
M27 : Systèmes bouclés



26 janvier 2014

Leçon corrigée par :
Jean-Baptiste DESMOULINS
jean-baptiste.desmoulins@physique.ens-cachan.fr

NB : *Ce compte-rendu n'a pas encore été relu par la personne ayant présenté la leçon. Il sera remplacé par une version définitive plus tard : des erreurs peuvent donc encore subsister.*

Remarques liminaires

Ce montage ayant récemment changé de titre (il portait auparavant la mention « Oscillateurs exclus »), il est assez dur de trouver beaucoup de matière dans les compte-rendus du jury. On y trouve cependant qu'« un oscillateur à quartz serait le bienvenu, compte tenu de son fort facteur de qualité » (2014). La même année : « ce montage concerne la physique des asservissements et/ou celle des oscillateurs auto-entretenus. Une maîtrise minimale des montages élémentaires est requise ».

En 2012-2008 : « Les notions de stabilité, puis de temps de réponse et de précision sont essentielles dans ce montage. Le monde moderne regorge de systèmes asservis et il convient donc d'éviter l'utilisation de boîtes noires présentant des défauts introduits exprès pour qu'on les corrige par asservissement. Le produit gain×bande passante = constante ne doit pas être attendu aveuglément, les conditions de validité de cette relation doivent être connues et respectées. »

2007 : « La connaissance du comportement en fréquence des quadripôles est nécessaire pour discuter les propriétés d'un système bouclé. Le tracé d'un diagramme de Bode peut faciliter la présentation. »

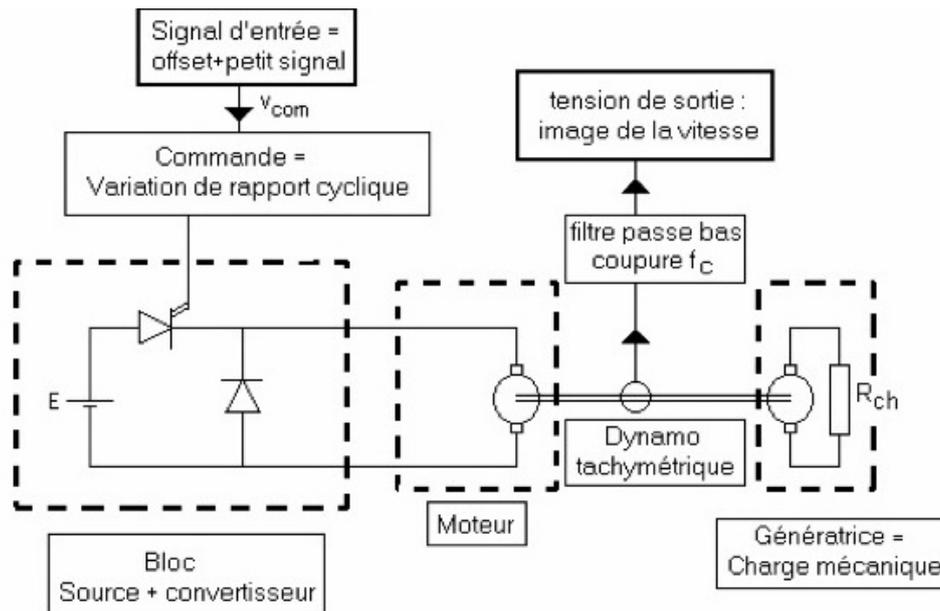
Introduction

L'idée est d'introduire les asservissements/oscillateurs en prenant des exemples de la vie de tous les jours : un asservissement (système bouclé stable) permet par exemple à un escalator de monter à la même vitesse quel que soit le nombre de personnes qui l'empruntent ; un oscillateur (système bouclé instable), est à la base d'une montre à quartz.

Les commentaires portant sur la partie manip du montage seront écrits [en bleu](#).

I : Un système asservi stable

1) Fonctionnement du hacheur



Le but de cette partie est de vérifier qu'on ne sort pas de la plage de linéarité du hacheur, et donc de la déterminer. Pour cela, on peut visualiser une rampe en sortie du GBF de commande, dont on fait varier l'amplitude autour de 5 V, et, sur une voie différente, la réponse du hacheur (une rampe, *a priori*) à cette commande. Il est cependant assez dur avec nos GBF, limités à 10 V, de sortir de la plage de linéarité. **De plus, la sortie du hacheur étant en général assez sale, il est nécessaire de se placer en mode high resolution (de manière générale, il sera toujours nécessaire dans ce montage, ou bien de se placer en mode high resolution, ou bien de moyenner).**

2) La MCC

On étudie d'abord le système en boucle ouverte : on peut modéliser le système par un premier ordre :

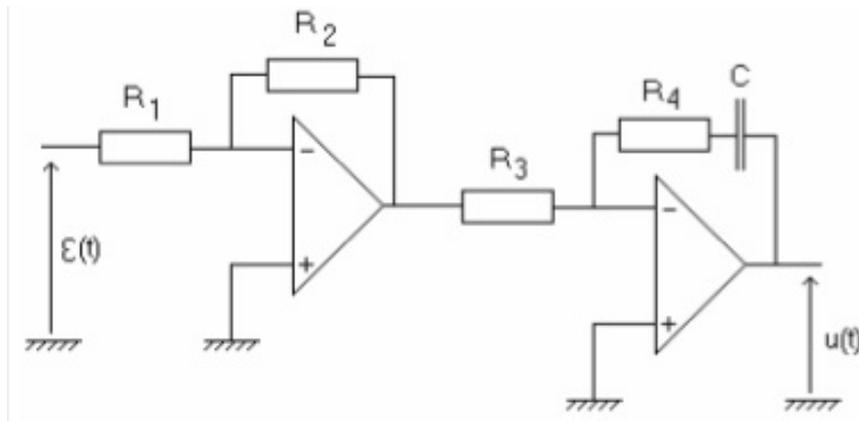
$$G_{BO}(p) = \frac{K}{1 + \tau p}$$

En envoyant un créneau avec un offset de 5 V (pour être au milieu de la plage de linéarité), une amplitude de 1 V (pour n'en pas sortir) et une fréquence de 1 Hz (pour ne pas être filtré par la machine), on peut en déduire le gain (rapport des amplitudes entrée/sortie) et la constante de temps de la MCC. Numériquement, on trouve $\tau = 49$ ms et $K = 1,41$. De plus, si on fait varier R_{ch} , on remarque que la vitesse de la machine change. De même si on fait varier la valeur de l'alimentation stabilisée en entrée du hacheur (typiquement, si on passe de 20 à 25 V, la commande de la dynamo passe de 1,96 à 2,41 V). Le système n'est donc pas stable et une perturbation de l'entrée change la sortie : le but de ce qui suit sera donc d'asservir le système.

S'il peut être tentant d'utiliser l'onglet Quick Meas de l'oscillo pour lire directement le rapport crête à crête de la sortie pour le diviser par celui de l'entrée et connaître le gain, c'est cependant assez maladroit ici dans la mesure où la sortie étant assez bruitée, la valeur que lit l'oscillo est en fait la valeur correcte + $2 \times$ l'amplitude du bruit : il vaut donc mieux y aller au curseur. De plus, les oscillos 4 voies permettent de lire directement τ sans utiliser les curseurs : on peut choisir dans l'onglet Quick Meas, la mesure « Montée », et dans les paramètres, le minimum à 0 % et le

maximum à 63 %. Enfin, pour bien voir l'influence de R_{ch} , il peut être pratique de se placer en roll et d'augmenter la vitesse de la machine (l'influence de la charge est alors plus visible).

On ferme ensuite la boucle en utilisant pour cela une plaquette d'asservissement sur laquelle on peut choisir les résistances et les capacités (attention aux résistances trop faibles ($R \ll 1k\Omega$) et aux capa trop élevées ($C \gg 100$ nF)). Le schéma d'une telle plaquette est le suivant :



Le gain de ce filtre peut se calculer :

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

Le gain en boucle fermée est alors :

$$G_{BF}(p) = \frac{1}{1 + \frac{\tau_c}{K K_c} p}$$

En pratique, on prend $R_3 = R_4$ pour se simplifier la vie. Il reste alors à choisir R_4, C, R_1 et R_2 de façon à avoir $\tau = R_4 C$ et $K_c = R_2 / R_1 = 1 / K$. On choisit un potard de $100k\Omega$ pour R_2 (pour $R_1 = 1k\Omega$), pour pouvoir faire varier le gain aisément.

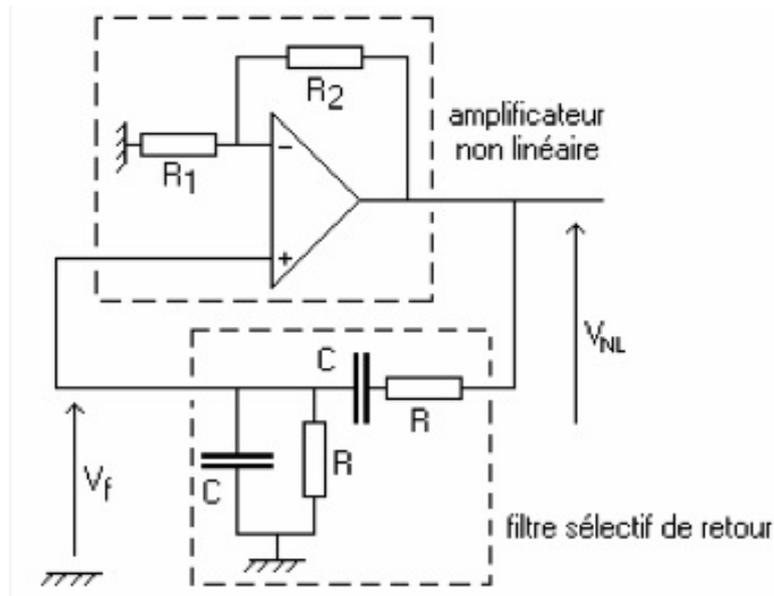
La première chose à faire est de vérifier que l'asservissement fonctionne : on peut vérifier, en changeant brutalement la charge ou la consigne de l'alimentation stabilisée, que c'est bien le cas. On peut alors déterminer la plage d'asservissement en envoyant une commande continue au hacheur (menu Utility puis DC ou du GBF), commande dont on fait varier la valeur. Nous avons, en passage, une plage de 0 V ($\alpha = 0$, la machine s'arrête et l'asservissement devient impuissant) à 9,6 V ($\alpha = 1$, l'asservissement est au maximum de ses capacités, et une augmentation de la commande ne sera plus suivie en sortie). Enfin, on peut montrer que si on augmente trop le gain, le système devient instable (la machine commence à faire un bruit inquiétant et le signal de vitesse se brouille beaucoup). Cela va faire le lien avec la seconde partie du montage, qui est l'étude de systèmes bouclés rendus volontairement instables : les oscillateurs.

Concernant les branchements, il faut relier la dynamo à la borne mesure, le GBF à ref, et la sortie 10 mV au hacheur. Concernant la plage d'asservissement, il faut garder en tête qu'elle dépend du voltage que délivre l'alimentation stabilisée. Il peut donc être pratique, avant le passage, de régler ce paramètre de façon à avoir une plage d'asservissement strictement comprise dans [0, 10 V], et dont on connaîtra à l'avance la valeur. Enfin, il se peut que la MCC ne tourne pas, appelle trop de courant, que l'asservissement ne fonctionne pas... Si quelque chose de bizarre se produit, penser à inverser les branchements sur l'entrée de la MCC (échanger les fils rouge et noir).

II : Un système instable : l'oscillateur

1) L'oscillateur à pont de Wien

Le système est le suivant :



Il est composé d'une partie amplificatrice non linéaire (l'AO), et d'un filtre sélectif de retour (le passe-bande). Le gain A de l'ampli et la fonction de transfert $B(p)$ du filtre sont les suivants :

$$A = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad B(p) = \frac{-1/3}{1 + Q \left(\frac{p}{\omega_0} + \frac{\omega_0}{p} \right)}$$

On peut commencer par étudier le filtre seul en en faisant le diagramme de Bode sous Igor (il faut alors brancher une entrée et une sortie et isoler filtre et ampli). On en déduit $Q = 1/3$ et $f_0 = 45 \pm 5$ kHz. On peut ensuite boucler le système , ce qui donne la fonction de transfert :

$$G_{BF}(p) = \frac{A}{1 + AB(p)}$$

La condition d'oscillation s'écrivant $AB(p) = -1$, elle se traduit ici par :

$$1 + \frac{R_2}{R_1} = 3$$

Dans la pratique, on a choisi $R_1 = 1\text{k}\Omega$, et pour R_2 , une boîte AOIP. On vérifie qu'en effet, les oscillations se déclenchent pour R_2 compris entre 2 et 2,1 k Ω . On peut de plus, en acquérant le digramme de Bode pour différentes valeurs de R_2 , et en s'en servant pour tracer le lieu de Nyquist, montrer que le début des oscillations survient au moment où le lieu coupe le point -1.

On peut de plus s'intéresser à la stabilité en fréquence d'un tel oscillateur : vu le facteur de qualité assez faible du filtre, on s'attend à une tenue assez déplorable en fréquence (le simple fait de toucher la boîte à décades, typiquement, perturbe le signal de sortie. On peut vérifier cela en déclenchant le signal et en se translatant d'environ 1000 périodes, par exemple, par rapport

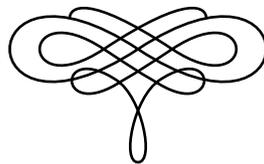
au déclenchement. Si on active la persistance, on voit que la trace n'est pas stable à l'écran : un petit changement de période, invisible près du déclenchement, est beaucoup plus visible 1000 périodes plus loin, où il induit une déformation de la courbe 1000 fois plus importante. On peut alors s'intéresser à un oscillateur de facteur de qualité bien plus grand : l'oscillateur à quartz.

RAJOUTER DES LIEUX DE NYQUIST

Si le diagramme de Bode est intéressant à montrer, il vaut mieux, pour déterminer la fréquence centrale, le faire vraiment à la main : l'incertitude sera moindre. Concernant la manière de tracer le lieu de Nyquist, la méthode suivie fut LA SUIVANTE : . De plus, dans ce lieu, la convention pour la fonction de transfert a été prise en convention filtre (+K) et non oscillateur (-K), comme dans les calculs du poly de \mathcal{JBD} ; le lieu sera donc inversé par symétrie centrale ; en particulier, les oscillations apparaîtront au point 1 et non -1.

2) L'oscillateur à quartz

On peut soit prendre un boîtier tout fait dans les boîtes bleues à gauche des alimentations stabilisées, soit demander à Luc un petit quartz à brancher sur une plaquette : il faut alors rajouter deux capacités (le montage exact est présenté aux alentours de la page 20 du poly de \mathcal{JBD}). Il n'y a qu'à polariser avec une petite alimentation ± 5 V et le système oscille. Se déplacer à la millième période ne change rien tant le système est stable (le facteur de qualité d'un quartz vaut typiquement $10^4 - 10^6$, ce qui, avec son faible coût, le rend particulièrement adapté à la fabrication de montres poignet). On peut en revanche chauffer le quartz au sèche-cheveu (non présenté) pour montrer sa mauvaise tenue en température (il faut alors ouvrir le boîtier dans le premier cas).



Questions : • Est-il possible d'avoir une relation linéaire entre U_{com} et α ? Non car α est intrinsèquement bornée et pas U_{com} .

• Le modèle du premier ordre pour la MCC est-il valable ? C'est acceptable tant qu'on est bien en dessous de la fréquence de coupure, mais au delà, il faut bien voir que notre système est plutôt d'ordre deux (ou plus encore). On assimile donc un ordre 1 à un ordre 2 en supposant que les constantes de temps sont séparables et que l'une est très grande devant l'autre ; c'est alors la plus petite qui est limitante.

• Pourquoi se satisfaire alors de ce modèle manifestement faux ? Car on a un système assez stable (contrairement à l'asservissement du flux lumineux d'une photodiode, système bien plus non linéaire) : on peut donc se permettre de faire des approximations grossières, et même de mal choisir les paramètres de notre correcteur, sans pour autant mettre en péril l'asservissement.

• À quoi s'attend-on comme limite supérieure de la plage d'asservissement ? Cela correspond à $\alpha = 1$, et donc à $\Omega_{max} = \alpha E_{max} / K_{MCC} = \beta V_{dynamo}$. La connaissance de K_{MCC} permet donc de déduire la plage d'asservissement.

• Que peut-on dire du signal d'erreur dans un asservissement sans erreur statique ? Il est nul. Mais dans ce cas, on a une entrée à 0, et donc une sortie à 0, et un asservissement nul, non ? L'erreur vient en fait du raisonnement en régime permanent, alors que le correcteur ne fonctionne qu'en transitoire.

•• La condition d'oscillation $1 + R_2/R_1 \geq 3$ est-elle valable si on monte en fréquence ? Comment en arrive-t-on à cette condition ? Quelle hypothèse fait-on ? Il faut éventuellement prendre en compte le problème de l'AO qui déphase la sortie par rapport à l'entrée, ce qui amène à une résonance décalée par rapport à ω_0 .

•• À quelle fréquence correspond le point le plus à droite du lieu de Nyquist ? Et le point à -1 ? Il s'agit respectivement de 0 et ω_0 .

• Que gagne-t-on à se décaler de 1000 périodes ? Cela revient à se décaler, non de δt , mais de $1000 \times \delta t$, ce qui rend bien plus visible la non-stabilité en fréquence de l'oscillateur.

• La stabilité en fréquence est-elle caractéristique des systèmes bouclés ? Est-il légitime de montrer cela dans ce montage ? En d'autres termes, il faut vraiment bien amener cette partie si on la fait le jour j ; dans le cas contraire, il est possible que le jury pense qu'on recycle une manip hors-sujet.

Commentaire : • Ne pas utiliser les vieilles MCC (l'une d'elle est foireuse et appelle beaucoup trop de courant sur un pôle). Utiliser plutôt le banc noir pour ce montage.

• Il serait également intéressant de mesurer le temps de réponse de la MCC en boucle fermée.

• Il s'agit d'un montage comportant peu de possibilités de mesure ; toute les mesures prises doivent donc l'être avec précision. Ainsi, le scope doit-il continuellement être en high resolution ou en moyennage (typiquement, la mesure de τ doit être prise en moyennage pour éliminer le bruit).

• Plutôt que de décaler le déclenchement à gauche pour utiliser le plus de l'écran possible, on a la possibilité de choisir, dans le menu Horiz, la référence de temps à gauche.

• On peut montrer que si l'on augmente K_C , le système est plus rapide, mais jusqu'à un certain point seulement. On sort en effet à un moment de la plage 0-10 V, et on n'a alors plus aucun effet. \mathcal{JBD} aurait fait ça, et enlevé l'étude du hacheur.

• Concernant le Wien, attention à ne pas faire l'erreur de l'attaquer à l'envers : c'est un filtre de retour et l'entrée est donc dessinée à droite, et la sortie à gauche.

• D'autres manip sont possibles : la boucle à verrouillage de phase par exemple (à traiter dans ce cas sous l'angle systèmes bouclés et pas modulation/démodulation) ; on peut montrer la différence entre plage d'asservissement et de capture, mais on n'a alors probablement pas le temps de parler de correcteur. On peut sinon faire l'asservissement du flux de la photodiode : on commence par fabriquer un oscillateur pour faire ensuite un système qui n'oscille pas ; on peut alors parler du compromis rapidité/stabilité.

*
* *

Références : Les seules références utilisées pour ce montage furent les polys de \mathcal{JBD} .