avec cet asservissement les notions de précisions et de stabilité ainsi que les différents types de correction. L'asservissement en éclairement étant très proche de celui en vitesse, on privilégiera le fait de bien comprendre ce dernier à faire les deux asservissement dans le même TP. A noter que la boucle à verrouillage de phase est aussi un système asservi, qui sera abordé dans le TP «Télécommunications - Traitement du signal».

## 3 [1P] Régulation de vitesse d'un moteur

### 3.1 Présentation de l'expérience

Le but de cet asservissement est de maintenir constante la vitesse d'un moteur, la valeur de cette vitesse étant imposée par une tension de commande  $U_{com}$ . Pour tester l'efficacité de la régulation, on freinera le moteur par courants de Foucault. Cette expérience est très proche de celle sur la résolution d'éclairément, le même protocole

étant suivi. Cette régulation est toutefois plus perceptible car on peut suivre plus nettement (à l'œil et au bruit) les variations de vitesse du moteur que d'intensité lumineuse de la lampe.

**Note 1 :** Pour que l'asservissement fonctionne bien, il ne faut pas mettre des tensions de commande trop élevées à cause de la limitation de l'amplification de puissance.

Le schéma ci-dessous représente les fonctions qui interviennent :

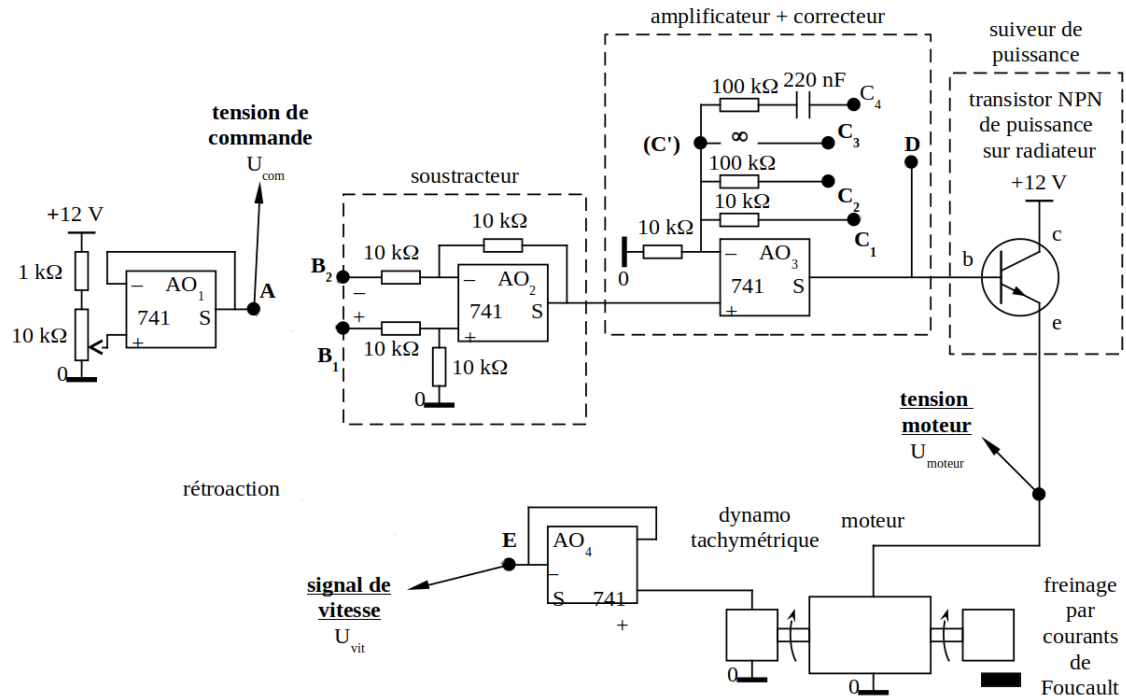


FIGURE 13 –

Le schéma suivant en représente le circuit électrique réalisé sur une plaquette qui contient tous les composants :

L'AmpliOp AO<sub>1</sub> fonctionne en suiveur, il permet d'avoir une tension de commande non influencée par la résistance d'entrée du soustracteur. L'AmpliOp AO<sub>4</sub> joue un rôle équivalent pour le signal de vitesse. Avec l'AmpliOp AO<sub>2</sub> on réalise un soustracteur :  $v_S = v_+ - v_-$ . Avec l'AmpliOp AO<sub>3</sub> on réalise un amplificateur non inverseur dont le gain est ajustable : croissant de C<sub>1</sub>-D à C<sub>3</sub>-D, la connexion C<sub>4</sub>-D procurant une correction intégrale<sup>2</sup>. Cet amplificateur commande un suiveur de puissance. L'axe du moteur entraîne d'un côté la dynamo tachymétrique qui donne une tension U<sub>vit</sub> proportionnelle à la vitesse angulaire de rotation, et de l'autre côté un cylindre en cuivre soumis à l'action d'un aimant dont la distance est réglable<sup>3</sup>.

Pourquoi faut-il fermer la boucle de rétroaction en reliant E à B<sub>2</sub> et pas à B<sub>1</sub> ?

### 3.2 Mise en oeuvre

**Note 2 :** Afin d'être sûr que le régime de fonctionnement reste linéaire, il vaut mieux commencer les diverses expériences avec la distance minimum entre l'aimant et le cylindre : on ajuste à chaque fois la tension de commande U<sub>com</sub> de façon que la tension U<sub>moteur</sub> soit environ 5 V<sup>4</sup>. Puis, sans changer U<sub>com</sub> on éloigne l'aimant jusqu'à la butée et on étudie l'évolution de U<sub>vit</sub>.

2. La connexion (C') est normalement non utilisée, elle peut servir à des expériences complémentaires.

3. Le moteur est à courant continu et aimant permanent. La dynamo tachymétrique donne une tension continue de 1 V pour 1000 tr/min. Le freinage par courants de Foucault est proportionnel à la vitesse. On le rencontre sous une forme un peu différente dans les ralentisseurs de poids lourds.

4. Il vaut mieux faire tourner le moteur assez lentement. En tout cas il faut que cette tension soit inférieure à 9 V afin de tenir compte de la saturation des AmpliOp et de la tension V<sub>be</sub> du transistor.

**Etude en boucle ouverte** Relier A-B1 ( $U_{com}$  sur l'entrée + du soustracteur) et relier C<sub>1</sub>-D (gain le plus faible) Observer à l'oscilloscope  $U_{vit}$  et  $U_{moteur}$ . Régler  $U_{com}$  pour avoir  $U_{moteur} = 5$  V. Eloigner l'aimant et interpréter le fait que la vitesse n'est pas régulée.

**Etude en boucle fermée** Relier E-B<sub>2</sub> ( $U_{vit}$  sur l'entrée – du soustracteur).

- A faible gain : liaison C<sub>1</sub>-D. Régler à nouveau  $U_{com}$ , éloigner l'aimant et remarquer que la vitesse varie un peu moins que précédemment, l'interpréter en remarquant que  $U_{moteur}$  diminue un peu sous l'effet de la rétroaction.

Voir ce qui se passe quand on permute les connexions B<sub>1</sub> et B<sub>2</sub>.

Pour améliorer la régulation il faut augmenter le gain de boucle - Relier C<sub>2</sub>-D pour accroître le gain et procéder de la même façon.

- Relier C<sub>3</sub>-D pour pouvoir utiliser l'énorme gain de l'AmpliOp en boucle ouverte, et remarquer que la régulation est très bonne ... mais que la tension  $U_{moteur}$  est très oscillante : l'accroissement du gain de boucle a provoqué une réduction de la stabilité du système. Noter que dans le cas du système présent, cette instabilité est peu gênante car le moteur a une inertie telle que les oscillations apparaissent peu dans sa vitesse. Cependant on note un fonctionnement plus bruyant, il y a donc un risque d'usure prématurée. On peut remarquer que l'AmpliOp AO<sub>3</sub> fonctionne en comparateur, et ce mode de fonctionnement, très utilisé, est appelé "régulation en tout ou rien".

- Relier C<sub>4</sub>-D ... On introduit ici une correction intégrale : le gain en continu est énorme à cause du condensateur (régulation statique parfaite), et le gain à la fréquence critique, qui correspond à un déphasage de 180, est le même qu'en C<sub>2</sub>-D (stabilité). La valeur choisie pour le condensateur correspond approximativement au régime transitoire qui minimise le temps de réponse.

On peut dans un deuxième temps relier un GBF délivrant une tension crête à une fréquence  $\approx 0.5$  Hz à l'entrée B<sub>2</sub> et observer comment le moteur parvient à suivre plus ou moins la tension de commande en fonction du correcteur choisi. Cela permettra également d'évaluer l'effet du correcteur sur le temps de réponse à la consigne. On ne modifiera alors pas la position de l'aimant.

## 4 [2P] Régulation d'éclairement

### 4.1 Présentation de l'expérience

Le but de cet asservissement est de maintenir constant l'éclairement d'une surface, la valeur de cet éclairement étant imposée par une tension de commande  $U_{com}$ . Pour tester l'efficacité de la régulation on modifiera la distance lampe-surface éclairée. Le schéma ci-dessous représente les fonctions qui interviennent :

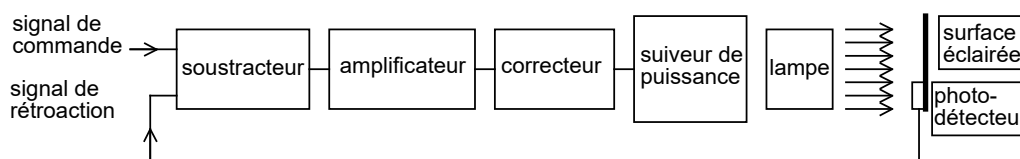


FIGURE 14 –

Le schéma suivant en représente le circuit électrique réalisé sur une plaquette qui contient tous les composants :

- L'amplificateur opérationnel AO<sub>1</sub> fonctionne en suiveur (adaptateur d'impédances), il permet d'avoir une tension de commande non influencée par la résistance d'entrée du soustracteur ;
- L'amplificateur opérationnel AO<sub>4</sub> joue un rôle équivalent pour le signal d'éclairement ;
- Avec l'amplificateur opérationnel AO<sub>2</sub>, on réalise un *soustracteur* :  $v_S = v_+ - v_-$  ;

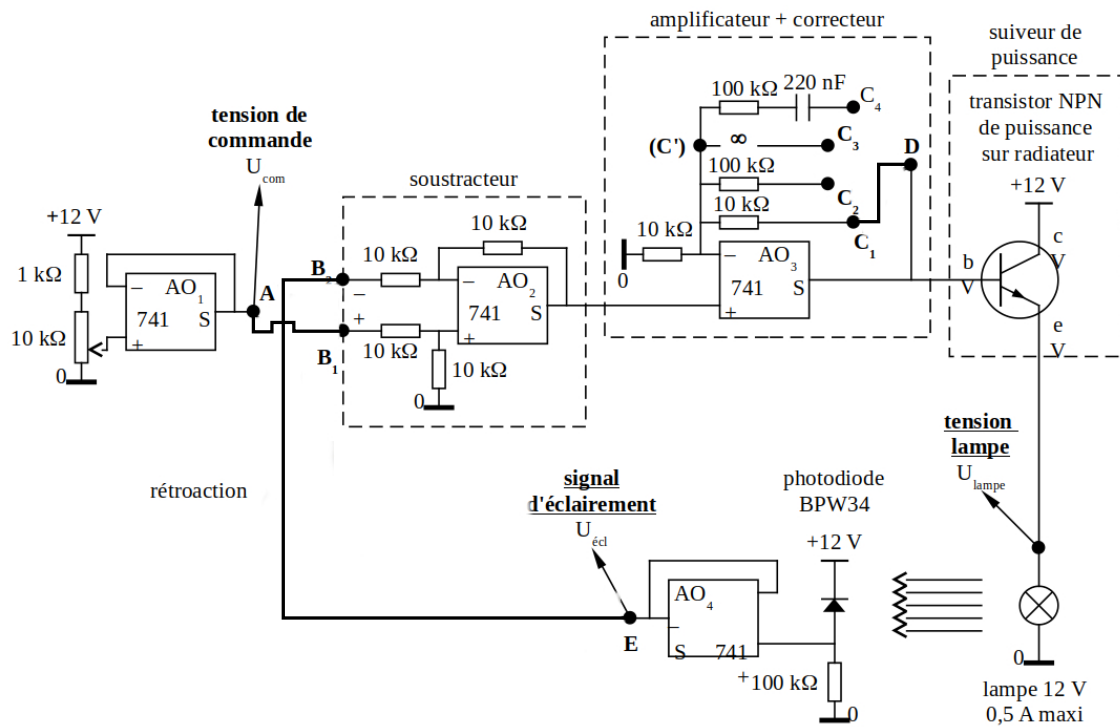


FIGURE 15 –

- Avec l'amplificateur opérationnel  $AO_3$  on réalise un amplificateur non inverseur dont le gain est croissant de  $C_1 \rightarrow D$  à  $C_3 \rightarrow D$ , la connexion  $C_4 \rightarrow D$  procurant une *correction intégrale*<sup>5</sup>. Cet amplificateur commande un *suiveur de puissance* déjà rencontré dans le TP «Transistor».

Pourquoi faut-il fermer la boucle de rétroaction en reliant E à  $B_2$  et non à  $B_1$  ? (Raisonnement en supposant que l'on masque partiellement la photodiode et, en suivant la boucle, voir le sens de variation du flux de la lampe).

Pourquoi faut-il alors mettre le signal de commande sur l'entrée non-inverseuse ? (Raisonnement en supposant que le gain de l'amplificateur correcteur tend vers l'infini, en déduire la relation qui lie idéalement  $U_{ecl}$  à  $U_{com}$ ).

## 4.2 Mise en œuvre

Opérer dans une relative obscurité.

Mesurer  $U_{lampe}$  et  $U_{ecl}$  avec des voltmètres continus et les visualiser avec un oscilloscope.

Afin d'être sûr que le régime de fonctionnement reste linéaire, il vaut mieux commencer les diverses expériences avec la distance maximum entre la lampe et la photodiode : on ajuste à chaque fois la tension de commande  $U_{com}$  de façon à ce que la tension  $U_{lampe}$  soit environ 10V<sup>6</sup>. Puis, sans changer  $U_{com}$  on rapproche la photodiode jusqu'à la butée et on étudie l'évolution de  $U_{ecl}$  et  $U_{lampe}$ .

### Étude en boucle ouverte

- Relier A-- $B_1$  ( $U_{com}$  sur l'entrée + du soustracteur) et relier  $C_1 \rightarrow D$  (gain le plus faible);
- Observer  $U_{ecl}$  et  $U_{lampe}$ ;
- Régler  $U_{com}$  pour avoir  $U_{lampe} \simeq 10V$ ;
- Rapprocher la photodiode et vérifier que son éclairement n'est pas régulé.

5. La connexion (C') est normalement inutilisée, elle peut servir à des expériences complémentaires.

6. Un peu inférieure à la tension d'alimentation de 12V afin de tenir compte de la saturation des AO et de la tension  $V_{BE}$  du transistor.

**Étude en boucle fermée** Relier E--B<sub>2</sub> ( $U_{ecl}$  sur l'entrée – du soustracteur) et relier à B<sub>1</sub> une alimentation continue réglable délivrant une tension inférieure à 10V voire un GBF délivrant une tension crête positive (et inférieure à 10V) pour observer les régimes transitoires.

- À faible gain : liaison C<sub>1</sub>--D  
Régler à nouveau  $U_{com}$ . Rapprocher la photodiode et remarquer que l'éclairement varie un peu moins que précédemment, l'interpréter en remarquant que  $U_{lampe}$  diminue un peu sous l'effet de la rétroaction.  
Voir ce qui se passe quand on permute les connexions B<sub>1</sub> et B<sub>2</sub>.  
Pour améliorer la régulation il faut augmenter le gain de boucle.
- Relier C<sub>2</sub>--D pour accroître le gain et procéder de la même façon.
- Relier C<sub>3</sub>--D pour pouvoir utiliser l'énorme gain de l'AO en boucle ouverte, et remarquer que la régulation est parfaite... mais que la tension  $U_{lampe}$  est oscillante : l'accroissement du gain de boucle a provoqué une réduction de la stabilité du système.  
Noter que dans le cas du système présent, cette instabilité est peu gênante car la lampe a un temps de réponse tel que les oscillations n'apparaissent pratiquement pas dans le flux lumineux. On peut remarquer que l'amplificateur opérationnel AO<sub>3</sub> fonctionne en comparateur, et ce mode de fonctionnement, très utilisé, est appelé «régulation en tout-ou-rien».
- Relier C<sub>4</sub>--D.  
On introduit ici une *correction intégrale* : le gain en continu est énorme à cause du condensateur (régulation statique parfaite), et le gain à la fréquence critique, qui correspond à un déphasage de  $-180^\circ$ , est le même qu'en C<sub>2</sub>--D (stabilité).  
La valeur choisie pour le condensateur correspond approximativement au régime transitoire qui minimise le temps de réponse.

**Note 1** La lampe a un comportement hautement non linéaire<sup>7</sup>. Ceci rend délicates certaines études quantitatives, en particulier au niveau du temps de réponse.

**Note 2** L'asservissement d'éclairement, de même que l'asservissement de vitesse d'un moteur sont des systèmes de classe 0 (le gain de boucle a un gain fini quand la fréquence tend vers 0), ils ont donc les mêmes propriétés que l'amplificateur suiveur étudié précédemment.

Par contre l'asservissement de position d'un moteur, de même que la boucle à verrouillage de phase, sont des systèmes de classe 1 (le gain de boucle a une pente de  $-20$  dB/déc quand la fréquence tend vers 0), ce qui leur confère des propriétés différentes<sup>8</sup>.

## 5 [AP] Étude d'un amplificateur suiveur

L'étude expérimentale quantitative d'un asservissement sur un système non-électronique est délicate, en particulier pour en étudier la stabilité. On propose ici l'étude d'un «amplificateur suiveur», qui permet de présenter la quasi totalité des principales propriétés d'un système asservi. A noter que ce système d'amplificateur suiveur possède les mêmes propriétés qu'un **asservissement de vitesse**.

Ce système suiveur est réalisé avec un amplificateur complexe dont les caractéristiques sont données dans les figures suivantes. Noter qu'un simple amplificateur opérationnel ne pourrait pas convenir pour cette expérience car il possède des **compensations en fréquence** (Cf. Delacressonnière p.21) qui éliminent les phénomènes que l'on veut mettre en évidence ici.

*Les expériences proposées dans la suite ont un intérêt pédagogique pour comprendre les notions sous-jacentes aux problèmes d'asservissement, ainsi que les corrections P, I et D. Cependant, les récents rapports de montage indiquent que l'utilisation de «boîtes noires» avec des défauts volontairement créés ne sont pas appréciés (ex. en 2011 : «Le monde moderne regorge de systèmes asservis évitant l'utilisation de « boîtes noires » présentant des*

7. À deux titres : relation tension-flux lumineux et variation de la résistance du filament avec sa température.

8. Cf. MANNEVILLE et ESQUIEU : *Systèmes bouclés linéaires de communication et de filtrage*, p. 57.

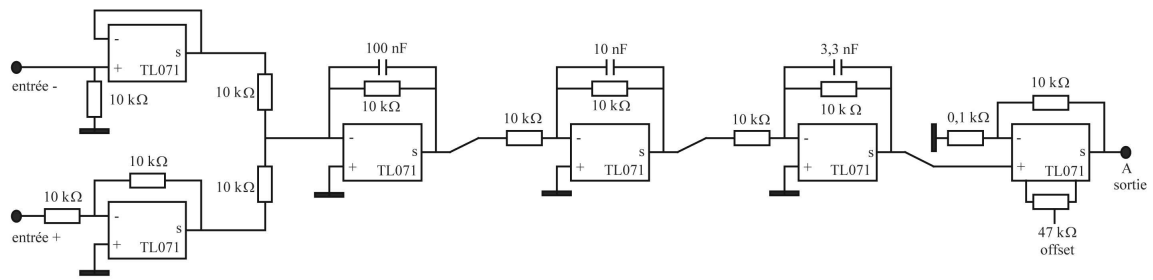


FIGURE 16 – Plan de l'amplificateur

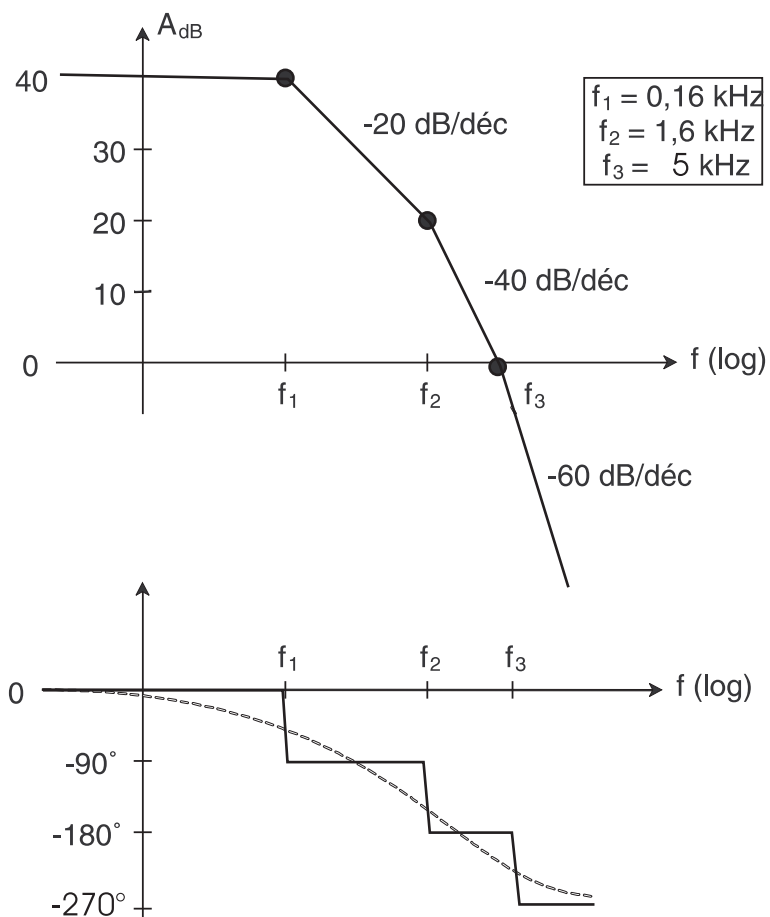


FIGURE 17 – Diagramme de Bode de l'amplificateur en boucle ouverte

défauts introduits exprès pour qu'on les corrige par asservissement.») Il conviendra donc d'en tenir compte dans l'élaboration du plan de vos montages.

### 5.1 Instabilité du système bouclé non corrigé

Alimenter l'amplificateur, relier sa sortie S à l'entrée – par un court-circuit (il n'est pas nécessaire de relier l'entrée + à la masse).

Constater qu'il oscille.

**Interprétation** Ouvrir la boucle, envoyer un signal sinusoïdal sur l'entrée + et tracer les diagrammes de Bode du système à l'ordinateur (attention à la saturation). Justifier l'instabilité en utilisant le CRITÈRE DE NYQUIST.

À défaut d'ordinateur, on pourra se contenter de mesurer :

- le gain et la phase à très basse fréquence,
- le gain correspondant à une phase de  $-180^\circ$ .

La suite des expériences s'effectue en boucle fermée.

### 5.2 Correction proportionnelle

**Élimination de l'instabilité** Pour rendre le système stable on incorpore dans le circuit un CORRECTEUR réalisé avec 2 résistances :

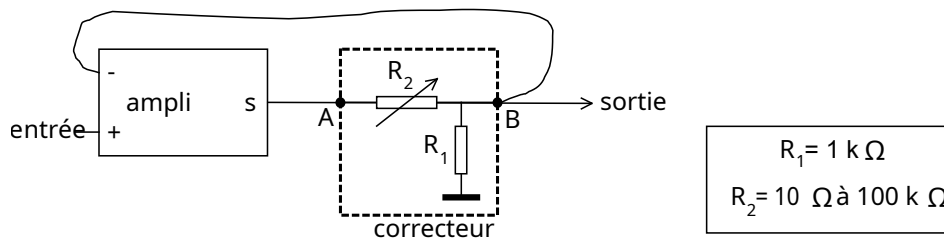


FIGURE 18 –

Ajuster  $R_2$  pour faire disparaître l'oscillation.

Interpréter qualitativement au moyen des diagrammes de Bode précédemment tracés.

**Ajustement de la réponse indicielle** La **réponse indicielle** s'obtient en appliquant à l'entrée du système bouclé un échelon de tension. Envoyer sur l'entrée + un signal carré de grande période<sup>9</sup> et faire croître l'atténuation du correcteur. Visualiser les divers régimes. Régler l'atténuation pour avoir le régime apériodique critique, c'est là que le signal de sortie ressemble le plus au signal d'entrée (ce qui est la finalité d'un suiveur!).

**Attention à la saturation** : observer le signal de sortie et, si une saturation apparaît, réduire le niveau du signal d'entrée. Faire systématiquement ce contrôle par la suite.

**Note** : On pourra mesurer la **marge de gain** en ouvrant la boucle, en mesurant en régime sinusoïdal le gain global (gain de boucle) lorsque la phase vaut  $-180^\circ$ . On admet que sa valeur doit être en pratique inférieure à  $-10\text{dB}$ . Est-ce le cas ici ?

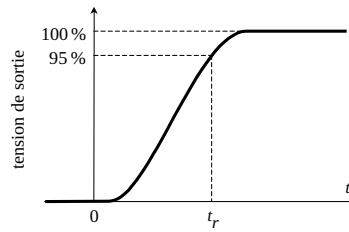


FIGURE 19 –

**Mesure du temps de réponse à 5%** Le temps de réponse à 5% se mesure en analysant la réponse indicielle du système bouclé. C'est le temps  $t_r$  nécessaire à partir du début de l'échelon, pour que la sortie atteigne 95% de sa valeur asymptotique.

Le mesurer avec soin, il servira de référence dans la suite.

La théorie indique qu'au régime critique,  $t_r \approx 1/f_2$  où  $f_2$  est la deuxième fréquence de changement de pente du diagramme de Bode en boucle ouverte (cf. annexe I).

**Étude de la précision** On remarque sur la réponse indicielle du système bouclé que, passé le régime transitoire, le signal de sortie est inférieur au signal d'entrée. Mesurer l'écart relatif  $\varepsilon$  entre les deux, appelé **erreur statique de position**.

**Interprétation** La théorie indique que  $\varepsilon = \frac{1}{1+BA(0\text{Hz})}$ , où  $A(0\text{Hz})$  est le gain linéaire en boucle ouverte de l'amplificateur à fréquence nulle (mesuré au paragraphe 1), et où  $B = \frac{R_1}{R_1+R_2}$  est la fonction de transfert du correcteur.

Toutes ces grandeurs étant connues, vérifier la relation précédente.

La suite indique comment améliorer la précision et la rapidité sans trop changer la stabilité<sup>10</sup>.

### 5.3 Correction proportionnelle et intégrale (PI)

Dans le correcteur, sans changer les valeurs de  $R_1$  et de  $R_2$ , ajouter un condensateur  $C_1 = 1\ \mu\text{F}$  en série avec  $R_1$ <sup>11</sup>.

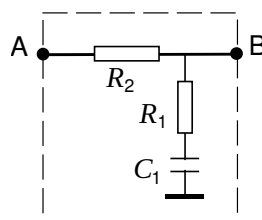


FIGURE 20 –

Observer l'effet sur la réponse indicielle.

**Interprétation** En basse fréquence le gain du correcteur vaut désormais  $B = 1$ , ce qui diminue l'erreur statique qui devient  $\varepsilon = \frac{1}{1+A(0\text{Hz})}$ . En haute fréquence  $B = \frac{R_1}{R_1+R_2}$  est inchangé donc la stabilité n'est pas modifiée. Pourquoi parle-t-on de correction intégrale ?

9. Par rapport à quelle grandeur physique ?

10. Rappelons que ces exigences sont en règle générale incompatibles.

11. Les schémas des correcteurs et les valeurs des capacités sont indiqués dans la notice de l'amplificateur.



## 5.4 Correction proportionnelle intégrale et dérivée (PID)

Ajouter un condensateur  $C_2 = 0,01 \mu\text{F}$  en parallèle sur  $R_2$  et diminuer  $R_2$  pour avoir une réponse indicielle au régime critique. Mesurer le temps de réponse  $t_r$ , le comparer à celui trouvé précédemment.

**Interprétation** Le condensateur  $C_2$ , qui accroît  $B$  à haute fréquence, élève la deuxième fréquence de coupure  $f_2$ . Le temps de réponse  $t_r = 1/f_2$  est donc amélioré.

Si on effectue le tracé expérimental du diagramme de Bode, il n'est pas facile d'y repérer la fréquence  $f_2$  car en pratique les variations de pente sont progressives. On s'en tire en observant la phase :  $-45^\circ$  à la fréquence  $f_1$  et  $-135^\circ$  à  $f_2$ <sup>12</sup>.

Il est fortement conseillé d'utiliser un diagramme de Bode pour expliquer !

---

12. Cette justification suppose  $f_1$ ,  $f_2$  et  $f_3$  suffisamment distinctes.