

MP Systèmes bouclés

Dihya Sadi

Session 2021

Introduction

[COURS SUR LES SYSTÈMES BOUCLÉS [Lien ici !!!](#)]

L'objectif de ce montage est de présenter quelques notions générales sur les systèmes bouclés, stables ou instables.

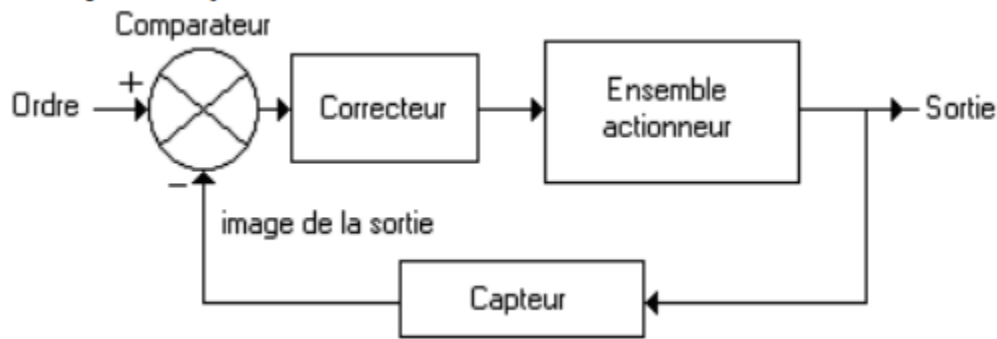
1 Asservissement en vitesse d'une MCC

Matériel

- Ensemble MCC Moteur + Génératrice
- Alim stabilisée 36V / 10A
- Hacheur 4 quadrants ENSC 288.3
- Oscillo
- Rhéostat 50 , 5 A
- Plaquette filtre RC
- Plaquette Correcteur
- Alim +/-15V
- GBF Agilent

Dans de nombreux processus industriels, mais aussi expériences en labo, il est indispensable de maîtriser certains paramètres physiques, soit pour protéger des systèmes, soit pour obtenir de leur part des comportements reproductibles. Par exemple la vitesse d'un moteur doit pouvoir être asservie ! (Traction ferroviaire, obtention de la vitesse constante d'un escalator quel que soit le nombre d'utilisateurs...)

Le principe général d'un système asservi est le suivant :



L'ordre donné en entrée est comparé à l'image de la sortie fournie par le capteur. Le signal d'erreur obtenu en sortie du comparateur va permettre alors de commander la chaîne d'action composée du correcteur, qui va adapter le signal d'erreur, pour obtenir une réponse optimale de l'actionneur, selon un certains nombres de critères qui sont : précision, rapidité, stabilité. Le choix d'un correcteur adéquat dépend des critères choisis et résulte souvent d'un compromis.

Les systèmes bouclés stables permettent ainsi l'asservissement d'une grandeur physique. Les étapes à suivre se présentent de la manière suivante.

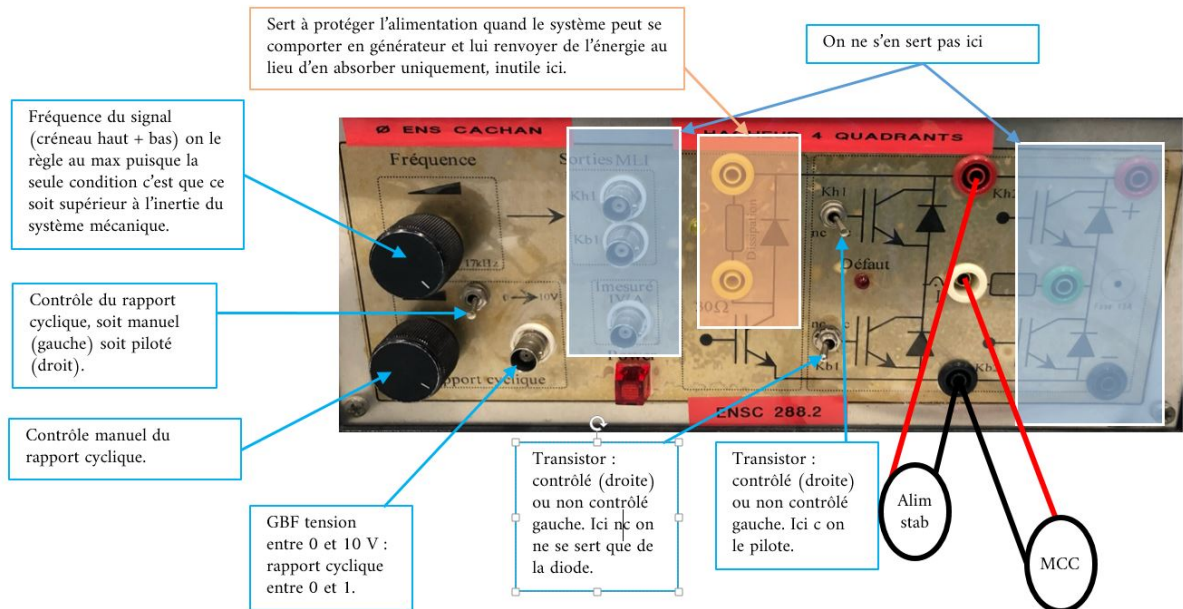
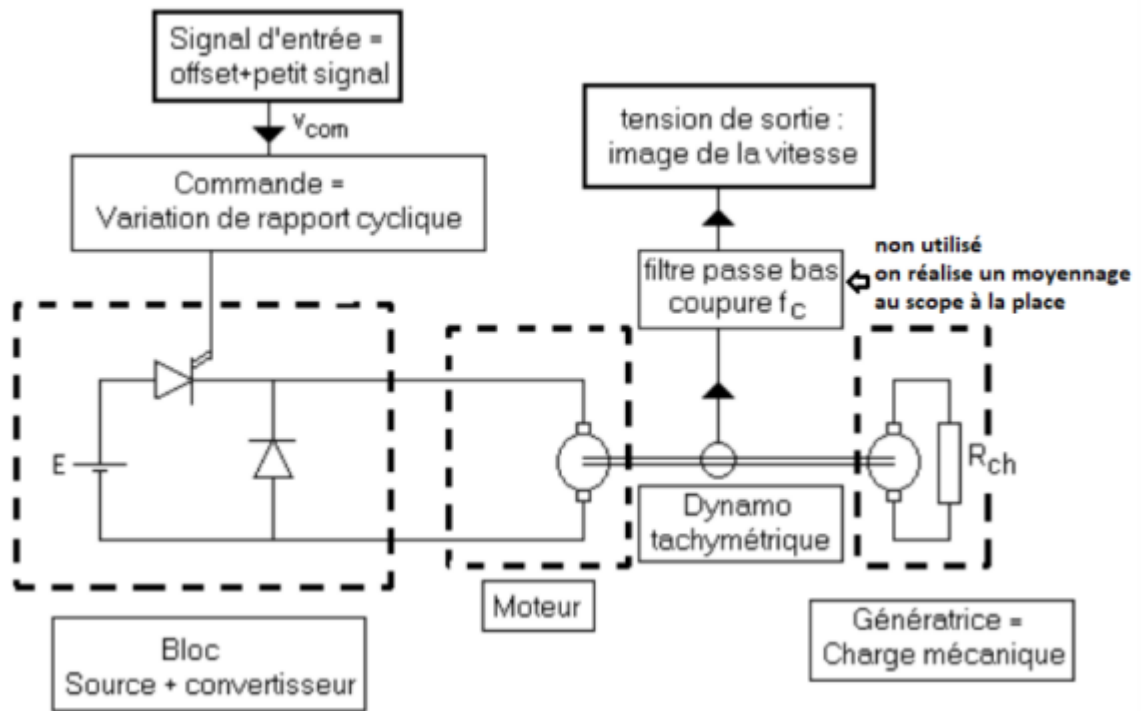
1.1 Identification du système en boucle ouverte

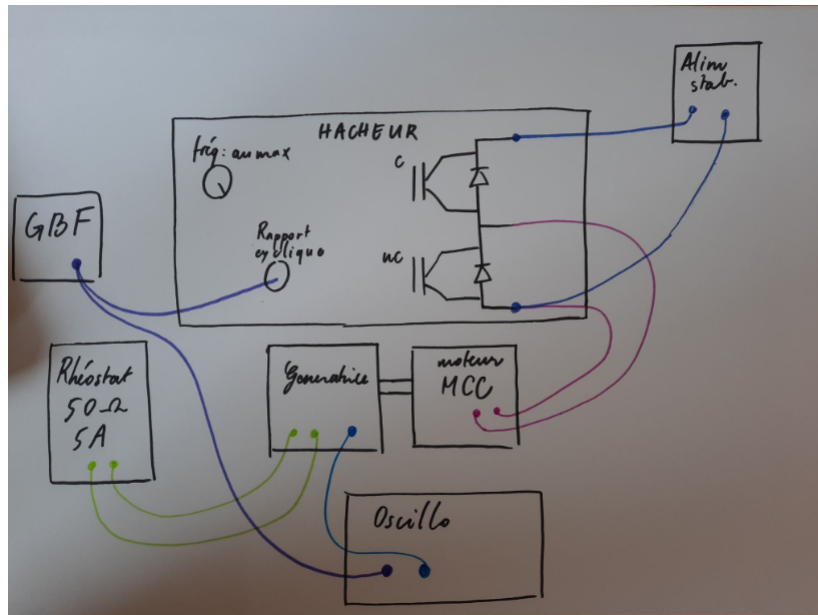
La première étape est d'établir un modèle pour caractériser le système.

Quel type de modèle peut-on attendre :

- Le hacheur peut être vu comme un gain statique (avec éventuellement un retard dont on peut négliger l'effet si la fréquence de hachage est de 10kHz environ)
- Le MCC peut être vu vis à vis de sa réponse en vitesse comme un passe bas d'ordre 2 (cf MP Moteurs). Pour un système très amorti on peut adopter un modèle passe bas d'ordre 1 car dans ce cas les fréquences de coupures sont séparées et si les harmoniques du signal test sollicitent principalement la bande passante et le début de la première coupure, le système répondra comme si la seconde n'existait pas
- La dynamo tachymétrique (génératrice) est une petite MCC, donc un passe bas d'ordre 2, cependant elle est de petite taille et présente donc une faible inertie. On supposera ainsi que la plage de fréquence dans laquelle on va solliciter le moteur est suffisamment faible devant les fréquences de coupures de la dynamo. On peut la représenter comme un simple gain. Toutefois il est souvent très bruyant donc il faut filtrer sa sortie avec un passe-bas de coupure à 1kHz (ou bien faire un moyennage)

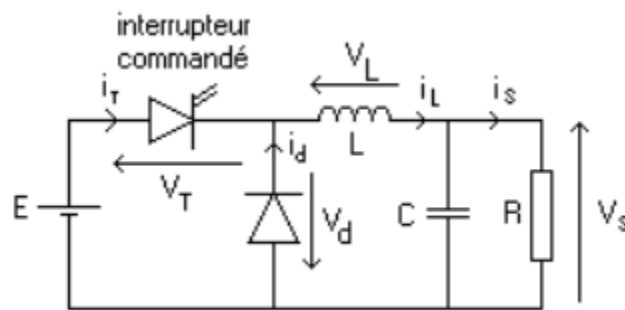
Nous on va faire une approche de type "boîte noire", en identifiant l'entrée et la sortie et chercher à établir un modèle de comportement. On réalise le montage suivant :





- On alimente le hacheur série non réversible en courant par une alim stabilisée à 25V et 3A.

Principe du hacheur : le hacheur est un convertisseur d'énergie qui permet de réaliser une conversion du continu fixe vers du continu variable. Permet d'avoir une alimentation régulée. (p.25 du poly de JBD)



R représente la charge et les éléments L et C un filtre qui élimine simplement l'ondulation résultant du découpage sur la tension et le courant de sortie, de sortie qu'on peut supposer i_s et v_s continus. Le cycle de fonctionnement comporte alors 2 étapes : lors de la première, entre 0 et αT le transistor est rendu passant et la diode bloquée. Lors de la seconde, c'est l'inverse. Finalement : $V_s = \alpha E$ en moyenne.

- On commande le rapport cyclique du hacheur à l'aide d'un GBF. Il s'agit de notre signal d'entrée. On applique un créneau de quelques Hz en entrée, 5V d'offset et 1V d'amplitude afin de rester dans la plage de réponse linéaire du système

- La sortie du hacheur est envoyée sur le moteur
- Le moteur entraîne une génératrice
- La génératrice est branchée sur le rhéostat qui représente notre charge
- On visualise à l'oscilloscope la commande du hacheur et la tension de sortie de la dynamo tachymétrique liée à l'arbre de la génératrice qui est donc image de la vitesse de rotation de l'arbre. Pour cela il faut :
 - On synchronise sur le signal d'entrée du GBF ou bien sur la voie externe de l'oscillo
 - On se place en mode normal (Menu Trigger) pour le niveau de déclenchement : pour un signal de basse fréquence comme celui qu'on étudie, en mode auto, l'oscilloscope risquerait de déclencher prématurément. Attention penser à rebasculer en mode auto plus tard car on voudra visualiser des tensions continues donc ce ne sera pas possible en mode normal.
 - Effectuer un moyennage dans le menu Acquire. Le processus de moyennage à l'oscilloscope consiste à conserver plusieurs traces de l'oscilloscope et à en faire la moyenne. Si le bruit est aléatoire et de moyenne nulle, ce qui est le cas ici, alors il disparaît après moyennage

On mesure maintenant le temps de réponse à 63 pourcents du système ainsi que le gain K . On obtient en OG $K=1$ et $\tau = 100ms$.

On visualise sur l'oscilloscope la consigne du GBF et la tension du tachymètre. Le GBF impose un créneau entre 5V et 6V assez lent pour que le moteur se stabilise à chaque fois (environ 1 Hz) et on mesure τ , ainsi que K le rapport des tensions (par exemple pour GBF=5V donc rapport cyclique 50%, quelle est la tension image de la vitesse de rotation ?). Indication : On avait $\tau = 35ms$ et $K = \frac{1.38}{1.99}$

On a à présent un modèle pour notre système : on prends un ordre 1 de la forme :

$$H(p) = \frac{K}{1 + \tau p}$$

1.2 Effet d'une perturbation

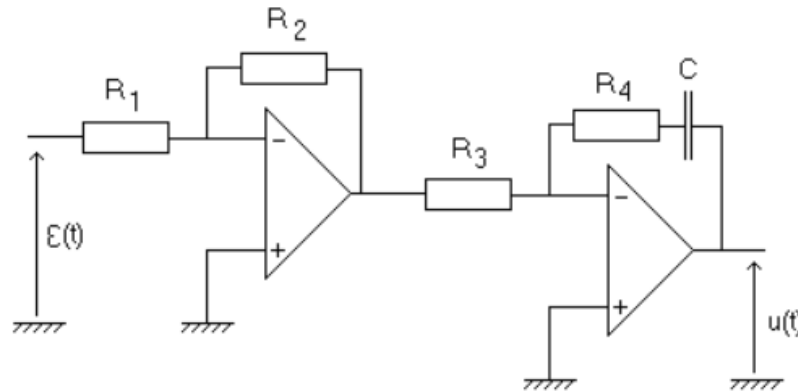
Avant de passer en boucle fermée on va tester l'effet d'une perturbation.

- On prends garde à bien être revenu en mode auto pour le déclenchement car les tensions vont être continues, et dans Utility on se met en mode DC.
- On fait varier brutalement la résistance de charge placée en sortie en réalisant un court circuit, en plaçant un fil entre la borne noire (potentiel fixe) et la borne rouge (potentiel variable) du potentiomètre.

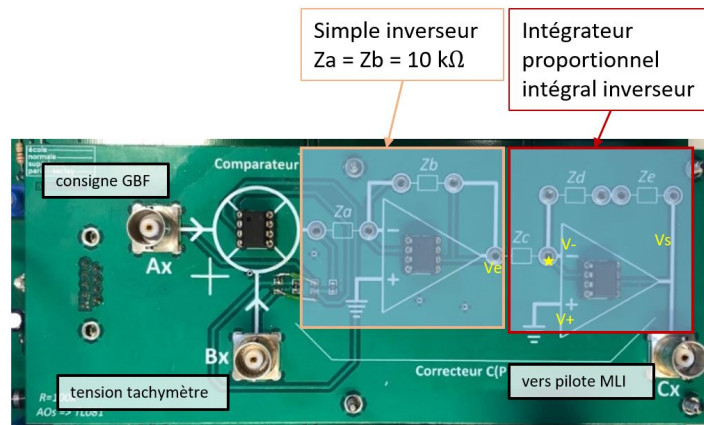
Lorsque le système aura été corrigé l'asservissement permettra de compenser l'effet de la perturbation pour maintenir une vitesse constante en régime permanent, excepté durant un transitoire qui dépendra de la dynamique de la boucle. C'est ce qu'on vérifiera plus tard.

1.3 Choix et réglage du correcteur

Pour faire en sorte que le système soit indépendant des perturbations extérieures, on réalise une correction de type proportionnelle intégrale ce qui nous permet d'éliminer l'erreur statique. Il a la structure :



$$C(p) = \frac{R_2 R_4}{R_1 R_3} \left(1 + \frac{1}{R_4 C p} \right) = K_c \left(1 + \frac{1}{\tau_c p} \right)$$



La loi des noeuds en terme de potentiel sur l'étoile jaune donne :

$$\frac{V_e}{Z_c} + \frac{V_s}{Z_d + Z_e} = V_- \left(\frac{1}{Z_c} + \frac{1}{Z_d} + \frac{1}{Z_e} \right)$$

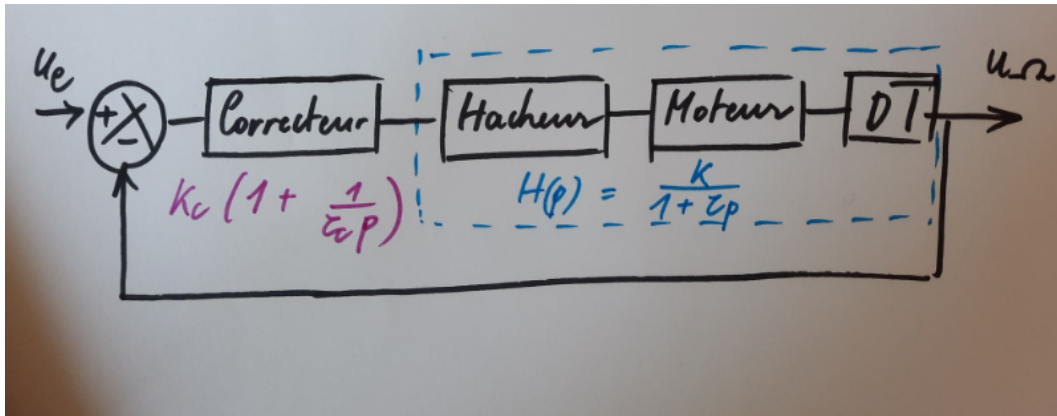
On fait l'approximation des AO parfaits, $V_+ = V_-$ or $V_+ = 0$ donc :

$$\frac{V_e}{R_1} + \frac{V_s}{R_2 + \frac{1}{jC\omega}} = 0$$

$$\frac{V_s}{V_e} = -\frac{R_2}{R_1} \left(1 + \frac{1}{jR_2C\omega} \right)$$

$$\frac{V_s}{V_e} = -K_C \left(1 + \frac{1}{j\tau_C\omega} \right)$$

Où l'on vient d'introduire K_C et τ_C . L'inverseur en amont sur la plaquette se charge d'enlever le signe -



Quand on ferme la boucle on a le bloc correcteur (plaquette verte) en $K_C \frac{1+\tau_C p}{\tau_C p}$ où $p = j\omega$ et le moteur passe bas mécanique du premier ordre en $\frac{K}{1+\tau p}$ donc la fonction de transfert totale (FTBO) est $K_C \frac{1+\tau_C p}{\tau_C p} \frac{K}{1+\tau p}$.

On va s'arranger pour avoir $\tau = \tau_C$ (ce sera notre unique contrainte) de sorte à ce que la fonction de transfert totale (FTBO) se simplifie en $\frac{KK_C}{\tau_C p}$.

Indication : On avait choisi $R_2 = 680\Omega$ et $C = 5.2\mu F$

$$FTBF(p) = \frac{FTBO(p)}{1 + FTBO(p)} = \frac{1}{1 + \frac{\tau_C}{KK_C} p}$$

Le gain statique vaut 1 et donc l'erreur statique est nulle ! Bon asservissement. Le temps de réponse total est donc $\frac{\tau_C}{KK_C}$ où on peut faire varier K_C à souhait via R_1 , éventuellement vérifier cette loi en traçant une droite (temps de réponse vs R_1), étudier la stabilité... Et sa fonction de transfert est :

1.4 Etude des performances en boucle fermée

- On détermine la plage d'asservissement (plage de tensions d'entrée pour laquelle la sortie est égale à l'entrée). On applique une tension continue, on remarque que la sortie suit parfaitement l'entrée sur une plage limitée. Si on n'arrive pas à faire décrocher le moteur il faut diminuer la tension d'alimentation ce qui diminue la plage d'asservissement.

- Plage d'asservissement théorique ?

La force électromotrice à l'induit du moteur est reliée à la tension d'alimentation par $E_m = \alpha E$ (si on néglige la résistance d'induit) or on a également $E_m = K_m \Omega$ donc :

$$\Omega = \frac{\alpha E}{K_m}$$

On en déduit donc que la plage d'asservissement, limitée par $\alpha = 0$ et $\alpha = 1$ est $[0, E_{K_m}]$ soit en multipliant par la constante multiplicatrice de la génératrice tachymétrique : $V_\Omega [0, \frac{K_g E}{K_m}]$. Valeur numérique de K_g se lit sur la génératrice tachy (6V pour 1000 tour/min) et la valeur de K_m peut se mesurer en étudiant la MCC (cf MP Moteurs)

- Test de l'effet d'une perturbation sur le système : maintenant qu'on a déterminé la plage d'asservissement on se place au milieu, et avec une tension d'entrée constante on observe bien que la tension de sortie suit parfaitement. Si on réalise une perturbation sur le couple de charge du moteur on constate que v_Ω s'écarte de v_e pendant un transitoire puis revient. Pour qu'il soit visible il ne faut pas que le système soit trop rapide et que la perturbation soit suffisante.
- Enfin on mesure la constante de temps du système on regarde l'influence du gain sur celle-ci. On voit que le temps de réponse diminue avec l'augmentation du gain.

Évaluer le temps de réponse du moteur et le rapport des tensions pour pouvoir construire le correcteur On utilise pas encore la carte verte, le GBF est directement branché sur le pilotage du hacheur.

On ferme la boucle avec le correcteur dont on calcule les composants

Qualitativement on peut donner une consigne fixe, et faire varier la charge sur le moteur (brancher une résistance variable (potentiomètre) sur la MCC entraînée et voir que la vitesse de rotation reste constante quelque soit la charge, au dépend de la puissance fournie par l'alimentation stabilisée !

2 Oscillateur électronique : le Colpitts

[Cf CHAPITRE 7 DU PHYSIQUE PSI-PSI* AUX ÉDITIONS PEARSON CAP PRÉPA, TOUT LE PROGRAMME 2014 SOUS FORME D'EXERCICES CORRIGÉS]

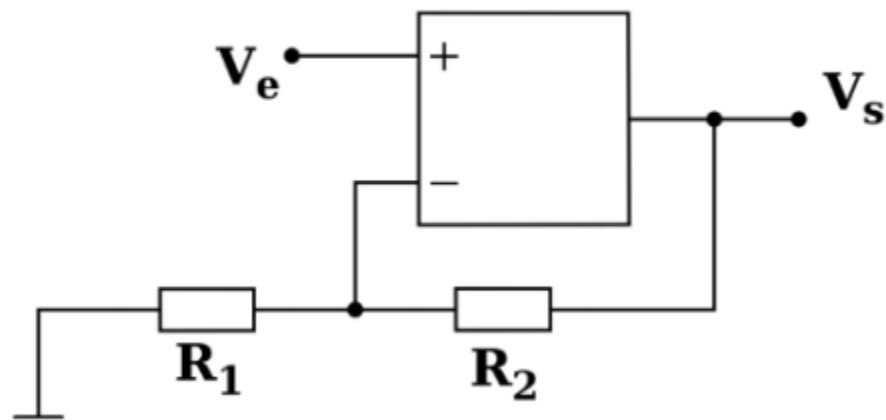
Système rendu volontairement instable : oscillateurs. Oscillateurs électroniques par ex,

ou lasers.

Matériel

- Parmi les gros composants : 2 capas de 68 nF, 1 résistance de 6,8 k Ω , une bobine de 20 mH (peu résistive !!!)
- Plaque AOP simple pour l'ampli + carte mère + Alim +/-15V
- GBF
- RLC-mètre
- Oscillo
- Boîte de décade

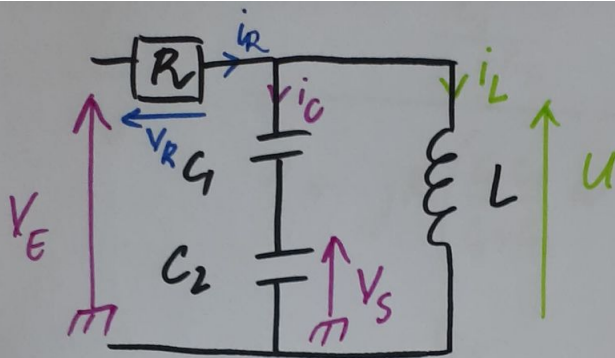
2.1 Etude de l'amplificateur : chaîne d'action



On réalise le montage suivant sur plaquette verte. On étudie d'abord l'amplificateur non inverseur avec $R_1 = 1k$ et R_2 variable. On envoie une entrée sinusoïdale au GBF on vérifie la sortie, mesure de gain.

2.2 Etude de l'oscillateur : boucle de retour/rétroaction

On va prendre en compte dans nos calculs le fait qu'on ne parvient pas à avoir exactement $C_1 = C_2$ en pratique.



• Diviseur de tension:

$$V_S = \frac{\frac{1}{j\omega C_2}}{\frac{1}{j\omega C_1} + \frac{1}{j\omega C_2}} U$$

$$= \frac{C_1}{C_1 + C_2} U$$

• Loi des Mailles + Noeuds

$$U + V_R = V_E$$

$$\text{or } V_R = R i_R = R(i_C + i_L)$$

$$= R \left(j\omega C_1 V_S + \frac{U}{j\omega L} \right)$$

D'où finalement:

$$U + j\omega R C_1 V_S + \frac{U}{j\omega \frac{L}{R}} = V_E$$

$$\frac{C_1 + C_2}{C_1} V_S + j\omega R C_2 V_S + \frac{C_1 + C_2}{C_1} \frac{U_S}{j\omega \frac{L}{R}} = V_E$$

$\left. \begin{array}{l} U = \frac{C_1 + C_2}{C_1} V_S \end{array} \right\}$

$$\frac{V_S}{V_E} = \frac{1}{\frac{C_1 + C_2}{C_1} + j\omega R C_2 - j\frac{(C_1 + C_2)R}{C_1 L \omega}}$$

On réécrit :

$$\frac{V_S}{V_E} = \frac{\frac{C_1}{C_1 + C_2}}{1 + jR \left(\frac{C_2 C_1}{C_1 + C_2} \omega - \frac{1}{L\omega} \right)}$$

$$= \frac{G_0}{1 + jQ \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)} \rightarrow \text{Filtre pass bande}$$

Ainsi on a

$$\begin{cases} R \frac{C_2 C_1}{C_1 + C_2} = \frac{Q}{\omega_0} \\ \frac{R}{L} = Q \omega_0 \end{cases}$$

D'où

$$\frac{R^2}{L} \times \frac{C_2 C_1}{C_1 + C_2} = Q^2 \rightarrow Q = R \sqrt{\frac{C_2 C_1}{L(C_1 + C_2)}}$$

et

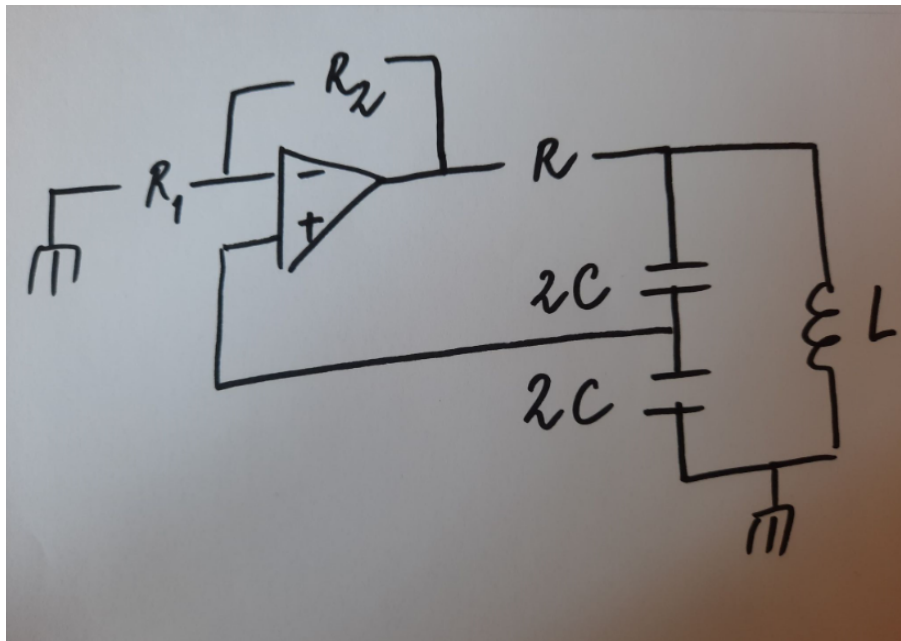
$$\omega_0 = \frac{R}{L} \times \sqrt{\frac{L(C_1 + C_2)}{C_1 C_2}} \times \frac{1}{R}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{(C_1 + C_2)}{L(C_1 C_2)}}$$

Filtre passe bande du second ordre, réalisé sur les platines de métal. On va chercher à le caractériser rapidement aussi : on montre le comportement type passe bande, on détermine la fréquence de résonance en se plaçant en mode XY ou bien macro Igor pour le diagramme de Bode. On peut tracer Q en fonction de R .

Remarque : en fait on peut aussi prendre en compte le fait que la bobine a une résistance interne, il faudrait alors refaire le calcul, parce que cette résistance interne influe sur la pulsation et le facteur de qualité.

2.3 Bouclage : apparition des oscillations



La condition d'oscillations de Barkhausen s'écrit :

$$\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{G_0}{1 + jQ\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)} = 1$$

Soit

$$\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) G_0 = 1 + jQ\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)$$

On égalise les parties réelles et imaginaires on obtient alors :

$$GG_0 = 1$$

Et :

$$\omega = \omega_0 = \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{LC_1C_2}}$$

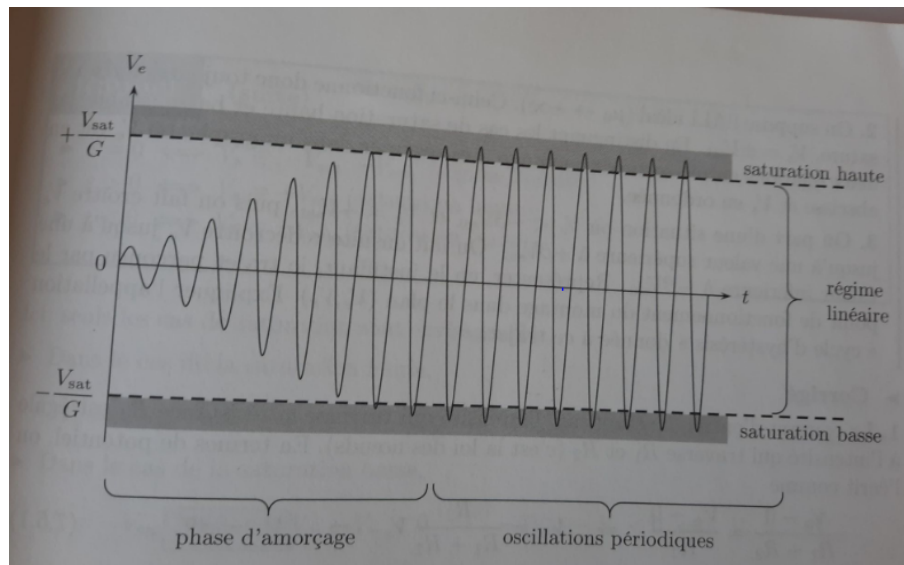
Ainsi on aura des oscillations à la pulsation $\omega = \omega_0 = \sqrt{\frac{C_1+C_2}{LC_1C_2}}$ à condition que $R_2 = \frac{C_2 R_1}{C_1}$.

Autre approche : En notant G le gain de l'ampli on réécrit la condition de Barkhausen et on la passe en temporel. On obtient alors l'équation différentielle, tant que $|V_e| < \frac{V_{sat}}{G}$:

$$\frac{d^2 V_e}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q} (1 - GG_0) \frac{dV_e}{dt} + \omega_0^2 V_e = 0$$

Bien sur on veut un oscillateur harmonique donc on veut que le facteur $(1 - GG_0) = \frac{\omega_0}{Q'}$ soit nul, mais est-ce que c'est par valeurs croissantes ou décroissantes ? On veut que cette équation assure le démarrage des oscillations à partir d'un parasite. Il faut donc 1) que Q' soit négatif pour que ce soit instable/solution divergente 2) $Q' < -1/2$ pour avoir une solution du type sinusoïde amplifiée 3) On voudrait une amplification pas trop violente parce que idéalement on aimerait que ça se rapproche de l'OH donc Q' qui tends vers $-\infty$ plutôt. Toutes ces conditions réunies nous donnent la condition : $GG_0 > \approx 1$, que l'on obtient en jouant sur la valeur de R_2 .

On peut remarquer aussi que la solution n'est pas tout à fait sinusoïdale, on a saturation dans la zone grise ci-dessous.



On boucle l'oscillateur, on détermine la condition d'oscillations qu'on compare à la valeur théorique. Inégalité plutôt. Discuter des conditions de démarrage : bruit. On montre la FFT à l'oscillo pour montrer l'enrichissement spectral si on s'écarte trop de la condition d'oscillation, ce n'est plus sinusoïdal.