
Systèmes bouclés

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 ne pas passer plus de 2h sur la partie «Oscillateurs» durant la séance de TP.

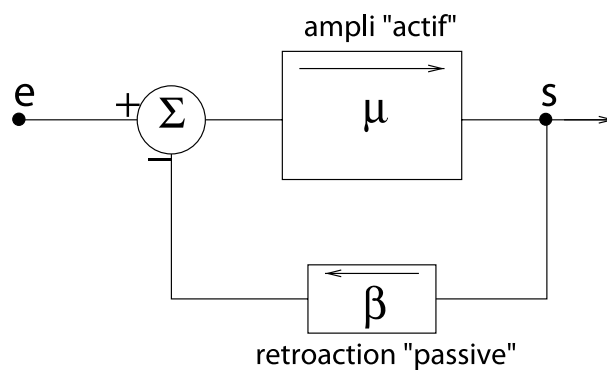
OSCILLATEURS

I) 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

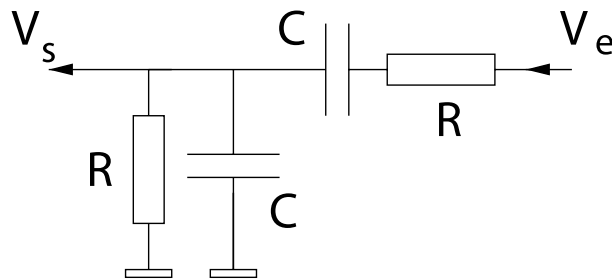
$$\mu'(\omega) = \frac{s}{e} = \frac{\mu(\omega)}{1 + \beta(\omega)\mu(\omega)}$$

doit être telle qu'il existe une fréquence ω_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 μ en fonction de l'amplitude de s (cf. Châtelain tome 2. p. 235).



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 qui constitue la boucle de rétroaction (voir figures ci-dessous).



a) Étude du filtre

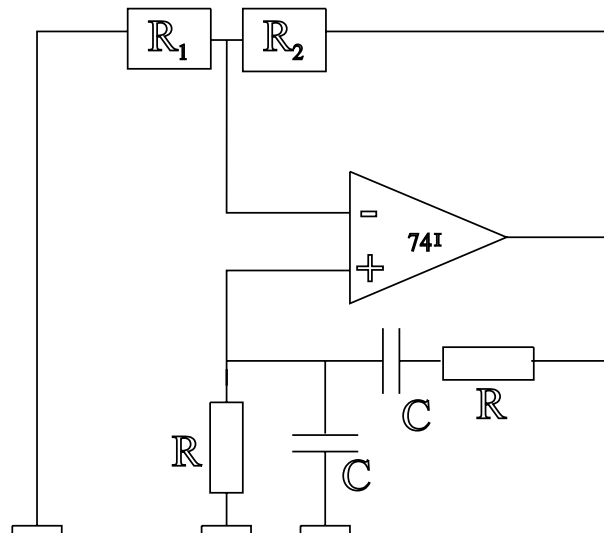
Il s'agit d'un filtre utilisant des résistances et condensateurs uniquement, dont on étudiera le gain et le déphasage en fonction de la fréquence.

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 $\Delta\omega$ définit par l'atténuation à -3dB), 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 ω_0 soit de l'ordre de 10^4 rad.s^{-1} .

b) 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 Ω .



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 ω_0 (en restant près du seuil).

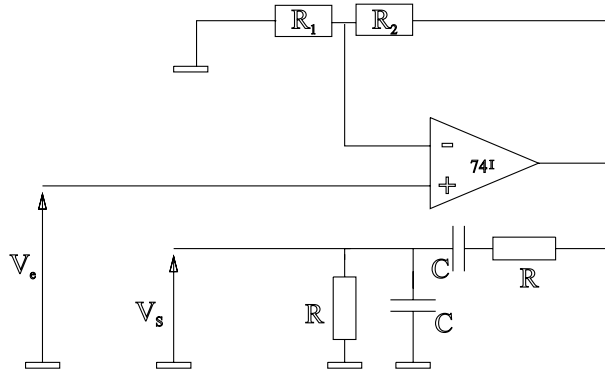
Que se passe-t-il quand on augmente le gain μ de l'amplificateur (forme, fréquence) ?

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 ?

c) Vérification du critère de Nyquist

Référence : – Auvray : Chap. 8

Ouvrir la boucle au niveau de l'entrée +, fournir à celle-ci un signal sinusoïdal V_e .

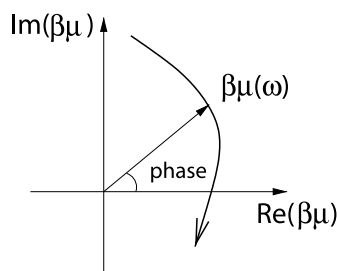


Observer à l'oscilloscope V_e et V_s . Ajuster le rapport R_2/R_1 et la fréquence pour que V_e et V_s aient même amplitude et même phase, ce qui correspond à la relation (justifier) :

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

Supprimer le GBF et refermer la boucle. 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 $e = 0$)

On peut aussi faire une vérification plus approfondie en traçant dans le plan complexe la courbe décrite par $\beta \mu$ lorsque ω varie. Pour cela utiliser un phasemètre et du papier polaire, ou une acquisition informatique.



Tracer la courbe pour trois valeurs de μ . 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.

d) 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 τ vérifie $\tau^{-1} = \omega_0 \alpha$ où $\alpha = 1 - \frac{R_2}{2R_1}$. Au seuil, le temps caractéristique diverge. On montre que lorsque le régime oscillant s'établit, la tension vérifie l'équation suivante :

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

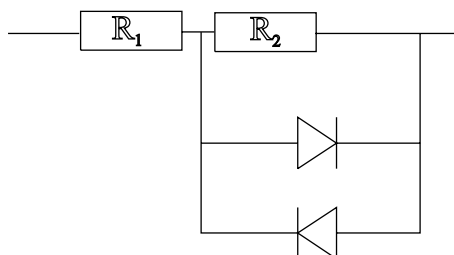
Réaliser un oscillateur à pont de Wien à ampli op sans diode. Ajouter aux bornes de la résistance R_2 l'interrupteur d'un relais. Envoyer sur la bobine de commande du relais un signal carré *de signe constant*, de longue période et d'amplitude suffisante. On peut vérifier que la tension croît exponentiellement. Qualitativement, comment varie le taux de croissance en fonction de R_2 ? Ajuster la courbe obtenue sur l'oscilloscope avec Igor ou Synchronie.

En déduire, pour plusieurs valeurs de R_2 , la valeur de τ en fonction de α . Se replacer juste au dessus du seuil d'oscillation, et placer cette fois l'interrupteur sur la résistance R_1 . Observer la décroissance exponentielle. Expliquer. En déduire pour plusieurs valeurs de R_1 le temps caractéristique τ . Tracer τ en fonction de α . Choisir de présenter celui des deux types de transitoires qui permet de déclencher l'oscilloscope de la façon la plus stable (pourquoi ?).

e) Stabilisation de l'amplitude (facultatif)

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»).

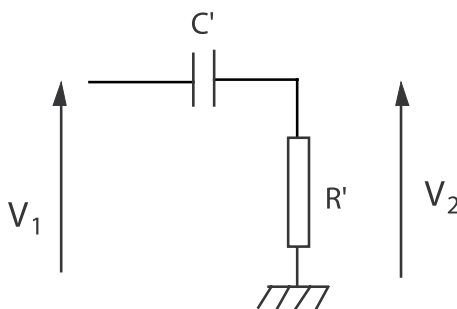
Référence : – Auvray : Électronique des signaux analogiques, chap. 8.



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

f) 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 $V_2 \ll V_1$).



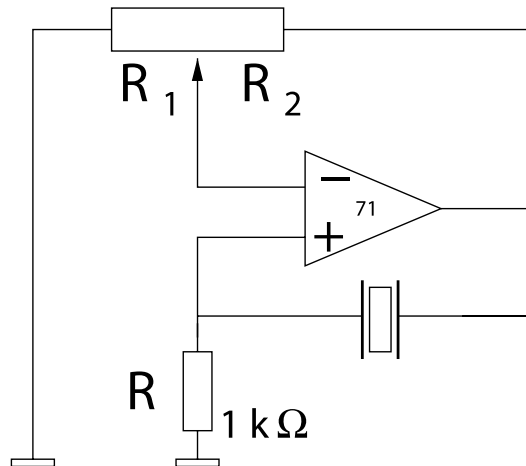
Il faut que C' et R' soient petits. En pratique prendre $C' = \frac{C}{10}$ et $R' = \frac{R}{10}$ et vérifier lors de la mise en œuvre que pour $V_2 \ll V_1$ le montage est bien un dérivateur. Utiliser l'oscilloscope en mode Lissajous avec la dérivée en ordonnée. On observe que tant que le régime est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

2) 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.



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'oscillateur¹. 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.

II) Oscillateurs à relaxation (facultatif)

1) Réalisation d'un circuit auto-oscillant

Dans les paragraphes a) et b) on réalisera séparément les éléments constitutifs de l'oscillateur monté au paragraphe c).

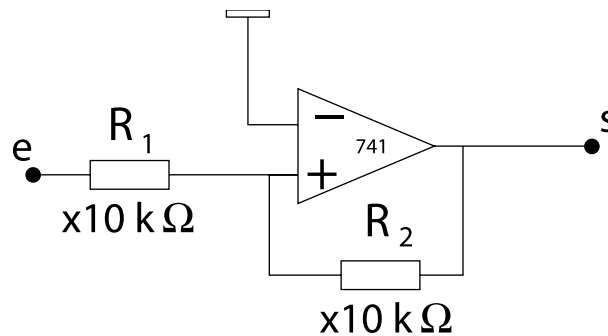
a) Comparateur à hystérésis

Référence : H-Prépa 2ème année Électronique I.

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.

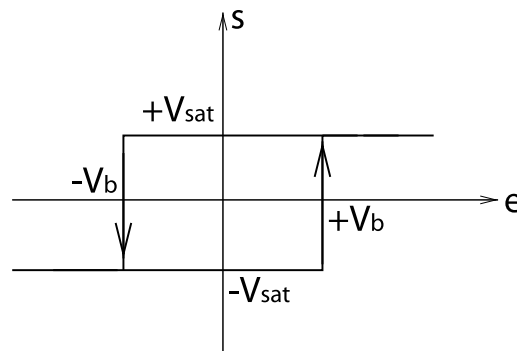
Trouver les conditions de basculement et montrer qu'on doit choisir $R_1 < R_2$ (car en pratique $|e| \ll |V_{\text{sat}}|$). Vérifier les valeurs prévues des tensions de basculement $e_{b\pm} = \pm R_1 V_{\text{sat}} / R_2$ et des paliers $\pm V_{\text{sat}}$ (on a fait ici l'hypothèse que les tensions de saturation sont symétriques ; si ce n'est pas le cas

¹De 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 Hz ?



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).



b) 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).

c) 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-triangular.

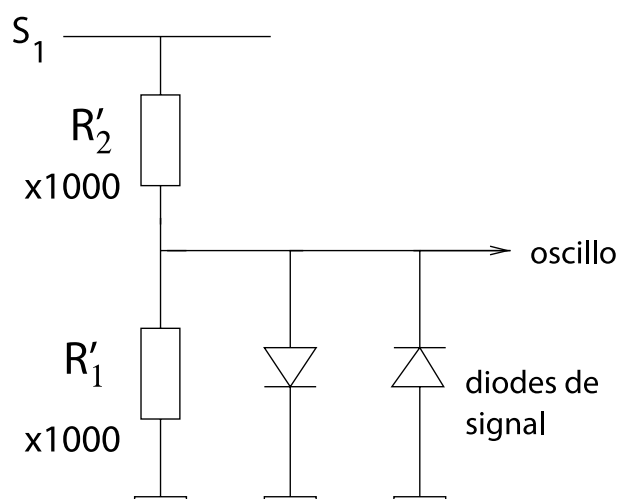
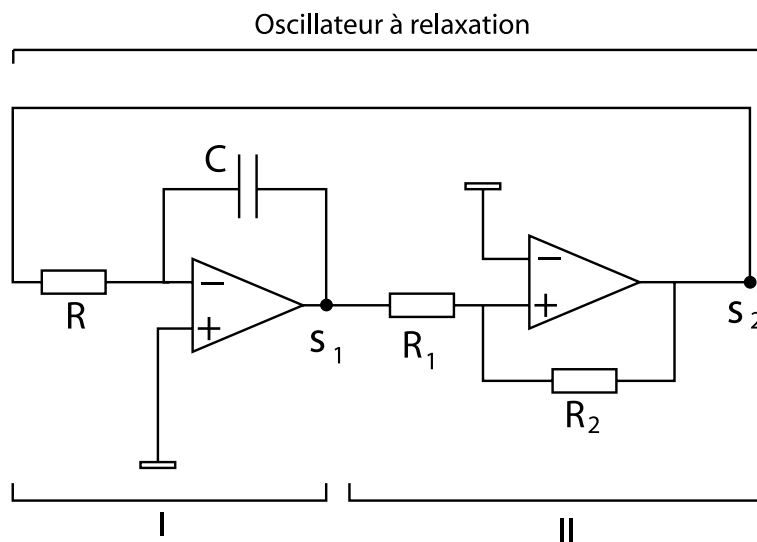
Assembler les deux blocs précédents :

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).

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 : Cinq dispositifs sont présentés ici :

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

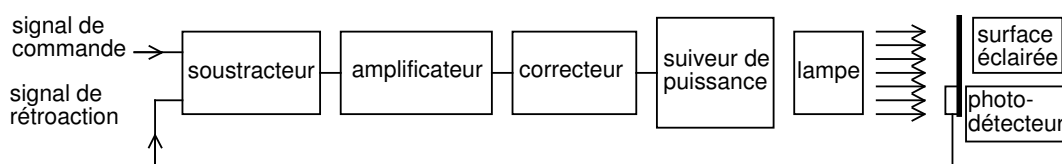
Tous n'ont pas les mêmes objectifs. Les asservissements en vitesse et en éclairement sont similaires et abordent les notions de précision et de correcteur PID. Le dispositif d'asservissement en température permet entre autre l'étude d'une régulation «tout-ou-rien». L'asservissement d'un moteur en position permet une étude complète d'un système régulé, avec les composants apparents. 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.

Chacun des quatre premiers dispositifs pourrait être présenté le jour J. Mais pour un TP de 4h comme pour l'épreuve de montage, il est irréaliste d'envisager de présenter les quatre. Durant la séance, il est essentiel d'aborder les notions de précisions et de stabilité ainsi que les différents types de correction, indépendamment du choix du dispositif. A noter que la boucle à verrouillage de phase est aussi un système asservi, qui sera abordé dans le TP «Télécommunications – Traitement du signal».

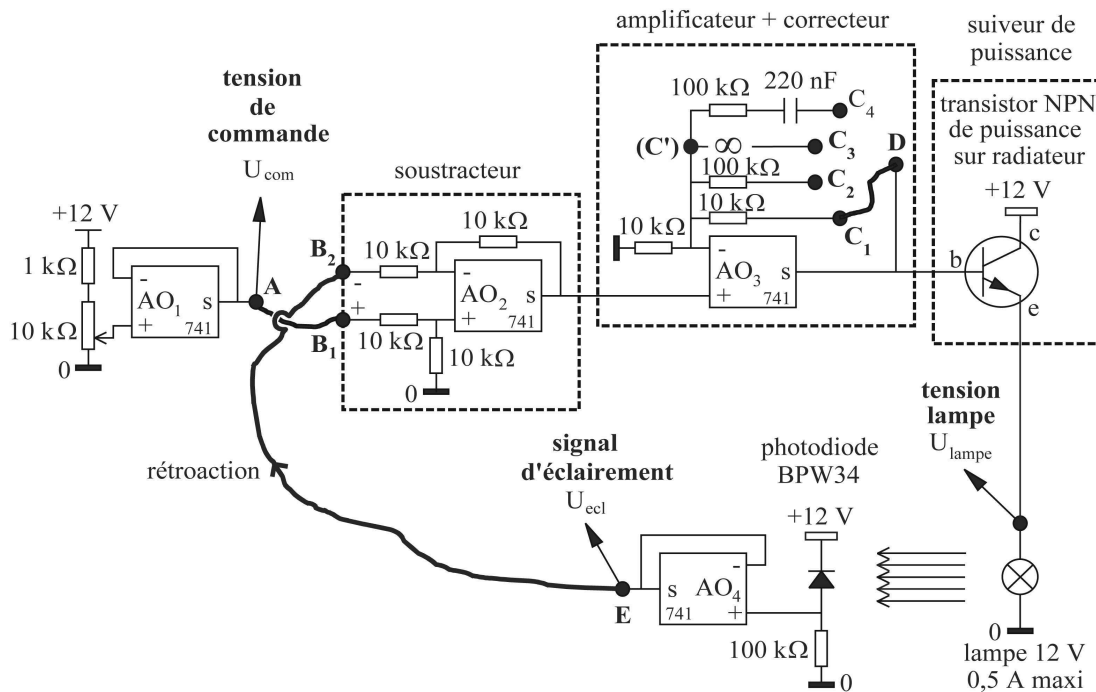
III) Régulation d'éclairage

1) Présentation de l'expérience

Le but est de maintenir constant l'éclairage d'une surface, la valeur de cet éclairage étant imposée par une tension de commande U_{com} . Pour tester l'efficacité de la régulation on modifiera la distance lampe-surface éclairée. Les propriétés du système sont les mêmes que celles qui ont été vues avec l'amplificateur suiveur, il s'agit donc d'appliquer les propriétés générales vues précédemment à un cas pratique. Le schéma ci-dessous représente les fonctions qui interviennent :



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



- L'amplificateur opérationnel AO_1 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_4 joue un rôle équivalent pour le signal d'éclairement ;
- Avec l'amplificateur opérationnel AO_2 , on réalise un *soustracteur* : $v_s = v_+ - v_-$;
- Avec l'amplificateur opérationnel AO_3 on réalise un amplificateur non inverseur dont le gain est croissant de C_1-D à C_3-D , la connexion C_4-D procurant une *correction intégrale*². 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}).

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

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

fois la tension de commande U_{com} de façon à ce que la tension U_{lampe} soit environ $10V^3$. Puis, sans changer U_{com} on rapproche la photodiode jusqu'à la butée et on étudie l'évolution de U_{ecl} et U_{lampe} .

a) Étude en boucle ouverte

- Relier A–B₁ (U_{com} sur l'entrée + du soustracteur) et relier C₁–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.

b) Étude en boucle fermée

Relier E–B₂ (U_{ecl} sur l'entrée – du soustracteur) ou relier à B₂ une alimentation continue réglable délivrant une tension inférieure à 10V voire un GBF délivrant une tension créneau positive (et inférieure à 10V) pour observer les régimes transitoires.

- À faible gain : liaison C₁–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 B₁ et B₂.
Pour améliorer la régulation il faut augmenter le gain de boucle (la *propriété de régulation* a les même caractéristiques que la *propriété de précision* vue lors de l'étude de l'amplificateur suiveur effectuée précédemment⁴).
- Relier C₂–D pour accroître le gain et procéder de la même façon.
- Relier C₃–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 (l'effet observé ici est le même que la correction proportionnelle étudiée avec l'amplificateur suiveur⁵).
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 AO₃ fonctionne en comparateur, et ce mode de fonctionnement, très utilisé, est appelé «régulation en tout-ou-rien».
- Relier C₄–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 C₂–D (stabilité).
La valeur choisie pour le condensateur correspond approximativement au régime transitoire qui minimise le temps de réponse.

³Un 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.

⁴Cf. H-PREPA *Électronique I*, seconde année p. 138 et 145. Voir aussi MANNEVILLE et ESQUIEU : *Systèmes bouclés linéaires de communication et de filtrage*, p. 23.

⁵Plus précisément, pour éliminer l'instabilité on réduisait le gain de boucle d'où une diminution de la précision. Ici pour améliorer la régulation on augmente le gain de boucle d'où une diminution de la stabilité.

Note 1 La lampe a un comportement hautement non linéaire⁶. 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 différentes⁷.

IV) Régulation de vitesse d'un moteur

Expérience réalisée sur une plaquette qui contient tous les composants. Elle ressemble totalement à l'expérience de régulation d'éclairement, le même protocole peut être suivi. Elle est toutefois plus visuelle car on perçoit plus nettement (à l'œil et au bruit) les variations de vitesse du moteur que d'intensité lumineuse de la lampe. Pour cela, il peut être intéressant de relier un GBF délivrant une tension crête à une fréquence ≈ 0.5 Hz à l'entrée B_2 et d'observer comment le moteur parvient à suivre plus ou moins la tension de commande en fonction du correcteur choisi. Observer aussi l'effet sur la rapidité de la réponse. Voir sa notice.

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.

V) Régulation de position d'un moteur

Expérience réalisée sur une plaquette qui contient tous les composants. Suivre la notice très détaillée pour comprendre le fonctionnement des différents éléments. A partir de la page 22, des expériences permettant de caractériser chacun d'entre eux y sont proposées. Puis, à partir de la page 34, l'asservissement en position du moteur est plus particulièrement étudié.

VI) Régulation en température

Nous disposons d'un ensemble de module permettant d'illustrer le principe d'une régulation en température. Il est constitué des éléments suivants :

- élément A : un boîtier contenant un bloc de cuivre, muni d'une thermistance, en contact avec une résistance chauffante et un module à effet Peltier,
- élément B : un pont de mesure de résistance avec amplification.
- élément C : une plaquette électronique permettant une régulation « tout-ou-rien »,
- élément D : une plaquette électronique de correction PID,
- élément E : une source de courant commandée en tension.

⁶À deux titres : relation tension-flux lumineux et variation de la résistance du filament avec sa température.

⁷Cf. MANNEVILLE et ESQUIEU : *Systèmes bouclés linéaires de communication et de filtrage*, p. 57.

1) Boîtier étudié

Le boîtier (élément A) contient un bloc de cuivre, muni d'une thermistance, en contact avec une résistance chauffante et un module à effet Peltier, lui-même en contact avec un bloc en métal, servant de support et permettant également la dissipation thermique du flux de chaleur du module Peltier. De la pâte thermique permet d'assurer un bon contact thermique entre le bloc de métal support, le module Peltier, le bloc de cuivre étudié et la résistance chauffante.

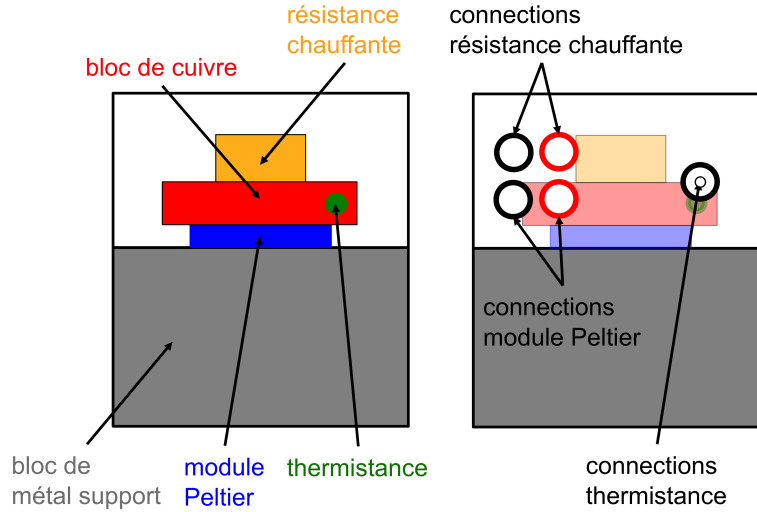


FIG. 1 – Système étudié, un bloc de cuivre dont la température peut être modifiée à l'aide d'un module Peltier. Le module Peltier doit recevoir un courant inférieur à 3A. Suivant le sens du courant, il refroidit ou chauffe le bloc de cuivre. Une thermistance est insérée dans le bloc de cuivre pour mesurer sa résistance. Une résistance chauffante permet de simuler une perturbation extérieure.

Une thermistance permet de mesurer la température du bloc de cuivre, cette dernière a été préalablement calibrée (voir la notice).

2) Mesure de la température

L'élément B est un pont de mesure de résistance, suivi d'un amplificateur différentiel.

La tension de sortie V_S est proportionnelle à la différence entre la résistance de consigne R_c (constitué d'une résistance extérieure à connecter, avec par exemple une boîte à décade) et la résistance de la thermistance R_{th} . Les résistances $R_m = 10k\Omega$ sont identiques et permettent de former le pont. Plus exactement, la tension de sortie vaut

$$V_S = U \frac{R_m(R_c - R_{th})}{(R_m + R_c)(R_m + R_{th})} \left(1 + 2 \frac{R}{R_g} \right)$$

Il est ainsi possible de changer la valeur du gain en changeant la valeur de la résistance R_g .

Ce boîtier permet ainsi de convertir la différence de température par rapport à la consigne en une tension, formant ainsi un *signal d'erreur*.

3) Manipulation préalable

Mesurer préalablement la thermistance du bloc de cuivre à l'aide d'un multimètre. Connecter la thermistance de mesure du boîtier au pont de mesure (résistance R_{th}) et connecter une résistance à

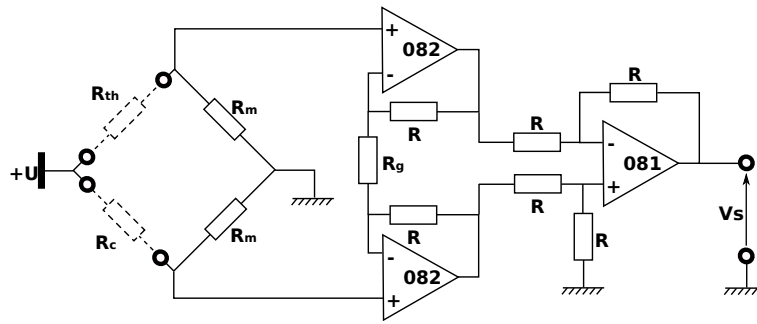


FIG. 2 – Pont de mesure de la thermistance, suivi d'un amplificateur différentiel. Une résistance à décade doit être connectée à R_c et sera une « consigne ». Elle sera comparée à la résistance thermique connectée en R_{th} . Les résistances $R_c = 10\text{ k}\Omega$ sont des résistances de précision permettant de former un pont de mesure. Ce pont est suivi d'un amplificateur différentiel ($R = 10\text{ k}\Omega$) dont le gain est réglable grâce à la résistance R_g , qui est constituée d'un sélectionneur discret entre les valeurs de $100\text{ }\Omega$, $1\text{ k}\Omega$, $10\text{ k}\Omega$ et $100\text{ k}\Omega$, correspondant à un gain respectivement de 201, 21, 3, 1.2.

décades aux bornes de la résistance de consigne du pont (résistance R_c). On choisira une valeur de résistance proche de la valeur de la thermistance à température ambiante. En changeant la valeur de la résistance de consigne, vérifier qualitativement au multimètre que la tension du pont évolue bien comme attendu.

Connecter désormais une source de courant pouvant débiter quelques ampères au module Peltier du boîtier. En appliquant un courant au module Peltier, observer l'évolution de la température (*i.e.* la tension issue du pont) en fonction du signe du courant injecté dans le module Peltier. En déduire quelle polarité choisir au niveau du module Peltier pour avoir un asservissement en température.

4) Exemple de régulation : cas du «tout-ou-rien»

a) Motivation

Dans de nombreuses applications de régulation, la précision n'est pas critique. Les exemples de la vie courante sont nombreux : thermostat d'un ballon d'eau chaude, plaque électrique, four électrique, réfrigérateur, etc ... Dans ces cas là, la technique de régulation la plus simple (et la moins coûteuse) consiste à fixer un seuil de valeur déclenchant un système de chauffage ou de refroidissement. Ainsi, par exemple, dès que la température d'un réfrigérateur atteint une valeur critique, le circuit de refroidissement se met en marche et diminue la température.

Le but de cette section est donc d'illustrer ce type de régulation que l'on appelle «tout-ou-rien» : en dessous ou au dessus du seuil on ne fait rien.

b) Interrupteur commandé par un comparateur à hystérésis

L'élément C est constitué d'un comparateur à hystérésis, dont les tensions de basculement sont $\pm V_{sat} R_2 / (R_1 + R_2)$. Le signal de sortie du comparateur commande un relais (*i.e.* un interrupteur commandé). Ce relais permet de connecter ou non une alimentation de courant extérieure (suivant la valeur de la tension de sortie du comparateur), **avec un courant maximal de 3A**.

On pourra ainsi connecter en entrée la tension d'erreur entre la consigne de température et la

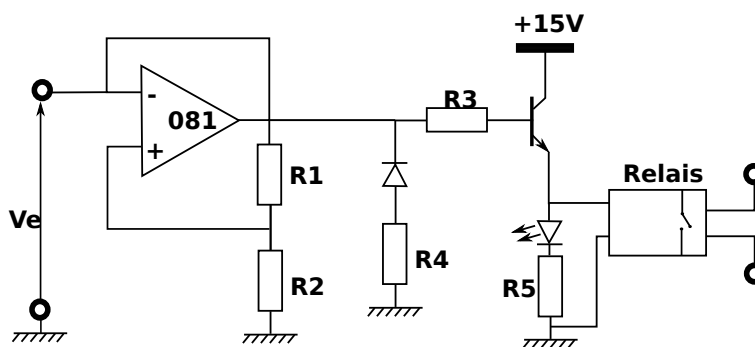


FIG. 3 – Comparateur à hystérésis commandant un relais. Les valeurs des composants sont les suivantes : R_1 est une résistance à décade de valeur comprise entre $100\ \Omega$ et $1\ \text{k}\Omega$, $R_2 = 5\ \text{k}\Omega$, $R_3 = 1\ \text{k}\Omega$, $R_4 = 1\ \text{k}\Omega$ et $R_5 = 500\ \Omega$. La valeur de R_1 permet de choisir l'amplitude de l'hystérésis, c'est-à-dire la valeur des tensions de basculement $\pm V_{sat} R_2 / (R_1 + R_2)$.

température réelle, permettant de corriger l'erreur avec l'actionnement du module Peltier. On fonctionnera uniquement en chauffage, ou bien uniquement en refroidissement.

c) Manipulation

Le pont (élément B) permet de mesurer la thermistance R_{th} , comme décrit dans la partie précédente, et donc la température du bloc, en la comparant à une résistance de consigne R_c . Le plus simple consiste à travailler en refroidissement, **et d'imposer une consigne d'environ $20\ \text{k}\Omega$** . Ainsi, on simule la régulation en température d'un réfrigérateur par exemple. La tension de sortie du pont est appliquée à l'entrée du module de régulation «tout-ou-rien» (élément C). En choisissant convenablement R_1 , on définit l'amplitude du cycle d'hystérésis. Le relais est connecté en série à une alimentation en courant délivrant quelques ampères, permettant ainsi d'alimenter ou non le module Peltier. **ATTENTION : ON NE DÉPASSERA PAS LA VALEUR DE 3A DANS L'INTERRUPTEUR COMMANDE !** Pour refroidir le bloc de cuivre, **le courant devra être négatif**, c'est-à-dire que la borne – de l'alimentation est connectée à la borne rouge du module Peltier.

Protocole :

- connecter la thermistance du boîtier (élément A) aux bornes R_{th} du pont (élément B), et choisir un gain maximal ($R_g = 100\ \Omega$) ;
- connecter une résistance à décade aux bornes R_c du pont (élément B) et la régler sur une valeur de consigne adéquat (typiquement $20\ \text{k}\Omega$) ;
- connecter la sortie du pont (élément B) à l'entrée du module «tout-ou-rien» (élément C), avec une résistance R_1 de $10\ \text{k}\Omega$ à $100\ \text{k}\Omega$ typiquement ;
- connecter **EN SÉRIE** une alimentation de courant ($<3\text{A}$), l'interrupteur de sortie du module «tout-ou-rien» (élément C) et le module Peltier du boîtier (élément A) ;
- choisir le signe du courant afin de travailler en refroidissement ou en chauffage.

On pourra mesurer la tension V_S à l'oscilloscope pour visualiser l'évolution de l'écart à la consigne, ainsi que la tension à la sortie du comparateur à hystérésis.⁸

⁸Si la tension V_S sature à une valeur constante, on peut : a) vérifier le sens des connections du Peltier b) augmenter I (la valeur typique minimale est de 1-2 A), en veillant à ne pas dépasser 3 A c) augmenter R_g , que l'on pourra diminuer à nouveau lorsque les autres paramètres auront été optimisés.

Mesurer l'amplitude du cycle d'hystérésis en fonction de R_1 . Comment choisir R_1 pour avoir les fluctuations de température les plus faibles possibles ? A quoi est dû le retard entre la tension aux bornes du relais et V_s ? Comment est liée la période des oscillations en température avec l'amplitude du cycle ? Comment varie la période des oscillations avec I ? Évaluer l'ordre de grandeur de l'écart de température pendant un cycle.

En pratique, le cycle est plutôt choisi de manière à avoir une période d'oscillation longue pour limiter l'usure des actionneurs (interrupteurs commandés), mais en même temps une amplitude d'oscillation acceptable suivant l'application considérée.

5) Régulation PID

a) Motivation

Si de nombreuses applications de la vie courante permettent de se contenter d'une simple régulation tout-ou-rien, d'autres nécessitent une régulation en température bien plus précise : température d'une diode laser, température d'un milieu réactionnel, ... Dès lors, il convient de passer à une rétroaction type PID pour asservir correctement la température.

b) Chaîne de retour PID

On appelle élément D un quadripôle permettant de réaliser la fonction de transfert suivante

$$H(\omega) = K \left(1 + \frac{1}{j\omega T_i} + j\omega T_d \right),$$

avec $K = R_p/R$, $T_i = R_i C_i$ et $T_d = R_d C_d$. Cela permet donc de réaliser une correction P (via K), I (via T_i) et D (via T_d).

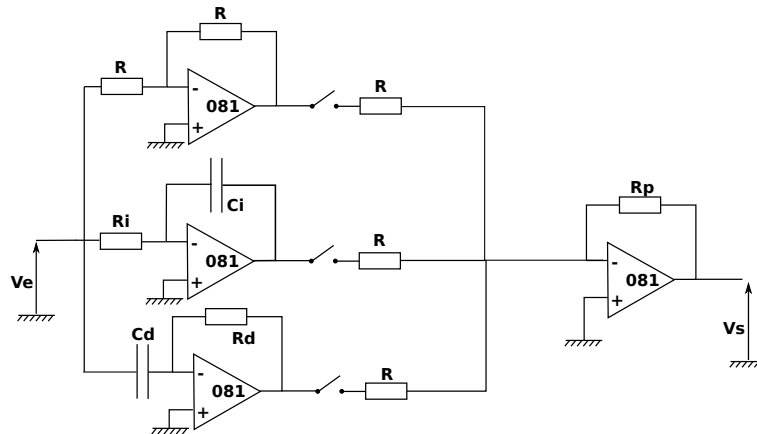


FIG. 4 – Schéma général du boîtier de correction PID. Les valeurs de R_i , C_i et R_d , C_d permettent de régler les temps caractéristiques des corrections respectivement intégrales et différentielles. La valeur de R_p permet de régler le gain proportionnel (R_p/R avec $R = 10 \text{ k}\Omega$). Les différents interrupteurs permettent d'utiliser ou non les différents types de correction.

Les différents interrupteurs permettent de connecter ou non les différentes corrections P, I et D. Les résistances R_p , R_d et R_i sont connectées avec des câbles bananes. On pourra éventuellement utiliser des résistances à décades pour faire varier les différents paramètres. La capacité C_i peut être choisie

directement sur la plaquette en connectant des câbles bananes à une capacité de 22nF ou 2.2 μ F. Il est également possible de connecter une autre valeur avec une capacité extérieure. La capacité C_d peut être choisie directement sur la plaquette en connectant des câbles bananes à une capacité de 220nF ou 10 μ F. Il est également possible de connecter une autre valeur avec une capacité extérieure.

c) Source de courant commandée en tension

On appelle élément E une alimentation en courant proportionnel à la tension appliquée en entrée, comprise entre -10V et +10V, selon $I = gV$, avec $g = 0.1\text{A/V}$. Le courant de sortie maximal est de 1A. Cette source commandée permet donc de refroidir ou chauffer le bloc de cuivre.

d) Manipulation

On reprend le montage de la régulation tout-ou-rien, en remplaçant le module de comparaison à hystérésis par le module de correction PID (élément D), et en remplaçant la source de courant extérieur par la source de courant bipolaire commandée en tension (élément E). Le boîtier PID permet de choisir librement le type de correction voulue en utilisant les interrupteurs. La sortie corrigée du PID commande une alimentation de courant commandée en tension (élément E), elle-même alimentant le module Peltier du boîtier (élément A).

Protocole :

- connecter la thermistance du boîtier (élément A) aux bornes R_{th} du pont (élément B) ;
- connecter une résistance à décade aux bornes R_c du pont (élément B) et la régler sur une valeur de consigne (typiquement 11k Ω) ;
- connecter la sortie du pont (élément B) à l'entrée du module PID (élément D) ;
- connecter la sortie du module PID (élément D) à l'entrée de la source de courant commandée (élément E) ;
- connecter la sortie de la source commandée au module Peltier du boîtier (élément A), la masse de la sortie étant connectée ;
- si la température diminue ou augmente sans osciller, inverser le sens des connections sur le module Peltier.

On mesurera la tension V_S à l'oscilloscope pour visualiser l'évolution de l'écart à la consigne.

Dans un premier temps, on pourra ne connecter que la correction proportionnelle avec une boîte AOIP de résistance $\times 10\text{k}\Omega$. Montrer que si le gain est trop important, le système oscille. Diminuer le gain afin de le stabiliser.

Si la température de consigne est suffisamment basse, observer l'erreur statique, c'est-à-dire le signal d'erreur non nul en régime établi (non-oscillant). Évaluer l'ordre de grandeur de l'écart de température correspondant. Connecter la correction intégrale avec une capacité de 10 μ F et une boîte AOIP de résistance $\times 100\text{k}\Omega$. Montrer ainsi l'effet de la correction intégrale sur la précision. Comment choisir la valeur de T_i ?

Enfin, la correction dérivée permet en théorie d'optimiser la rapidité. Cependant, dans le cas considéré, les échelles de temps en jeu sont lentes, et l'effet d'une correction D est minime. On se contentera en pratique d'une correction PI qui suffit amplement dans la plupart des applications.

VII) Annexe : 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.

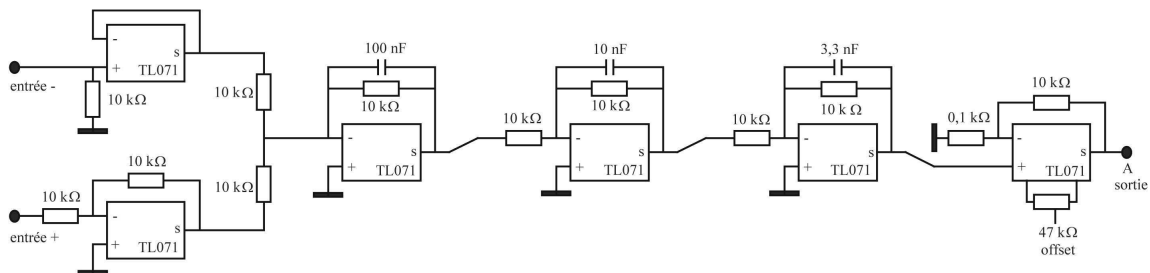


FIG. 5 – Plan de l'amplificateur

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 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.

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° .

La suite des expériences s'effectue en boucle fermée.

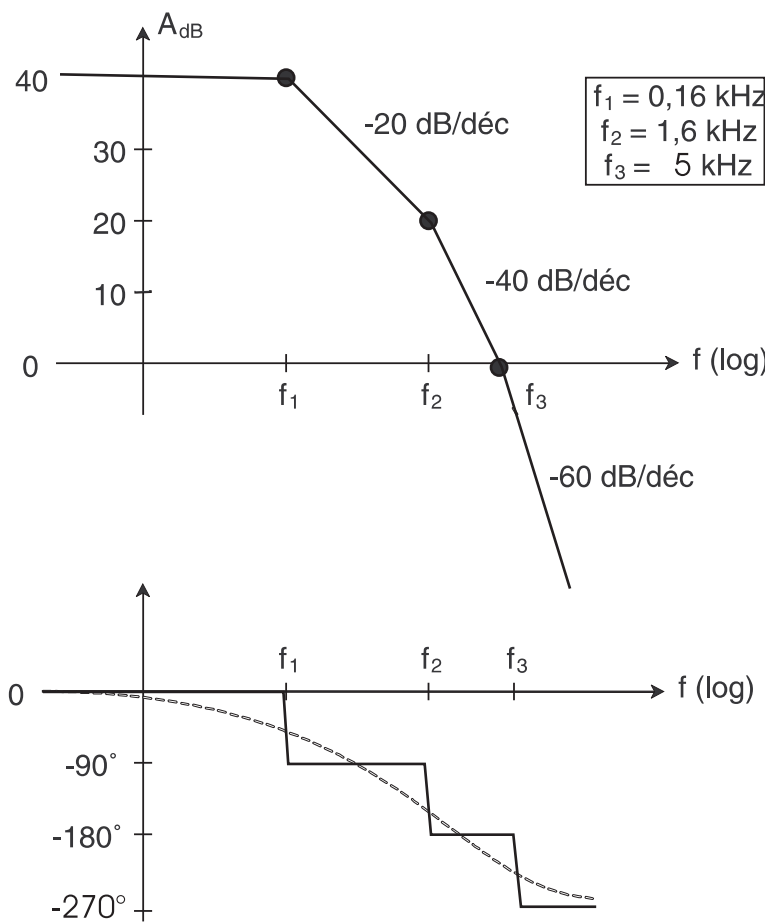
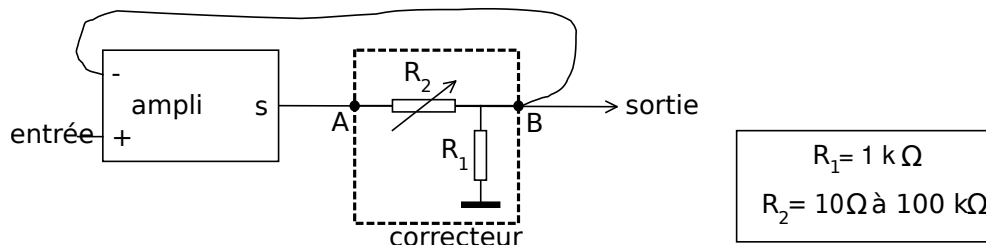


FIG. 6 – Diagramme de Bode de l'amplificateur en boucle ouverte

2) Correction proportionnelle

a) Élimination de l'instabilité

Pour rendre le système stable on incorpore dans le circuit un CORRECTEUR réalisé avec 2 résistances :



Ajuster R_2 pour faire disparaître l'oscillation.

Interpréter qualitativement au moyen des diagrammes de Bode précédemment tracés.

b) Ajustement de la réponse indicielle

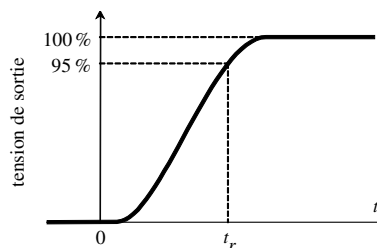
La **réponse indicielle** s'obtient en appliquant à l'entrée du système bouclé un échelon de tension. Envoyer sur l'entrée + un signal carré de grande période⁹ et faire croître l'atténuation du correcteur. Visualiser les divers régimes. Régler l'atténuation pour avoir le régime apériodique critique, 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° . On admet que sa valeur doit être en pratique inférieure à -10 dB . Est-ce le cas ici ?

c) 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).

⁹Par rapport à quelle grandeur physique ?

d) 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 ε entre les deux, appelé **erreur statique de position**.

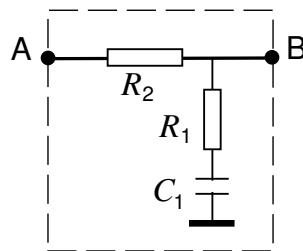
Interprétation La théorie indique que $\varepsilon = \frac{1}{1+BA(0\text{Hz})}$, où $A(0\text{Hz})$ est le gain linéaire en boucle ouverte de l'amplificateur à fréquence nulle (mesuré au paragraphe 1), et où $B = \frac{R_1}{R_1+R_2}$ est la fonction de transfert du correcteur.

Toutes ces grandeurs étant connues, vérifier la relation précédente.

La suite indique comment améliorer la précision et la rapidité sans trop changer la stabilité¹⁰.

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 ¹¹.



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 ?

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° à la fréquence f_1 et -135° à f_2 ¹².

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

¹⁰Rappelons que ces exigences sont en règle générale incompatibles.

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

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