LP22 - Rétroaction et oscillations

Cléments (de la Salle + Colléaux)

9 juin 2020

Niveau : L2

Bibliographie

✍ *Précis Bréal Électronique PSI*, **Brenders**	→	La base
✍ *Hprépa Électronique I*, **Brébec**	→	Attention pas juste "Electronique" ! Il est vert et contient 2 fois plus d'info que le "Electronique"
✍ *Automatique - 3e édition*, **Granjon**	→	assez beaucoup stylé
✍ *Automatique des systèmes mécaniques*, **Le Gallo**	→	assez beaucoup stylé
✍ *J'intègre Physique tout-en-un PSI*, **Sanz**	→	Pas trop mal pour remplacer le Brenders

Prérequis

- ➢ Fonction de transfert de l'AO
- ➢ Réponse d'un système d'ordre 2

Expériences

☕

Table des matières

Introduction

"Le monde des systèmes bouclés se divise en deux catégories : ceux qui rétroactionnent et ceux qui oscillent... Toi t'oscilles" Le pont (de Wien), la BRUTE (Boucle de RetoUr parfaiTE) et le truand (Hervé <3)

1 Stabilité

1.1 Structure et fonction de transfert

✍ *Brenders p.194*

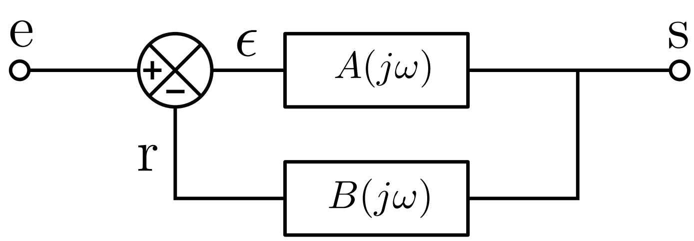

Figure 1.1 – Schéma d'un système asservit linéaire

Déjà on qualifie le système de **linéaire** parce que chaque composant que l'on étudie peut se modéliser par une fonction de transfert $A(j\omega)$ et $B(j\omega)$. On pourrait faire en Laplace mais bon, si y a pas besoin épargons-nous les questions reloues.

Le système est dit **bouclé** car il est constitué :

— D'une chaîne direct $A(j\omega)$

— D'une chaîne de retour $B(j\omega)$

Il y a deux façons de boucler le système et celle qui nous intéresse en première partie est la rétroaction négative. On utilise un comparateur qui soustrait à la valeur de consigne e l'image r de la sortie s par la boucle de retour.

L'idée est que si la sortie augmente pour une raison ou pour une autre, la grandeur retranchée sera plus importante et donc la sortie va diminuer. De même si s diminue, la rétro-action conduira à une augmentation de s. On comprend qu'un tel système va réguler la sortie, c'est pourquoi on parle d'**asservissement**.

À la différence des oscillateurs (étudiés en deuxième partie), ces système sont **stables** au sens qu'ils convergent toujours vers une valeur de consigne. En particulier si cette consigne est nulle, la sortie tendra vers zéro.

Cherchons à exprimer la fonction de transfert de ce système :

En boucle ouverte C'est-à-dire la fonction de transfert sans consigne $e = 0$ ni sortie $s = 0$

$$H_{BO}(j\omega) = \frac{r(j\omega)}{\epsilon(j\omega)} = A(j\omega)B(j\omega)$$

En boucle fermée C'est la fonction de transfert globale (flemme de continuer avec les $j\omega$)

$$s = A(e - Bs) \implies H = \frac{s}{e} = \frac{A}{1+AB} = \frac{A}{1+H_{BO}}$$

1.2 Exemple de l'amplificateur non-inverseur

✍ *Brenders p.208*
✍ *J'intègre p.46 + 49 + 54 + 58*

On concrétise un peu cette notion à l'aide d'un montage électrique simple. Ce sera l'occasion de discuter du produit gain / bande passante, une particularité propre à ce montage (ou tous les système bouclés à chaîne directe du premier ordre et chaîne de retour réelle).

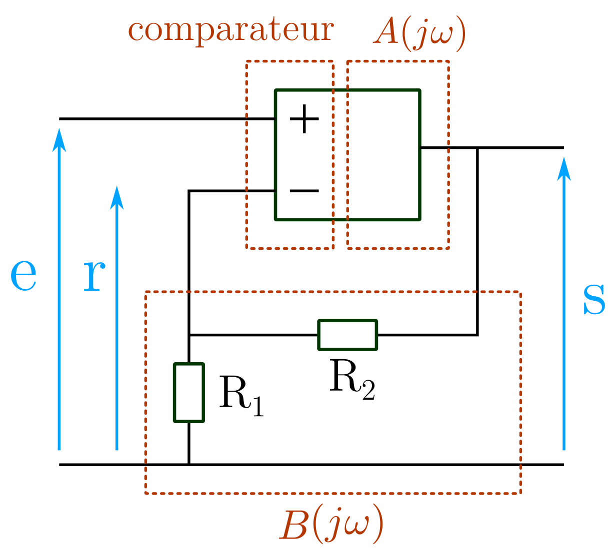

FIGURE 1.2 – Schéma du montage... L'ampli OP joue à la fois le rôle de comparateur et de chaîne direct !

Rappel

L'AO fonctionne comme un amplificateur / filtre passe-bas :

$$A(j\omega) = \frac{H_{AO}}{1 + j\frac{\omega}{\omega_{AO}}}$$

On a typiquement un gain statique $H_{AO} = 2 \cdot 10^5$ et $\omega_0 = 50\,\mathrm{rad \cdot s^{-1}}$ ie $f_0 = 8\,\mathrm{Hz}$

On peut alors caluler la fonction de transfert de la boucle retour (en supposant qu'aucun courant n'entre par la borne -) :

$$B = \frac{r}{s} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

On calcule alors assez simplement (faire le caclul en entier et sans regarder les notes ça donne des points de style !) :

$$\boxed{H = \frac{H_0}{1 + j\frac{\omega}{\omega_0}}}$$

Avec

$$H_0 = \frac{H_{AO}}{1 + \frac{H_{AO}R_1}{R_1+R_2}} \qquad \text{et} \qquad \omega_0 = \omega_{AO}\left(1 + \frac{H_{AO}R_1}{R_1 + R_2}\right)$$

Bon bah on retrouve un filtre passe-bas quoi... Mais alors quel intérêt ? Calculons les nouvelles valeurs d'amplification et de coupure. Remarquons que les formules font appraître toutes deux

$$\frac{H_{AO}R_1}{R_1+R_2} = \frac{H_{AO}}{1+\frac{R_2}{R_1}}$$

Donc à moins que $R_2/R_1 \sim 10^5$, ce rapport est dans la plupart des cas très élevé... Ainsi on a

$$\begin{cases} H_0 \sim 1 + \dfrac{R_2}{R_1} \\ \omega_0 \sim \omega_{AO}\dfrac{H_{AO}R_1}{R_1+R_2} \end{cases} \implies \omega_0 H_0 = \omega_{AO}H_{AO}$$

Donc le gain statique devient directement lié au rapport $\frac{R_2}{R_1}$ (il diminue) mais la bande passante, elle devient bien plus grande. Pour $\frac{R_2}{R_1} = 100$, on a par exemple $\omega_0 \sim 9.9 \cdot 10^4\,\mathrm{rad \cdot s^{-1}}$ soit $f_0 = 16\,\mathrm{kHz}$. De manière générale, le produit gain - bande passante est conservé !

La rétroaction a permis d'augmenter très nettement la bande passante de l'AO, mais au détriment de l'amplification

On se sert donc de ce montage pour amplifier des signaux de fréquence supérieure à 8 Hz.

Python

Faire un petit programme pour voir l'évolution du diagramme de Bode. L'idée est de montrer l'influence de la rétroaction. Pas dur mais sympatoche.

1.3 Réponse dynamique

✍ *Brenders p.210 + Duffait p.340*

Si la stabilité est la caractéristique principale checherchée par ce type de montage (comme évoqué en première sous-partie), il est également important d'étudier la dynamique du régime transitoire.

Par exemple en reprenant l'exemple de l'amplificateur non-inverseur (système d'ordre 1), le temps de réponse à 5% est $\tau_0 = 3/\omega_0$, donc l'ajout de boucle de retour a pour conséquence d'**augmenter la rapidité du système**.

Mais on peut aussi utiliser des système d'ordre 2 (pourquoi ? contrainte ?) et on a vu que suivant la valeur des paramètres, il existait plusieurs régimes :

— Régime amorti

— Régime critique

— Régime pseudo périodique

Le dernier est plus rapide mais alors faut faire gaffe, blablabla ça dépasse, sur l'autoroute je veux aller de 80 à 100, sans me taper une pointe à 150 ! En fonction de ce qu'on veut, il faut trouver le bon compromis.

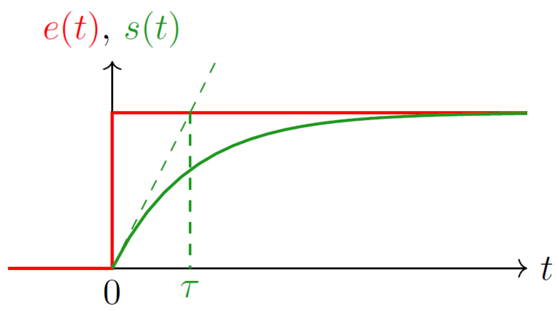

Figure 1.3 – Régime amorti, le temps τ caractérise le temps de montée (Léo)

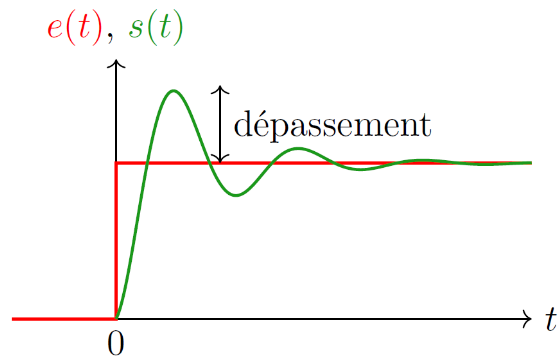

Figure 1.4 – Régime pseudo-périodique, si la réponse monte trop vite, on a dépassement (Léo)

✍ *Duffait* parle dans ce cas d'un composant à ajouter à la chaîne directe, de la forme

$$C(j\omega) = \frac{1 + j\omega\tau_1}{1 + j\omega\tau_2}$$

Qui ne va avoir pour effet que de modifier le temps de montée (précédemment de τ_1 à τ_2). Un montage correspondant est donné, c'est un peu comme un ampli non-inverseur avec des condensateurs en série avec les résistances.

1.4 Sensibilité aux fluctuations

✍ *Brenders p.202*

Pas nécessaire de faire cette partie, mais bon au cas où... On continue l'analogie avec la voiture : si la route monte et descend tout le temps, ça risque d'affecter la réponse (vitesse des roues) et on peut se demander est-ce que l'asservissement arrive bien à compenser ça ? Supposons que la chaîne directe varie de ΔA pas pas le chaîne de retour (en même temps son but c'est aussi d'être robuste), les variations relatives de la fonctions de transfert sont alors

$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{(1+AB)\Delta A - AB\Delta A}{(1+AB)^2}\frac{1+AB}{A} = \frac{\Delta A}{A}\frac{1}{1+AB}$$

Les fluctuations sont donc atténuées de $1 + AB$ par rapport à la chaîne sans asservissement

$$\frac{\Delta H_{BO}}{H_{BO}} = \frac{\Delta(AB)}{AB} = \frac{\Delta A}{A}$$

Reprenons notre petit ampli non-inverseur : avec $AB = 10^5$ (pour $R_1 = R_2$ à 0 Hz), on a $\frac{\Delta H}{H} = 10^{-5}\frac{\Delta A}{A}$. Donc même avec des énormes fluctuations $\Delta A = A$, la fonction de transfert ne varie que très très peu !

Donc la chaîne de retour joue aussi un rôle dans la robustesse du système.

1.5 Différents types de chaînes de retour

Bon là faut clairement pas en parler, mais être conscient qu'on peut insérer différents trucs :

— Retour réel (comme pour l'ampli non-inverseur) pour la rapidité

— Retour dérivateur pour annuler les erreurs systématiques

— Retour intégrateur pour ... ?

Déso j'ai pas trouvé de biblio là-dessus :'(

> *On a vu que la rétroaction négative correspondait à un système stable : un système asservi. Nous n'avons tous qu'une idée en tête, keskis passe lors d'une rétroaction positive ?*

2 Instabilité

But

On appelle cette partie comme ça pour bien insister que des oscillations ne peuvent naître que lorsque le système est instable

2.1 Condition de Barkhausen

✍ *Brenders, p.237*
✍ *Krob, p.131*

Comme on l'a dit, nous nous placerons donc dans le cadre d'une rétroaction positive :

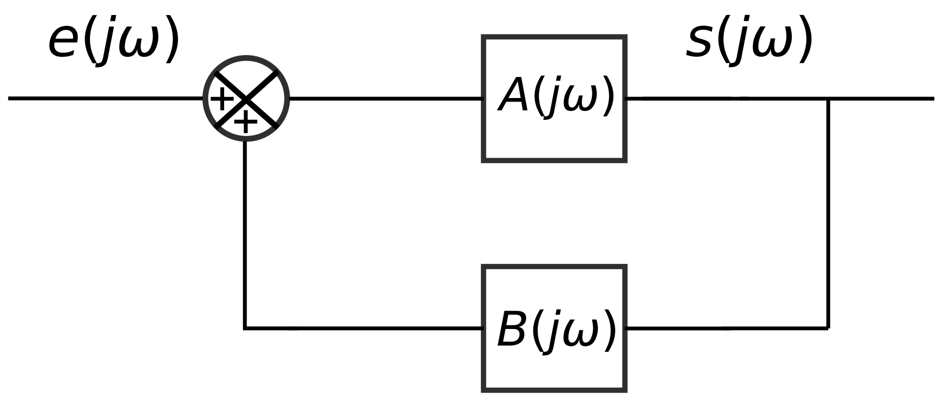

FIGURE 2.1 – **Rétroaction positive**

La fonction de transfert $H(j\omega) = \frac{s(j\omega)}{e(j\omega}$ a désormais une nouvelle expression :

$$H(j\omega) = \frac{A(j\omega)}{1 - A(j\omega)B(j\omega)}$$

Un système bien connu qui vérifie ce schéma-bloc est le LASER (cf ✍ *LP37* et le schéma du ✍ *Jolidon, p.216*) :

On rappelle vite fait le principe : avec une source d'énergie extérieure on effectue un échange de population entre deux niveaux énergétiques pour forcer l'émission stimulée à une certaine fréquence sélectionnée par un filtre (un FP). Le rayonnement émis par émission stimulée continue ensuite à forcer l'échange de population ce qui entretient le fonctionnement du LASER.

Cela nous permet de poser la définition d'un **oscillateur auto-entretenu** :

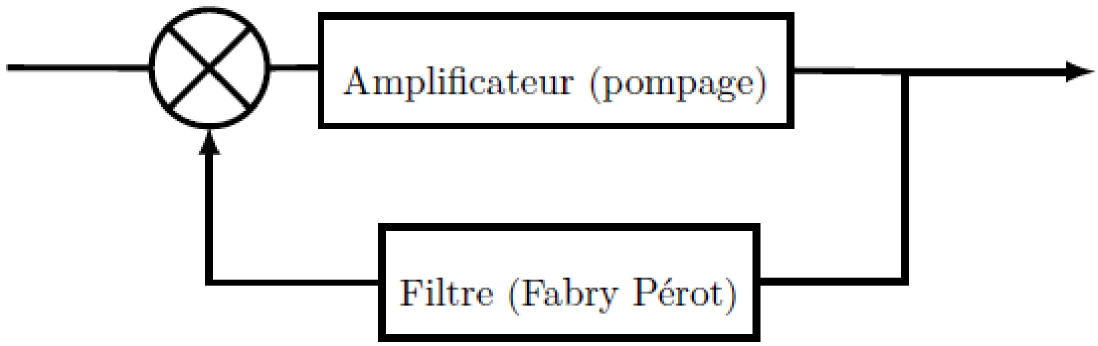

FIGURE 2.2 – **Schéma bloc du LASER**

Définition : Oscillateur auto-entretenu

Un **oscillateur auto-entretenu** est un générateur (filtre + milieu amplificateur) délivrant un signal périodique tout en étant alimenté par une source d'énergie continue, et en l'absence de tout signal périodique extérieur.

bien expliquer en quoi le LASER illustre parfaitement ça et dire que grâce au filtre on a même un oscillateur quasi-sinusoïdal

Mais d'ailleurs c'est quoi le signal d'entrée d'un LASER avant qu'une première boucle ne soit lancée et que le filtre ait agit en rétroaction ? ? Eh bien ce sont les émissions spontannées qui vont lancer la boucle ! Ces émissions spontannées créent un signal d'une très faible amplitude (on parle de bruit), bien plus faible que le signal que l'on veut en sortie du LASER.

On veut alors amplifier au maximum ce faible signal d'entrée ! Au vu de la fonction de transfert, la seule configuration qui permet **entrée bornée, sortie divergente** (✍ *Léo Mangeolle*) est $A(j\omega)B(j\omega) = 1$ (en linéaire).

Et quand le LASER est en fonctionnement normal et que le signal d'entrée (dû au bruit) est négligable devant le signal de la chaîne retour (dû au rayonnement *sortant* du filtre, on peut considérer l'entrée comme nulle et la condition pour avoir néanmoins une sortie non-nulle est encore $A(j\omega)B(j\omega) = 1$. On précise qu'on a ici quitté le domaine linéaire du coup.

On a ici mis en lumière la condition pour avoir un oscillateur auto-entretenu, on appelle cette condition la condition de Baurkhausen :

Condition de Barkhausen :
Pour avoir des oscillations à la pulsation ω dans un système bouclé {amplification + filtre } il faut :

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

Comme le précise bien le ✍ *Brenders, p.240* , cette condition est une condition sur des nombres complexes qui se traduit en deux égalités réelles :

$$\text{sur les modules : } |A(j\omega)B(j\omega)| = 1$$
$$\text{sur les arguments : } \arg(A(j\omega)) = -\arg(B(j\omega)) \ \ [2\pi]]$$

$A = g^2(\omega)e^{i\omega 2L/C}$ $g^2(\omega)$ le gain du milieu amplificateur et $B = r_2$

Prenons 30 sec (plus j'espère, je veux pas finir en avance et avoir à comber avec la PLL) pour parler de Physique :

- la première équation traduit le besoin d'un apport d'énergie extérieur qui est ici le pompage optique (dans le $A = g^2(\omega)e^{i\omega}2L/C$) et tu tombes sur $g^2(\omega) = 1/r_2$, il faut avoir un gain au moins égal aux pertes
- La deuxième équation indique qu'il faut un accord de phase après un aller retour dans la cavité pour que la raie spectrale correspondante soit amplifiée. S'agissant d'une cavité de type Fabry-Pérot, on retrouve une condition de type interférences constructives. Il s'agit donc d'une condition sur ω et donne dans le cas général la ou les pulsations de l'oscillateur.

Interférences

On remarque que pour $|AB| < 1$, on peut développer :

$$\frac{1}{1-AB} = \sum_{n=1}^{+\infty}(AB)^n$$

Ce qui veut dire qu'on somme les signaux qui ont parcouru 1, 2, 3... fois la boucle. C'est utile pour interpréter le critère de Barkhausen en terme d'interférences : Interférences constructives entre les signaux ayant parcourus 1, 2, 3... fois la boucle !

2.2 Naissance des oscillations et pont de Wien

✍ *MP27*
✍ *Krob p.131*
✍ *Duffait p.181*
✍ *Brenders p.244*
✍ *Simulation du pont de* Wien
✍ *J'intègre p.86*

La chaîne directe est contituée d'un amplificateur non-inverseur (parcqu'on veut voir des oscillations à plus que 8 Hz...) et la chaîne de retour c'est un filtre de Wien

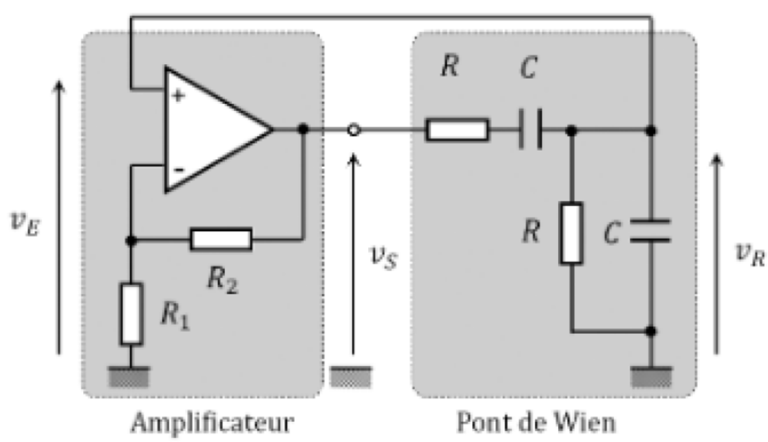

Figure 2.3 – Schéma du montage

$$A = 1 + \frac{R_1}{R_2} \qquad B = \frac{1}{1/Q + j(\omega/\omega_0 - \omega_0/\omega)}$$

Avec $\omega_0 = 1/RC$ et $Q = 1/3$. Ainsi la condition de Barkhausen se traduit par deux égalités

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

Ce qui veut dire qu'en se plaçant à $R_2 < 2R_1$, le sytème n'est pas capable d'amplifier le bruit pour en faire des oscillations... Mais dès qu'on atteint cette valeur, les oscillations apparaîssent.

Manip' : Naissance des oscillations

✍ *MP27* s'amuser à faire laser le truc... En mode XY c'est classe, ça fait des jolis cercles. On peut vérifier que la pulsation d'oscillation est bien celle choisie $\omega = \omega_0 = 1/RC$.

D'ailleurs, quand on écrit les équations, on trouve une forme en

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

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

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

Donc le coefficient d'amortissement peut prendre des valeurs négatives si $R_2 \geqslant 2R_1$, ce qui conduit à l'apparition d'oscillations à la pulsation de résonance du filtre.

Stabilité ?

Chacun des composant (passe-bande et ampli) sont stables, mais leur association ne l'est plus !

2.3 Caractérisation d'un oscillateur

On peut donc essayer d'aller au delà du critère de Barkhausen en dépassant $R_2 > 2R_1$. On observe que les oscillations perdent leur caractère bien sinusoïdal... La sortie est enrichie spectralement. Ceci est possible grâce aux non-linéarités : elles permettent de dépasser le critère de Barkhausen en compensant les pertes énergétiques mais alors on perd en précision spectrale. Notons que le formalisme précédent avec les fonctions de transfert et les blocs n'a plus aucun sens si c'est plus linéaire (au pire on peut voir $|AB|$ comme le gain de la boucle ouverte et donc l'augmenter au-dessus de 1 c'est combattre les ~~infidèles~~ non-linéarités).

Enrichissement spectral

Petite TF qui va bien. On peut utiliser le programme pyhton proposé par ✍ *J'intègre, Sanz p.91* . Ou alors la simulation du circuit électrique fait les TF également...

Ne pas trop parler

Attention on approche de la fin, faudrait pas donner trop d'idées de questions...

Un bon oscillateur c'est donc un truc qui créer un signal bien monochromatique, donc caractérisé par un bon facteur de qualité (il porte pas son nom pour rien le bougre !). Or là, $Q = 1/3$ c'est pas ouf. D'ailleurs ça se voit parce qu'en dépassant à peine $R_2 = 2R_1$, les oscillations commencent déjà à partir en couille. On peut donc citer l'oscillateur de COLPITTS qui a un facteur de qualité réglable, croissant avec L :

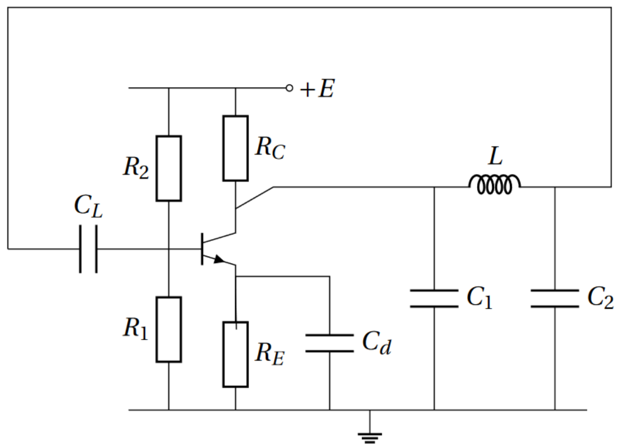

FIGURE 2.4 – Schéma de l'oscillateur de COLPITTS

On peut alors utiliser du quartz qui peut être assimilé à une inductance propre $L \sim 100\,\mathrm{H}$, ce qui va nous donner un facteur de qualité ultra balèze $Q \sim 50000$! Ça s'appelle un oscillateur à quartz.

Parler de la PLL (boucle à verrouillage de phase) si il reste du temps. ✍ *Hprépa exo 5 p.175* ou alors ne pas en parler parce que c'est ÉCLATÉ AU SOL et parce que de toutes façons, monter une PLL par visio c'est pas facile

Questions

Dans vos différents exemples, c'est des rétroactions positives ou négatives ? Systèmes asservis (ampli non inverseur, ascenseur, régulateur de vitesse...) = rétroaction négative pour avoir une stabilisation, oscillateur auto-entretenus = rétroaction positive car oscillations dues à une déstabilisation/instabilité

Dans l'oscillateur à pont de Wien, la condition de Barkhausen sur la phase c'est quoi ? Pourquoi vous ne l'avez pas dit alors ? parce que la condition sur le gain est toujours intuitive quand on abandonne Barkhausen pour regarder plutôt Nyquist, alors que la condition sur la phase n'est utile que dans le cadre très restreint de Barkhausen

Quand on boucle l'ampli non inverseur, on change le type de circuit ? Non juste le gain et la bande passante

Il n'y a pas un truc qui est conservé quand on passe de l'AO à l'ampli non inverseur ? Produit gain-bande passante

Là un élève demanderait, pourquoi vous dites Re > 0 alors que sur le diagramme de Nyquist c'est Re < 1 ?

Comment on pourrait modéliser les pertes par les miroirs dans votre schéma à rétroaction positive ? Vous pouvez réexpliquer ce qui se passe quand vous prenez une résistance R2 très grande ? Il se passerait quoi si on augmentait le R des miroirs ? La forme des pics s'appellerait comment ?

C'est quoi l'équivalent pour le pont de Wien ?

Exemple de système asservi pour éviter les fluctuations thermiques ?

Vous parlez de quel laser dans votre exemple ? Il est fait de quoi le milieu amplificateur dans un He-Ne ? Comment on fait le pompage ? C'est quoi la condition sur le nombre de niveaux pour qu'il y ait amplification ? Autres conditions à respecter ?

On cherche toujours à avoir des lasers monomodes ? En pratique c'est des lasers monomodes qu'on a ? C'est des modes transverses ou longitudinaux ?

Dans l'oscillateur de Wien, c'est quoi l'équivalent du pompage ? Alimentation de l'AO

Vous dites que si la croissance des oscillations s'arrête, c'est à cause de la saturation de l'AO, mais là c'est plutôt 4.5V que 15V, pourquoi ?

fonctionnement d'un AO ?

fonctionnement montre à quartz ?

autres types d'oscillateurs ?

questions sur d'autres critères de performance d'un asservissement, le but était de me faire parler des limites de sécurité d'un asservissement. Temps de réponse, dépassement

Système physique non électrique avec des oscillations due à la rétroaction ? comment le système pouvait être traité avec Barkausen et ensuite quelle était la source de démarrage du laser ? Laser.

comment est-ce que l'on peut stabiliser un oscillateur à pont de Wien avec une ampoule à incandescence ? Si stabiliser = avoir des oscillations qui durent, on peut mettre l'ampoule à la place de R2, et la résistance du filament augmente avec la température donc plus on va mettre de puissance dans l'ampoule plus on va augmenter la résistace jusqu'à respecter Barkhausen.

Quelle est la caractéristique principale des systèmes bouclés ? Produit gain-bande = constante (ex : ampli non inverseur)

Qu'est-ce qui limite l'amplitude des oscillations dans l'oscillateur à pont de Wien ? D'où viennent les non linéarités ? Effets non linéaires dus aux transistors de l'AO.

Que se passe-t-il si on modifie la valeur de la résistance variable dans l'oscillateur à pont de Wien ? Déformation du signal, on s'éloigne des oscillations quasi sinusoïdales.

Qu'est-ce qui caractérise un oscillateur ? Que vaut-il pour l'oscillateur à pont de Wien ? Son facteur de qualité, 1/3 pour le pont de Wien.

Quel est l'intérêt de Nyquist ? prévision du comportement en boucle fermée à partir de l'étude en boucle ouverte.

Un système instable est-il toujours un oscillateur ? Si non, sous quelle(s) condition(s) l'est-il ?

Pourquoi utiliser la transformée de Laplace et pas la transformée de Fourier ? La transformée de Laplace permet de traiter les régimes transitoires alors que la transformée de Fourier ne peut être employée que pour les régimes permanents.

Quelles hypothèses sont nécessaires sur l'amplificateur opérationnel ? Bien préciser que l'on se place en régime linéaire ou en saturation, et que l'AO est supposé idéal.

Qu'est-ce que la bande passante d'un amplificateur non-inverseur ? Il s'agit d'un passe-bas, toutes les fréquences inférieures à la fréquence de coupure ω_0 passent. La bande passante est donc simplement ω_0.

Pourquoi y a-t-il un dépassement de consigne avec le moteur asservi en position ? Les systèmes asservis du premier ordre n'ont, en théorie, pas de dépassement de consigne, mais ce n'est pas le cas des systèmes du second ordre comme le moteur asservi. Pour avoir l'ordre du système, il faut regarder la chaîne directe dans son intégralité. En l'occurrence, il s'agit d'une succession de modules d'ordre 1, la chaîne globale est au moins d'ordre 2.

Est-ce que pour le pont de Wien, on a obligatoirement les mêmes résistances et condensateurs ? Pas forcément mais au moins ici la FTBO a une forme plutôt simple

Donnez l'équation différentielle associée à une notation de Laplace. Est-ce que pour la notation de Laplace revient juste à remplacer j omega par p ? Même équa diff qu'en Fourier si on a la CI = 0

Qu'est-ce que le facteur de qualité ? Connaissez-vous des oscillateurs avec un meilleur facteur de qualité ? Q=f/ delta f
Oscillateur à quartz

Quand la fonction de transfert est plus grande que 1 pour toute une bande pourquoi on ne voit pas toutes les fréquences apparaître ? Comment sont créées les oscillations quand on boucle le système ?

Modèle idéal de l'AO ?
✍ *LP sur l'AO (nouveaux titres)* :/

Avantages ordre 2 par rapport à 1 ?
Plus vite quitte à avoir des oscillations

Condition sur l'ordre pour avoir des oscillations ?
Au moins 3 (cf. diagramme de Nyquist : faut que la phase aille plus loin que π)

Pourquoi Laplace et pas Fourier ?
Culturel (physiciens vs ingénieurs)

Autres systèmes auto-oscillants ?
Multivibrateur astable, Van der Pol, vase de Tantale, extracteur de Soxhlet

Pourquoi l'intensité d'un LASER est limitée ? Et qu'est-ce qui fixe cette limite ?
Le gain supposé constant dépend en fait de l'intensité